



Jacek Kabziński
Przemysław Mosiołek



**Projektowanie
nieliniowych
układów
sterowania**

Projektowanie nieliniowych układów sterowania



**Komitet Automatyki i Robotyki
Polskiej Akademii Nauk**

**Monografie
Tom 22**

Komitet Redakcyjny serii

prof. Tadeusz **Kaczorek** (przewodniczący)

prof. Władysław **Findeisen**

prof. Henryk **Górecki**

prof. Edward **Jeziński**

prof. Jerzy **Klamka**

prof. Jacek **Kluska**

prof. Józef **Korbicz**

prof. Krzysztof **Malinowski**

prof. Maciej **Niedźwiecki**

prof. Ewa **Niewiadomska-Szynkiewicz**

prof. Marek **Pawetczyk**

prof. Leszek **Rutkowski**

prof. Ryszard **Tadeusiewicz**

prof. Krzysztof **Tchoń**

prof. Leszek **Trybus**

prof. Jan **Węglarz**



Jacek **Kabziński**
Przemysław **Mosiołek**

Projektowanie nieliniowych układów sterowania

 PWN

Projekt okładki i stron tytułowych: **Przemysław Spiechowski**

Fotografia na okładce: **Shutterstock/Ruslan Gi**

Wydawca: **Adam Filutowski**

Koordinator ds. redakcji: **Renata Ziółkowska**

Redaktor: **Maria Kasperska**

Produkcja: **Mariola Grzywacka**

Skład i łamanie: **Ewa Szelatyńska, ScanSystem.pl**

Recenzent: **dr hab. inż. Alicja Mazur, profesor Politechniki Wrocławskiej,
Katedra Cybernetyki i Robotyki**

Książka została dofinansowana przez Politechnikę Łódzką, Instytut Automatyki

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl.
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2018

ISBN 978-83-01-19697-4

Wydanie I

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl, reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Przedmowa	VII
Wprowadzenie	IX
I. Stabilność nieliniowych układów dynamicznych	1
1. Nieliniowe układy dynamiczne, punkty równowagi i stabilność	3
2. Bezpośrednia metoda Lapunowa – układy stacjonarne	13
2.1. Podstawowe twierdzenie o stabilności	13
2.2. Twierdzenie o globalnej stabilności asymptotycznej i wyznaczanie zbioru przyciągania	17
2.3. Modyfikacje bezpośredniej metody Lapunowa w przypadku półokreślonej pochodnej systemowej	21
2.4. Zastosowanie funkcji majoryzujących	24
2.5. Bezpośrednia metoda Lapunowa dla układów liniowych	25
3. Bezpośrednia metoda Lapunowa – układy niestacjonarne i uogólnienia	27
3.1. Podstawowe twierdzenie o stabilności układów niestacjonarnych	27
3.2. Lemat Barbalata, twierdzenie LaSalle'a-Yoshizawy, jednostajna ograniczoność trajektorii	31
II. Metody projektowania nieliniowych układów sterowania	37
4. Idea projektowania sterowania z wykorzystaniem bezpośredniej metody Lapunowa	39
4.1. Bezpośrednia metoda Lapunowa w analizie stabilności układów	40
4.2. Sterująca funkcja Lapunowa	41
4.3. Reprezentacja niepewności w modelu obiektu – układy odporne i adaptacyjne	43
4.4. Projektowanie z wykorzystaniem funkcji Lapunowa dla układu nominalnego	45
4.5. Od projektowania z wykorzystaniem funkcji Lapunowa dla układu nominalnego do rekursywnego tworzenia funkcji Lapunowa	47
5. Adaptacyjne nadążanie za modelem	55
5.1. Liniowy układ adaptacyjny nadążający za liniowym modelem odniesienia	56
5.2. Nieliniowy układ adaptacyjny nadążający za liniowym modelem odniesienia	63
5.2.1. Nadążanie za modelem w układach wielowejściowych	63
5.2.2. Klasyczne prawo adaptacji	69
5.2.3. Sprzężenie zwrotne w prawie adaptacji	75
5.2.4. Dynamiczne sprzężenie zwrotne w prawie adaptacji	79
5.2.5. Rzutowanie adaptowanych parametrów na zbiór ograniczeń	80
5.3. Nieliniowy układ adaptacyjny nadążający za nieliniowym modelem z liniowym modelem pośrednim	83
6. Algorytm „kroków wstecz”	93
6.1. Podstawowe etapy algorytmu „kroków wstecz”	93
6.2. Algorytm „kroków wstecz” w układzie drugiego rzędu	96
6.3. Ogólna postać algorytmu „kroków wstecz”	98
6.4. Korzystne nieliniowości	107
7. Adaptacyjny algorytm „kroków wstecz”	115
7.1. Adaptacyjny algorytm „kroków wstecz” dla układu dwuwymiarowego	115
7.2. Wprowadzenie funkcji strojących	119

