



Stanisław Skoczowski Rafał Osypiuk Krzysztof Pietrusewicz

Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody

w praktyce



Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody

Książka stanowi podsumowanie wielu prac prowadzonych w Zakładzie Automatyki Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej na temat aspektów działania układów odpornych regulacji automatycznej PID o dwóch stopniach swobody (MFC). Na ponad 300 rysunkach zawartych w książce przedstawione zostały między innymi wyniki badań symulacyjnych oraz aplikacji praktycznych w robotyce, regulacji temperatury, czy energetyce oraz napędach elektrycznych. Stanowią one potwierdzenie przydatności struktury MFC w zastosowaniach przemysłowych, a proponowane metody identyfikacji oraz doboru nastaw regulatorów zostały opracowane głównie pod kątem implementacji we współczesnych urządzeniach automatyki.

Zasadniczym celem jaki przyświecał autorom podczas pisania książki było podkreślenie prostoty i uniwersalności odpornej struktury o dwóch stopniach swobody (Model Following Control). Układ ten bowiem bez wzrostu skomplikowania procedur strojenia pozwala w stosunkowo prosty sposób uzyskać odporność na perturbacje parametrów procesu oraz założoną wysoką jakość regulacji, jak i bardzo dobre tłumienie zakłóceń.

Książka przeznaczona jest dla pracowników naukowych i dydaktycznych uczelni technicznych oraz dla studentów kierunków automatyki, ale również informatyki czy elektroniki. Napisana jest przystępnym językiem, i stanowi dobre źródło szerokiej wiedzy praktycznej.

Zastrzeżonych nazw firm i produktów użyto w książce wyłącznie w celu identyfikacji.



... z każdym bitem
serca

ISBN-13: 978-83-01-14717-4
ISBN-10: 83-01-14717-2



9 788301 147174

www.mikom.pl

**RAFAŁ OSYPIUK
KRZYSZTOF PIETRUSEWICZ
STANISŁAW SKOCZOWSKI**

**ODPORNA REGULACJA PID
O DWÓCH
STOPNIACH SWOBODY**



Projekt okładki: **Michał Rosiński**

Redakcja: **Anna Kozłowska**

Skład komputerowy: **Krzysztof Świstak**

Książka stanowi podsumowanie wielu prac prowadzonych w Zakładzie Automatyki Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej na temat aspektów działania układów odpornych regulacji automatycznej PID o dwóch stopniach swobody (MFC). Przedstawione między innymi na ponad 300 zawartych w książce rysunkach wyniki badań symulacyjnych oraz aplikacji praktycznych w robotyce, regulacji temperatury, czy energetyce oraz napędach elektrycznych stanowią potwierdzenie przydatności struktury MFC w zastosowaniach przemysłowych, a proponowane metody identyfikacji oraz doboru nastaw regulatorów zostały opracowane głównie pod kątem implementacji we współczesnych urządzeniach automatyki.

Książka przeznaczona jest dla pracowników naukowych i dydaktycznych uczelni technicznych oraz dla studentów kierunków automatyki, ale również informatyki czy elektroniki. Napisana jest językiem przystępnym, stanowiąc źródło szerokiej wiedzy praktycznej.

Zastrzeżonych nazw firm i produktów użyto w książce wyłącznie w celu identyfikacji.

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2006

ISBN-10 83-01-14717-2

ISBN-13 978-83-01-14717-4

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
00-251 Warszawa, ul. Miodowa 10
tel. (0 22) 69 54 321
faks (0 22) 69 54 031
e-mail: pwn@pwn.com.pl
www.pwn.pl

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Wydanie pierwsze
Arkuszy drukarskich 23
Druk ukończono w lutym 2006 r.
Druk i oprawa ZWP HEL,
04-007 Warszawa,
ul. Grenadierów 77

