

PAWEŁ DWORAK

Wybrane problemy syntezy układów sterowania obiektami dynamicznymi o wielu wejściach i wielu wyjściach

$${}_{t_0}D_t^r f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-r} \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{t-t_0}{h} \right\rfloor} (-1)^j \binom{r}{j} f(t-jh)$$

$$u(\cdot) = G^{-1}(\cdot) L(\cdot) + G^{-1}(\cdot) L(\cdot) + G^{-1}(\cdot) L(\cdot) + G^{-1}(\cdot) L(\cdot)$$

$$f'(x) = \{ \xi \in \mathbb{R}^n : \xi \in \partial f(x) \}$$

$$\dot{x}_o(t) = \sum_{i=1}^{r_0} \tilde{w}_i \left[A_{oi} x_o(t) + B_{oi} u_i(t) \right]$$

$$y(t) = C_o x_o(t)$$

$$S_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{49} \sum_{l=1}^{73} p_{i,j,l} p_{k,j,l}}{\sum_{j=1}^{49} \sum_{l=1}^{73} p_{i,j,l}}$$

PAWEŁ DWORAK

**Wybrane problemy syntezy
układów sterowania obiektami dynamicznymi
o wielu wejściach i wielu wyjściach**

Szczecin 2015

Recenzenci

ANDRZEJ DZIELIŃSKI

KRZYSZTOF J. LATAWIEC

Opracowanie redakcyjne

KRYSTYNA KAŻMIEROWSKA

Projekt okładki

PAWEŁ DWORAK

Wydano za zgodą

REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIwersYTETU TECHNOLOGICZNEGO
W SZCZECINIE

ISBN 978-83-766-200-1

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
70-310 Szczecin, al. Piastów 48, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl
Druk ZAPOL Sp. j., 71-062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. 91 434 10 21, e-mail: zarzad@zapol.com.pl

Spis treści

Wykaz skrótów, oznaczeń i akronimów	5
1. Wstęp.....	9
2. Opisy właściwości wielowymiarowych układów dynamicznych	13
2.1. Wstęp.....	13
2.2. Podstawy rachunku i modelowania układów całkowitego rzędu	13
2.3. Podstawy rachunku i modelowania układów niecałkowitego rzędu	16
3. Wybrane problemy odsprzęgania obiektów MIMO.....	21
3.1. Wprowadzenie	21
3.2. Statyczne odsprzęganie układów MIMO	22
3.3. Dynamiczne odsprzęganie układów MIMO	24
3.4. Grupowanie wejść i wyjść w układach MIMO	37
3.5. Odsprzęganie obiektów lewostronnie odwracalnych	39
3.6. Uniwersalny algorytm dynamicznego odsprzęgania	42
3.7. Przykład dynamicznego odsprzęgania obiektu MIMO w rekonfigurowalnym układzie sterowania.....	53
3.8. Dynamiczne odsprzęganie układów niecałkowitego rzędu.....	59
3.8.1. Statyczne odsprzęganie układów MIMO niecałkowitego rzędu	60
3.8.2. Dynamiczne odsprzęganie obiektów TITO	62
3.8.3. Dynamiczne odsprzęganie obiektu MIMO niecałkowitego rzędu z wykorzystaniem sprzężenia od wektora stanu	67
3.9. Podsumowanie.....	72
4. Sterowanie nieliniowymi obiektami MIMO	73
4.1. Koncepcja budowy adaptacyjnego regulatora z przełączeniami do sterowania nieliniowymi obiektami MIMO	73
4.2. Stabilność układu przełączanego.....	77
4.3. Synteza regulatorów adaptacyjnych do sterowania nieliniowymi obiektami MIMO ..	80
4.3.1. Synteza układu regulacji modalnej dla nieliniowego obiektu MIMO.....	80

4.3.1.1. Metody projektowania układów sterowania modalnego dla liniowych obiektów MIMO	81
4.3.2. Synteza układu regulacji z dynamicznym odsprzęgnięciem dla nieliniowego obiektu MIMO	102
4.4. Redukcja liczby regulatorów w zbiorze przełączanego regulatora	108
4.5. Regulacja rozmyta typu Takagi-Sugeno.....	119
4.5.1. Model rozmyty obiektu i regulatora T-S	119
4.5.2. Stabilność układu regulacji z regulatorem T-S	121
4.5.3. Regulator strefowy	123
4.5.4. Przykłady projektowania regulatorów rozmytych typu T-S	126
4.6. Sztuczne sieci neuronowe w sterowaniu nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO	130
4.7. Model Following Control dla obiektów MIMO	134
4.7.1. Budowa i właściwości struktury MFC	134
4.7.2. Synteza układu MFC dla nieliniowego obiektu MIMO	137
4.8. Podsumowanie.....	141
5. Implementacja układów sterowania obiektami MIMO w programowalnych urządzeniach automatyki	143
5.1. Dostosowanie procedur sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO na potrzeby sterowania w trybie czasu rzeczywistego.....	143
5.1.1. Synteza on-line układów sterowania modalnego nieliniowymi obiektami MIMO	143
5.1.2. Synteza on-line układów sterowania z dynamicznym odsprzęgnięciem	146
5.2. Prototypowanie układów sterowania z wykorzystaniem adaptacyjnych wielowymiarowych regulatorów modalnych.....	148
5.3. Podsumowanie.....	164
6. Wnioski	167
Literatura	169
Summary	183
Zusammenfassung.....	185

Selected problems of synthesis of control systems for dynamic plants with multiple-inputs and multiple-outputs

Summary

The subject of this monograph is to study various aspects of the synthesis of control systems of the dynamic multi-input multi-output MIMO plants. There are described both features of the MIMO plants and tasks to be solved by designing automatic control systems for such objects.

