

Analiza wpływu struktury modelu i metod strojenia obserwatora w kontekście poprawy działania technik ADRC w środowiskach deterministycznych i stochastycznych

Streszczenie

W niniejszej rozprawie została rozważona metoda regulacji z aktywną kompensacją zakłóceń ADRC (ang. Active Disturbance Rejection Control), zakładająca w podstawowej formie uproszczenie obiektu regulacji do postaci wielokrotnego integratora. Algorytm ADRC składa się z rozszerzonego obserwatora stanu ESO (ang. Extended State Observer) oraz algorytmu regulacji bazującego na estymowanym sprzężeniu od stanu. Uproszczenie modelu możliwe jest dzięki odsprzęgnięciu jego wewnętrznej dynamiki (lub jej części) jako funkcji zaburzenia. Rozpatrzona została także wersja uogólniona GADRC (ang. Generalized ADRC), zakładająca włączenie informacji o liniowej części obiektu (współczynnikach wielomianu charakterystycznego) do algorytmu sterowania. Dodatkowo wprowadzono strukturę ADRC uogólnionego do funkcji nieliniowych. Zaproponowane zostały modyfikacje algorytmu pozwalające poprawić jakość estymacji i sterowania w warunkach deterministycznych oraz stochastycznych dla pewnej klasy obiektów mechanicznych. Przedstawiono opis transmitancyjny algorytmu regulacji oraz układu zamkniętego wraz z określeniem wpływu parametrów projektowych na jego działanie. Metoda uogólniona ADRC została rozszerzona o rekursywną identyfikację parametrów pozwalającą poprawić jakość regulacji w warunkach niepełnej znajomości modelu oraz w przypadku zmian parametrów. W następnej kolejności zaproponowano algorytm wykorzystujący zamiennie metody estymacji stanu (filtr Kalmana, filtr cząsteczkowy) zamiast klasycznego obserwatora ESO. Na koniec przedstawiona została alternatywna metoda strojenia obserwatora stanu, bazująca na wzmocnieniach stanu ustalonego filtru Kalmana. Wszystkie modyfikacje zostały przedstawione w odniesieniu do podejścia ADRC podstawowego oraz uogólnionego. Badania zostały przeprowadzone na symulacyjnym modelu drugiego rzędu oraz na rzeczywistych mechatronicznych zestawach laboratoryjnych. Pierwszy z nich to silnik prądu stałego, dwa pozostałe stanowią nieliniowe obiekty regulacji – stół balansujący kulką i wahadło reakcyjne. W wyniku przeprowadzonych prac osiągnięta została poprawa jakości regulacji przez zastosowanie zaproponowanych modyfikacji ADRC. Przede wszystkim zbadano wpływ współczynników modelu na zasadność stosowania podejścia GADRC, wskazano wpływ parametrów projektowych algorytmu na budowę transmitancji układu zamkniętego. Zaproponowano zasady upraszczania rzędu algorytmu przez pomijanie biegunów niedominujących. Zaimplementowano podejście adaptacyjne ADRC poprawiające jakość regulacji w warunkach niepewności parametrycznych. Zaobserwowano także poprawę zbieżności estymatora w warunkach występowania niepomiąjalnych szumów pomiarowych dzięki zastosowaniu obserwatora bazującego na filtracji Kalmana.

Słowa kluczowe: ADRC, układ stochastyczny, analiza transmitancyjna, identyfikacja parametrów, filtr Kalmana, filtr cząsteczkowy, stół balansujący kulką, wahadło reakcyjne

Jacek Michalski

Abstract

The dissertation considers an ADRC (Active Disturbance Rejection Control) algorithm, which assumes, in its basic form, to simplify the control plant into a multiple integrator. The algorithm consists of the Extended State Observer (ESO) and a control law based on the estimated state feedback. The simplification of the model is possible by decoupling its internal dynamics (or part of it) as a function of the total disturbance. A generalized version of ADRC (Generalized ADRC – GADRC) was also considered, assuming the inclusion of information about the linear part of the object (characteristic polynomial coefficients) in the control algorithm. Additionally, a generalized ADRC structure for nonlinear functions is introduced. Modifications of the algorithm have been proposed to improve the quality of estimation and control in deterministic and stochastic conditions for a certain class of mechanical plants. A transfer function description of the control algorithm and the entire closed-loop system is presented, along with determining the influence of design parameters on its operation. The generalized ADRC method has been extended with recursive parameter identification, which allows to improve the control quality under conditions of incomplete knowledge of the model and also in the case of parameter changes. Then, an algorithm was proposed that uses alternative state estimation methods (Kalman filter, particle filter) instead of the classic ESO observer. In the end, an alternative method for tuning the state observer, based on the steady-state gains of the Kalman filter, is introduced. All modifications are presented in relation to the basic and generalized ADRC approaches. The research was carried out on a second-order simulation model and on real mechatronic laboratory stands. The first one is a DC motor, the other two are nonlinear control objects – ball balancing table and reaction pendulum. As a result of the work carried out, the control quality was improved by applying the proposed ADRC modifications. First, the influence of model coefficients on the validity of using the GADRC approach was examined, and the influence of the algorithm's design parameters on the closed-loop system transfer function structure was indicated. Principles for simplifying the order of the algorithm by omitting non-dominant poles were proposed. An adaptive ADRC approach was implemented to improve the quality of control under parametric uncertainty conditions. An improvement in the convergence of the estimator was observed in the presence of non-negligible measurement noise, thanks to the use of an observer based on the Kalman filtration.

Keywords: ADRC, stochastic system, transfer function analysis, parameter identification, Kalman filter, particle filter, ball balancing table, reaction pendulum

Title: Analysis of the Impact of Model Structure and Observer Tuning in the Context of Improving the Performance of ADRC Techniques in Deterministic and Stochastic Environments

Jacek Michalski