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	7
2. Struktury układów automatycznej regulacji (UAR) oraz ich właściwości odpornościowe	9
2.1. Wprowadzenie	9
2.2. Wrażliwość wejściowa i zakłóceńowa 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 znanym 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
3. Podstawowe własności MFC	35
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.	Własności 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
4.	Identyfikacja i modelowanie uproszczone dla PID	229
4.1.	Modele uproszczone dla regulacji PID	229
4.2.	Identyfikacja rzędu i średniej stałej czasowej	231
4.3.	Wykorzystanie stosunku τ_z/T_z do identyfikacji modeli dla PID	237
4.4.	Metoda numeryczna bazująca na stosunku τ_z/T_z	244
4.5.	Wykorzystanie stosunku τ_z/t_m do identyfikacji modeli dla PID	250
4.5.1.	Eksperyment praktyczny	255
5.	Nowe sposoby projektowania regulatora PID	261
5.1.	Projektowanie regulatora PID _{OV} R na zadane przeregulowanie	261
5.2.	Projektowanie odpornego regulatora PID	264
6.	Przykłady zastosowań – praktyczna weryfikacja teorii	269
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 PID temperatury	312
6.2.2.	Badania algorytmu MFC w sterowniku SA100 na wielostrefowym 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 problemu.....	329
6.4.2.	Kotłownia jako obiekt sterowania.....	331
6.4.3.	Wyniki badań nad optymalizacją procesu spalania w kotle parowym mocy 4 MW.....	333
6.4.4.	Podsumowanie badań nad optymalizacją procesu spalania w kotle parowym.....	340
Literatura		341
Skorowidz		357

1. Wprowadzenie

W książce starano się pokazać nowe, proste rozwiązania układów regulacji PID o dwóch stopniach swobody, rezygnując z omawiania rozwiązań już znanych.

Algorytm PID, który jednoczy w swoim dynamicznym działaniu trzy podstawowe aspekty racjonalnego działania – z uwagi na stan aktualny (P), na historię (I) i na aktualną tendencję (D), jest jedynym uniwersalnym, liniowym algorytmem sterowania i nadal znajduje szerokie zastosowanie w praktyce, pomimo olbrzymiego rozwoju teorii i techniki sterowania. Ocenia się, że ponad 90 proc. układów w zastosowaniach przemysłowych i innych praktycznych rozwiązaniach stosuje ten algorytm.

Ponadto, algorytm PID odznacza się wielką prostotą, a problem jego syntezy jest dobrze i szeroko opisany w fachowych publikacjach (np. [109]); jednocześnie dąży się do uzyskania żądanej odporności oraz wysokiej jakości przez układ regulacji, co nie zawsze może być zapewnione przez klasyczny układ regulacji PID.

Nowe możliwości w tym zakresie otwiera stosowanie układów o dwóch stopniach swobody z wykorzystaniem modelu obiektu i dwóch regulatorów PID, przez co nadal układ sterowania jest prosty i uniwersalny, a jednocześnie zapewnia dużo lepszą jakość i odporność.

Pojęcia jakości i odporności są nierozdzielne, gdyż w praktyce chodzi o jednocześnie zapewnienie nie tylko stabilności, ale także odpowiednio wysokiej jakości regulacji w razie perturbacji i różnorodnych zakłóceń, na jakie zwykle jest narażony rzeczywisty układ regulacji.

Omawiane struktury MFC pozwalają w wielu przypadkach w prosty sposób zapewnić wyższą jakość i odporność, bez uciekania się do stosowania skomplikowanych układów adaptacyjnych. Przy tym można stwierdzić, że aktywne wykorzystanie modelu obiektu, zgodnie z ideą Model Based Control (MBC) nie może być uważane za komplikację układu sterowania, gdyż uproszczony model i tak powinien być znany dla syntezy regulatora PID.

Książka jest wynikiem wielu prac i badań naukowych prowadzonych w Zakładzie Automatyki Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej, m.in. prac doktorskich – Rafała Osypiuka *Wielopętlowy odporny układ regulacji n-MFC (Model-Following Control) w zastosowaniu do sterowania manipulatorem szeregowym* oraz Krzysztofa Pietrusewicza *Aplikacja algorytmu model-following control w programowalnym sterowniku automatyki*.

Niniejsza publikacja jest pracą współautorską, jej poszczególne rozdziały i podrozdziały napisali: Stanisław Skoczowski – 1, 2, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 5, 6.2.1, 6.3; Rafał Osypiuk – 3.4, 3.7, 6.1; Krzysztof Pietrusewicz – 3.5, 3.6, 3.8, 4.5, 6.2.2, 6.2.3, 6.4.

Autorzy wyrażają nadzieję, że książka oddana w ręce Czytelników stanowić będzie źródło wiedzy z zakresu praktycznego wykorzystania odpornych układów regulacji o dwóch stopniach swobody wykorzystujących model sterowanego obiektu, a zaprezentowane w niej rozwiązania staną się pomocne w rozwijaniu własnych pomysłów, wyznaczając jednocześnie wiele nowych kierunków dalszych badań, nad którymi autorzy mają zamiar nadal pracować.