The book is a summary of research the author carried out recently in the Department of Control Engineering and Robotics, Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin. The presented results, through a rich literature review, are referenced to the current developments in the field of control theory of MIMO dynamic systems. Original research results, for the most part been published, are complemented by new suggestions and discussion of problems still requiring analysis and solutions or replenishment.

The main scientific objective was to examine different structures and to develop new control algorithms for nonlinear dynamic plants with multiple inputs and outputs with special emphasis on issues related to the dynamic decoupling. To achieve the main goal some indirect objectives should have to be placed and solved. The developed methods of synthesis of the MIMO control systems have been verified by simulations. Also the possibility and level of complexity of their implementation in typical programmable automation controllers have been checked. In particular an adaptive control systems as well as practical solutions of the multicontroller structures with switchable outputs and/or changed parameters have been analyzed.

The algorithms which use during synthesis of the control system a set of linear controllers have been focused on and tested. These were structures:

- with linear controllers with varying parameters that are systematically tuned up in keeping with changing plant operating conditions,

- multicontroller structures, whose control signal components are formed as weighted means of outputs of a selected controller group according to Takagi–Sugeno rules,
- with adaptive neural controllers.

A part of the research was devoted to the precise control of the MIMO dynamic system with the usage of the dynamic decoupling techniques. The problems with the reconfiguration of the dynamically decoupled control systems after actuators faults are particularly analyzed. Apart of that problems with a dynamic decoupling of MIMO fractional order systems are discussed.

The simulation experiments which verify the usability of the analyzed control systems were carried out in a Matlab/Simulink environment. Great part of them was also carried out in a Hardware-in-the-Loop (HiL) laboratory test stand. A rapid prototyping devices and typical of-the-shelf controllers were used for fast implementation and to run controllers in a real time regime. The simulated plants and controllers are simulated independently on different platforms in real time.

The book consists of four main chapters, supplemented with a summary and references. In Chapter 2 methods of description of the used in this work dynamic MIMO plants are presented.

Chapter 3 is devoted to the analysis of a dynamic decoupling of the linear dynamic MIMO plants. Problems with pairing and grouping of the decoupled system inputs and outputs are discussed. The possibility of a dynamic decoupling of left-invertible plants is analyzed and a procedure of squaring down the plant model is proposed. A universal algorithm for a dynamic decoupling of the dynamic MIMO plants is presented. The algorithm ensures that the system after decoupling will be stable and will meet all designing goals for any MIMO, in general unstable, non-minimumphase plant.

Apart of that problems with a dynamic decoupling of MIMO fractional order systems are discussed. Similarities and differences to integer order decoupling methods are shown. Basing on a few examples taken from literature simulations of decoupled fractional order systems were carried out to show the possibility of the practical implementation of such control systems.

In Chapter 4 new methods of synthesis of adaptive control systems for nonlinear MIMO dynamic plants are presented. Theoretical possibilities as well as practical aspects of synthesis and implementation of the adaptive, gain-scheduling MIMO controllers are analyzed. A new group T-S like and adaptive neuronal controllers are presented.

Chapter 5 shows problems with implementation of the analyzed in the work control systems in programmable automatic devices. There are presented results of work of selected controllers in a real time regime. A rapid prototyping devices as well as typical programmable controllers were used in this verification.

Gewählte Probleme der Synthese von Systemen der Steuerung von dynamischen Objekten mit vielen Eingängen und vielen Ausgängen

Zusammenfassung

Das Thema vorliegender Monographie ist die Analyse von verschiedenen Aspekten der Regelungssysteme für dynamische Objekte mit vielen Eingängen und vielen Ausgängen. Es wurden Merkmale von MIMO-Objekten beschrieben und Aufgaben definiert, die beim Entwerfen eines Systems für automatische Regelung von derartigen Objekten zu lösen sind.

Das Buch ist eine Zusammenfassung von wissenschaftlichen Forschungen des Verfassers, die in der letzten Zeit im Lehrstuhl für Industrieautomatik und Robotik der Elektrischen Fakultät der Technischen Universität in Szczecin geführt wurden. Die beschriebenen Ergebnisse, durch umfangreiche Übersicht der Fachliteratur, beziehen sich auf aktuelle Errungenschaften auf dem Gebiet der Theorie der Steuerung von mehrdimensionalen dynamischen Systemen. Die echten Forschungsergebnisse, die in ihrer Mehrheit bereits vorher veröffentlicht wurden, wurden um neue Vorschläge und Diskussionen an Problemen erweitert, die immer noch analysiert, gelöst oder ergänzt werden müssen.