7.3.	Ogólna postać adaptacyjnego algorytmu „kroków wstecz” z funkcjami strojącymi	121
7.4.	Odporne prawa adaptacji	134
7.4.1.	σ -modyfikacja prawa adaptacji	135
7.4.2.	$e\text{-}\sigma$ -modyfikacja prawa adaptacji	137
7.4.3.	Prawa adaptacji z rzutowaniem	139
7.4.4.	Przykład	142
7.5.	Sterowanie odporne	146
8.	Adaptacyjny algorytm „kroków wstecz” z filtracją funkcji stabilizujących	151
8.1.	Algorytm „kroków wstecz” z filtracją funkcji stabilizujących	152
8.2.	Inne rozwiązania filtrów obliczających pochodne	157
8.3.	Odporne prawa adaptacji	158
8.3.1.	σ -modyfikacja prawa adaptacji	159
8.3.2.	$e\text{-}\sigma$ -modyfikacja prawa adaptacji	160
8.3.3.	Prawa adaptacji z rzutowaniem	161
9.	Adaptacyjny algorytm „kroków wstecz” z przybliżonym różniczkowaniem funkcji stabilizujących	169
III.	Praktyczne aspekty projektowania nieliniowych układów sterowania	179
10.	Układy z ograniczonym sterowaniem i nieznanym współczynnikiem wzmocnienia sterowania	181
10.1.	Ograniczenie sygnału sterującego a realizacja celów sterowania	181
10.2.	Adaptacyjny algorytm „kroków wstecz” z ograniczeniem sterowania	183
10.3.	Niezany współczynnik wzmocnienia sterowania	187
10.4.	Łączenie różnych technik projektowania metodą „kroków wstecz”	190
11.	Układy nieliniowe względem zmiennych w czasie parametrów	203
11.1.	Założenia o liniowości układu względem stałych parametrów	203
11.2.	Odporna stabilizacja metodą „kroków wstecz”	213
12.	Adaptacyjny algorytm „kroków wstecz” z ograniczeniami wyjścia i zmiennych stanu	219
12.1.	Barierowe funkcje Lapunowa	219
12.2.	Algorytm „kroków wstecz” z ograniczeniem wyjścia	221
12.3.	Algorytm „kroków wstecz” z ograniczeniem wszystkich zmiennych stanu	226
	Dodatki	239
D1.	Wektory, macierze i normy – przydatne nierówności i tożsamości	239
D2.	Ciągłość, różniczkowalność i równania różniczkowe	243
D3.	Operator rzutowania	246
	Zestawienie przykładów	249
	Słownik terminów stosownych w książce	251
	Bibliografia	254

Przedmowa

Podstawowym celem automatyki jest oddziaływanie na otaczające nas procesy w celu zapewnienia ich pożądanego przebiegu. Te procesy są przeważnie nieliniowe, zazwyczaj podlegają wpływowi nieprzewidywalnych czynników zewnętrznych, a ich charakterystyki nigdy nie są dokładnie znane. W klasycznej automatyce ze względu na trudności, jakie nastęrcza analiza systemów nieliniowych, często projektuje się układy sterowania z wykorzystaniem uproszczonego, liniowego opisu analizowanych procesów. Takie podejście w naturalny sposób prowadzi do przybliżonych wyników, które mogą być dopuszczalne i wartościowe w konkretnych przypadkach, ale zawsze pozostawiają wątpliwości, czy prowadzą do najlepszego możliwego przebiegu danego procesu i czy nieunikniony margines błędu nie spowoduje całkiem innego działania układu niż przewidywany przy zastosowaniu liniowej analizy. Dlatego celowa jest dokładna analiza otaczających nas procesów przy zastosowaniu nieliniowych metod teorii sterowania. Właśnie temu zagadnieniu jest poświęcona książka zatytułowana „Projektowanie nieliniowych układów sterowania”. W jej pierwszej części są opisane metody badania stabilności nieliniowych układów dynamicznych, zarówno układów stacjonarnych, jak i niestacjonarnych. Omawiane w części pierwszej zagadnienia można wprawdzie znaleźć w polskiej literaturze przedmiotu, ale są one rozsiiane po różnych publikacjach i dlatego ich uporządkowanie i przedstawienie w zwartej postaci wydaje się celowe, tym bardziej, że stanowią one element niezbędny do czytania drugiej i trzeciej części książki. Część druga zawiera systematyczny wykład najważniejszych matematycznych metod projektowania nieliniowych układów sterowania obiektami dynamicznymi. Omówiono w niej wiele ważnych zagadnień z tego obszaru, jak na przykład pojęcie sterującej funkcji Lapunowa, kwestię adaptacyjnego nadążania za modelem i wreszcie różne warianty tzw. backsteppingu, czy też jak piszą Autorzy – algorytmu „kroków wstecz”. Warto zauważyć, że Autorzy rozpoczynają od przedstawienia najprostszej wersji tego algorytmu, a następnie stopniowo przechodzą do jego bardziej skomplikowanych wariantów. Takie podejście, zainspirowane wieloletnim doświadczeniem dydaktycznym Autorów w zakresie teorii sterowania, a w szczególności teorii sterowania nieliniowego, z pewnością ułatwi czytelnikom studiowanie książki i analizę zawartych w niej wielu nietrywialnych zagadnień. Trzecia, ostatnia część książki jest poświęcona kilku, bardzo istotnym z praktycznego punktu widzenia, zagadnieniom projektowania nieliniowych układów regulacji. Należą do nich tak ważne kwestie jak nieuniknione w każdej realnej sytuacji ograniczenia sygnału sterującego, zmiennych stanu i sygnału wyjściowego. Całość uzupełniają trzy dodatki ułatwiające mniej zaawansowanym matematycznie czytelnikom śledzenie prezentowanych zagadnień.

Książka ma charakter poważnego podręcznika akademickiego dotyczącego analizy i projektowania nieliniowych systemów sterowania, ma także istotne walory monograficzne. Z pewnością taka publikacja jest od dawna oczekiwana i bardzo potrzebna na polskim rynku wydawniczym, na którym jest obecnie kilka bardzo dobrych i wyczerpujących publikacji na temat sterowania liniowego, ale brakuje zwartej prezentacji metod nieliniowych. Adresatami książki „Projektowanie nieliniowych układów sterowania” są studenci studiów drugiego stopnia kierunku automatyka i robotyka oraz kierunków pokrewnych, dyplomanci oraz doktoranci zajmujący się zagadnieniami sterowania nieliniowego, a także