

# The Problem of the Modeling Uncertainties in the Paradigm of the Active Disturbance Rejection Control

Problem niepewności modelowania w paradygmacie sterowania z aktywną kompensacją zaburzeń

## Abstract

In the following dissertation, the theoretical and experimental results on the problem of modeling uncertainties in the system control within the Active Disturbance Rejection Control paradigm are presented. The considered concept proposes that, in the presence of unmodeled dynamics or unmeasurable external disturbances, it is possible to employ the Extended State Observer algorithm to online estimate a difference between the controlled plant and its assumed nominal model. It is advocated that this measure of uncertainty of the dynamics of the plant can be then used in the control law to effectively compensate for the unknown dynamics and achieve high performance without the perfect knowledge of the system.

Various examples from both academia and industry have proven the quality of such an approach. Yet, its premises are based on the assumption of a specific form of the model uncertainties and disturbances affecting the plant, which is often not satisfied in practice. In this work, the performance and robustness of the Active Disturbance Rejection Control in the presence of unmodeled dynamics which may not conform to this nominal structure are discussed. Namely, the model of the dynamics subject to the uncertainty of both input gain and assumed drift term is considered and the performance of the discussed control scheme is analyzed through the Lyapunov approach. To further extend the insights into the problem of Active Disturbance Rejection Control performance in the presence of modeling uncertainties, a series of individual and specific scenarios is also discussed, covering a wider range of control tasks which may not be consistent with the characteristics assumed in the earlier analysis.

As the possible methods of increasing the robustness of the considered control schemes to the presence of modeling uncertainties the recently proposed novel Parameter Identifying Extended State Observer and Parameter Identifying Disturbance Rejection Control are discussed. These algorithms stem from the Extended State Observer and Active Disturbance Rejection Control approaches but incorporate the adaptive terms employing the gradient adaptation law to online identify the model of the plant and fine tune the controller to best fit the dynamics of the real object. The applicability and stability conditions of the proposed approaches are discussed, and their usability is verified by extensive simulation and experimental testing. It is demonstrated that the introduction of the adaptive identification of the dynamics of the plant within the Active Disturbance Rejection Control algorithms can significantly improve their performance by ensuring asymptotic convergence of all errors in the system.

In this thesis, particular attention is given to the application of the Active Disturbance Rejection Control and Parameter Identifying Disturbance Rejection Control approaches to robotic manipulators and autonomous mobile robots. The experimental validation of the discussed schemes is performed mainly using a robotic telescope mount designed and constructed by a team that includes the author of this work, and a mobile hovercraft robot adapted for scientific research solely by the author of this dissertation. The structure and design of these devices are also given in this paper in the scope corresponding to the involvement of the author.

## Streszczenie

W niniejszej rozprawie przedstawiono teoretyczne i eksperymentalne wyniki badań nad problemem niepewności modelowania w systemach sterowania opartych o paradygmat Aktywnej Kompensacji Zaburzeń (ang. Active Disturbance Rejection Control, ADRC). W ramach tego paradygmatu wnioskuje się, iż w obecności niemodelowanej dynamiki lub niemierzalnych zewnętrznych zaburzeń, możliwe jest zastosowanie Obserwatora Stanu Rozszerzonego (ang. Extended State Observer, ESO) by w czasie rzeczywistym estymować różnicę pomiędzy dynamiką sterowanego obiektu, a przyjętym modelem nominalnym. Proponuje się, by tak uzyskany wskaźnik niepewności modelu wykorzystać następnie w projekcie prawa sterowania w celu efektywnej kompensacji nieznannej dynamiki obiektu i uzyskania wysokiej jakości sterowania mimo braku dokładnej znajomości układu.

Różnorodne przykłady zastosowania, zarówno w warunkach akademickich jak i przemysłowych, wykazały wysoką skuteczność takiego rozwiązania. Teoretyczne podstawy tej metody oparte są jednak na założeniu pewnego modelu niepewności i zaburzeń oddziałujących na układ, które często nie jest spełnione w warunkach praktycznych. W niniejszej pracy, przedstawiono wyniki badań nad skutecznością i odpornością sterowania z Aktywną Kompensacją Zaburzeń w obecności niemodelowanej dynamiki nie spełniającej tego założenia. W szczególności, rozważono układy dynamiczne z niepewnością w torze wejścia oraz dryfu i, wykorzystując podejście Lyapunova, zbadano właściwości układów sterowania opartych o metodę Aktywnej Kompensacji Zaburzeń. By poszerzyć zakres uzyskanych wyników na temat właściwości sterowania z Aktywną Kompensacją Zaburzeń w obecności niepewności modelowania, przedstawiono i zbadano także zestaw wybranych problemów z zakresu sterowania, nie objętych przez wcześniejszą analizę.

Jako potencjalną metodę zwiększenia skuteczności rozważanej metody w obliczu niepewności modelowania, w pracy przedstawiono także niedawno zaproponowane techniki Obserwatora Stanu Rozszerzonego z Identyfikacją Parametryczną (ang. Parameter Identifying Extended State Observer, PIESO) oraz Sterowania z Kompensacją Zaburzeń z Identyfikacją Parametryczną (ang. Parameter Identifying Disturbance Rejection Control, PIDRC). Algorytmy te zaproponowane zostały w oparciu o struktury Obserwatora Stanu Rozszerzonego oraz Sterowania z Aktywną Kompensacją Zaburzeń i wzbogacone o adaptacyjne składniki wykorzystujące gradientowe prawa adaptacji w celu identyfikacji modelu zaburzenia w czasie rzeczywistym i dopasowania struktury sterownika do rzeczywistej dynamiki obiektu. W pracy przedstawiono warunki stabilności i stosowalności zaproponowanych metod, a ich skuteczność w problemach praktycznych została zweryfikowana przez wyczerpujące badania symulacyjne i eksperymentalne. Wykazano, że wprowadzenie składnika adaptacyjnego w celu identyfikacji dynamiki rzeczywistego obiektu pozwala znacząco zwiększyć skuteczność metod Aktywnej Kompensacji Zaburzeń i uzyskać asymptotyczną zbieżność wszystkich błędów w układzie regulacji.

W niniejszej rozprawie szczególną uwagę poświęcono zastosowaniom techniki Aktywnej Kompensacji Zaburzeń i Kompensacji Zaburzeń z Identyfikacją Parametryczną do sterowania robotycznymi manipulatorami oraz autonomicznymi robotami mobilnymi. Eksperymentalne badania rozważanych metod przeprowadzono w istotnej części z wykorzystaniem zrobotyzowanego montażu teleskopu astronomicznego zaprojektowanego i wykonanego przez zespół badawczy którego członkiem był autor tej rozprawy, oraz mobilnego zrobotyzowanego poduszki przygotowanego do celów badawczych przez autora tej rozprawy. Struktura obu tych narzędzi również została krótko omówiona w zakresie odpowiadającym zaangażowaniu autora tej rozprawy.