Das Hauptziel der wissenschaftlichen Arbeit des Verfassers war die Untersuchung der Möglichkeit des Einsatzes von verschiedenen Systemstrukturen und die Entwicklung von Algorithmen für die Steuerung von nichtlinearen dynamischen Objekten mit vielen Eingängen und Ausgängen mit besonderer Berücksichtigung von Problemen im Zusammenhang mit dynamischer Entkopplung. Für das Erreichen des wissenschaftlichen Hauptziels war das Definieren und Realisieren von einigen Zwischenzielen erforderlich. Man suchte nach geeigneten Methoden der Synthese und Implementierung von Steuerungssystemen für MIMO-Objekte, wobei die entwickelten Algorithmen gleichzeitig im Simulationsverfahren verifiziert wurden. Insbesondere wurden Adaptationsalgorithmen eines Steuerungssystems analysiert und Möglichkeiten eines praktischen Einsatzes von Mehrreglerstrukturen mit umschaltbaren Ausgängen und/oder veränderlichen Parameterwerten von Reglern untersucht.

Es wurden Algorithmen getestet, die für die Synthese eines Adaptationssystems einen Satz von vielen linearen Reglern verwenden. Es waren folgende Strukturen:

- mit linearen Reglern mit Parametern, die während der Arbeit des Systems geändert wurden;
- Mehrreglerstrukturen vom Typ "Takagi-Sugeno", auf Basis von entsprechenden Fuzzy-Ausgangssignalen des Objektes (und eventuell von zusätzlichen Hilfssignalen);
- mit adaptiven Neuronal-Reglern.

Im Rahmen der Arbeit wurden auch Probleme analysiert, die bei präziser Steuerung eines dynamischen Systems unter Verwendung von Techniken dynamischer Entkopplung auftreten können. Es wurden insbesondere Probleme mit entsprechender Rekonfiguration von Regelungssystemen mit dynamischer Entkopplung nach einer Beschädigung von Aktoren untersucht. Es wurde auch eine Analyse der Möglichkeit der Synthese eines Steuerungssystems mit dynamischer Entkopplung für Objekte der nichtganzzahligen Ordnung durchgeführt.

Die Simulationsexperimente, die die Richtigkeit des Funktionierens von entwickelten Regelungssystemen verifizierten, wurden mit MATLAB/Simulink durchgeführt. Ein großer Teil von denen wurde auch auf einem Laborprüfstand vorgenommen, welcher die Durchführung von Simulationsexperimenten in Echtzeit unter Verwendung von Werkzeugen für schnelle Prototypierung und von typischen programmierbaren Industriesteuerungen erlaubt. Die durchgeführten Simulationen hatten einen Charakter vom Typ Hardware-in-the-loop, wo die simulierten Objekte und die eingesetzten Regler auf separaten Einheiten in Echtzeit arbeiteten. Dies ermöglichte das Testen der Fähigkeit von vorgeschlagenen Algorithmen zur Arbeit eines Steuerungssystems im Echtzeitbetrieb, welches in Form eines rechnergestützten Steuerungssystems realisiert wurde, als auch der Möglichkeit der Synthese von Steuerungsalgorithmen im Online-Betrieb.

In weiteren Kapiteln der Monographie wurden folgende Probleme behandelt. Im zweiten Kapitel wurden die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Methoden der Beschreibung der Eigenschaften von dynamischen MIMO-Systemen dargestellt.

Das dritte Kapitel wurde der Analyse von Problemen im Zusammenhang mit der dynamischen Entkopplung von linearen dynamischen MIMO-Objekten gewidmet. Es wurden Probleme im Zusammenhang mit dem Bilden von Paaren und dem Gruppieren von Ein- und Ausgängen eines entkoppelten Systems als auch die Möglichkeit der dynamischen Entkopplung von Objekten mit einer Anzahl von Ausgängen größer als die Anzahl von Eingängen beschrieben. Es wurde ein universeller Algorithmus der dynamischen Entkopplung von MIMO-Objekten vorgestellt. Es wurden Voraussetzungen für den Einsatz von Polynommethoden für die Synthese von Entkopplungssystemen dynamischer Objekte der nichtganzzahligen Ordnung erörtert.

Im vierten Kapitel wurden die Methoden der Synthese von adaptiven Regelungssystemen für die Steuerung mit nichtlinearen dynamischen MIMO-Objekten dargestellt. Es wurden

theoretische und praktische Möglichkeiten der Synthese und Implementierung der MIMO-Regler vom Typ "gain-scheduling" analysiert, wofür unter anderem Fuzzy-Algorithmen vom Typ T-S und künstliche neuronale Netzwerke eingesetzt wurden.

Im fünften Kapitel werden Probleme der Implementierung von untersuchten Steuerungssystemen in programmierbaren Automatik-Geräten analysiert. Es wurden Ergebnisse der einzelnen Regler im Echtzeitbetrieb (Untersuchungen vom Typ Hardware-in-the-loop) präsentiert. Dazu wurden Werkzeuge für schnelle Prototypierung und typische programmierbare Industriesteuerungen verwendet.