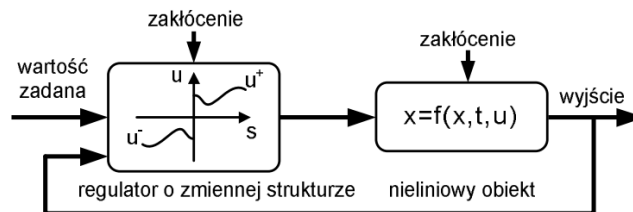


Podstawy teoretyczne sterowania ślizgowego

paź 30, 2025



Sterowanie ślizgowe należy do krzepkich metod sterowania. Technika sterowania wykorzystująca reżim ślizgowy jest szeroko stosowana do sterowania obiektów i procesów silnie nieliniowych w obecności niepewności modelu matematycznego, fluktuacji parametrów oraz zewnętrznych zakłóceń.

Jednym z obszarów zastosowań sterowania ślizgowego jest sterowanie napędem elektrycznym [37, 78, 80, 96]. Podstawy teoretyczne metody sterowania ślizgowego, która pochodzi bezpośrednio z teorii stabilności Lapunowa, zostały opracowane w latach 60 [95].

Idea działania tego typu algorytmu sterowania opiera się na zmianie struktury wewnętrznej regulatora wraz ze zmianą wartości zmiennych stanu tak, aby uzyskać żadaną odpowiedź układu. Na rys. 5.1 zaprezentowano typową strukturę układu sterowania ślizgowego.

[Read more](#)

Dla obiektu opisanego nieliniowymi równaniami różniczkowymi w n - wymiarowej przestrzeni stanu wektor wielkości sterujących u jest wybierany jako nieliniowa nieciągła funkcja zmiennych stanu:

Dla układów sterowania, opisanych równaniami różniczkowymi w ciągłej dziedzinie, technika sterowania ślizgowego zakłada nieskończenie szybkie zmiany struktury regulatora.

Zmiany te mają na celu wymuszenie ruchu trajektorii zmiennych obiektu w taki sposób, by podążały one wzdłuż wybranej powierzchni przełączeń w przestrzeni fazowej. Podstawy teoretyczne metody sterowania ślizgowego wraz z szeregiem odmian dostępnych algorytmów oraz przykładowych zastosowań zostały wyczerpująco opisane w [24, 64, 95].

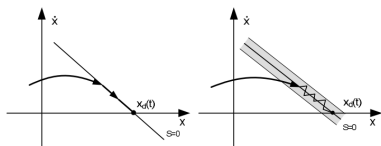
Projektowanie układów sterowania z regulatorami ślizgowymi można podzielić ogólnie na dwa etapy.

W pierwszym etapie postępowania **określa się powierzchnię przełączeń opisującą dynamikę sterowanego procesu.**

Drugi etap polega na **wyznaczeniu nieciągłego sterowania wymuszającego ruch ślizgowy zmiennej po określonej trajektorii w przestrzeni fazowej.**

Kolejne etapy wyprowadzenia równań regulatora ślizgowego przedstawiono za pomocą zapisu matematycznego w postaci ogólnej na podstawie [86].

Zadanie sterowania polega na uzyskaniu takich wartości wektora stanu układu aby podążały one za zmiennymi w czasie wartościami wektorem zadanego stanu. Ruch ten odbywa się w obecności niepewności modelu matematycznego, fluktuacji parametrów oraz zewnętrznych zakłóceń.

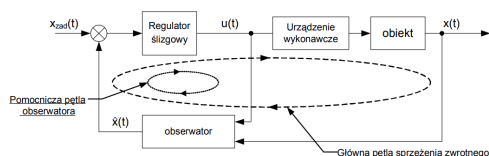


Rys. 5.3. Interpretacja ruchu ślizgowego na płaszczyźnie fazowej dla przypadku: idealnego a); rzeczywistego - zjawisko „chattering” b)

W praktycznych zastosowaniach układów regulacji opartych na technice sterowania ślizgowego nieskończenie szybkie zmiany struktury wewnętrznej regulatora nie są możliwe do realizacji układowej. Ma to istotny wpływ na uzyskiwane efekty regulacji oraz dokładność. Jest to szczególnie istotne w układach regulacji napędów elektrycznych, w których w naturalny sposób występują

nieciągłe sterowania wynikające z zastosowania techniki mikroprocesorowej oraz techniki modulacji impulsów. Zastosowanie sterowania ślizgowego z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej ogranicza szybkość zmian nieciągłych sterowań do częstotliwości impulsowania układu sterowania. Wywołuje to występowanie charakterystycznych oscylacji o małej amplitudzie i dużej częstotliwości (ang. chattering) w przebiegach wielkości sterowanych. Zjawisko to można interpretować na płaszczyźnie fazowej jako oscylacje zmiennych stanu obiektu sterowania wokół żądanej powierzchni przełączeń (rys. 5.3).

Do ograniczenia zjawiska chattering'u stosowane są różne sposoby modyfikacji algorytmu sterowania. Jedną z najbardziej popularnych modyfikacji polega na zamianie funkcji przełączającej $\text{sgn}(s)$ w prawie sterowania na inną, która umożliwia zmniejszenie wzmocnienia regulatora dla małych odchyłeń trajektorii fazowych od powierzchni ślizgowej.



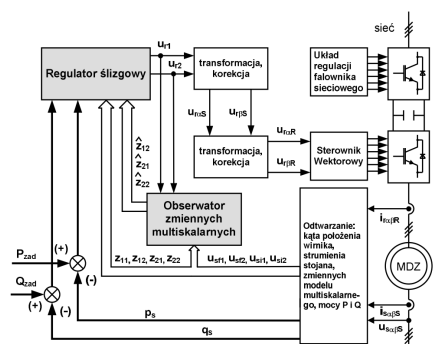
Zastosowanie techniki zbiorów rozmytych do ograniczania zjawiska „chattering'u” również ma na celu zmniejszenie wartości wzmocnienia regulatora w zależności od wartości śledzonego błędu regulacji. Zagadnienie to zostało poruszone w [72].

Zamiana funkcji przełączającej w prawie sterowania poprawia działanie algorytmu sterowania poprzez ograniczenie zjawiska szybkich przełączeń, jednakże znacznie lepsze efekty uzyskuje się przy zastosowaniu obserwatora zmiennych sterowanych. Rozwiązanie to zostało zaproponowane w pracy [14] i pozwala na znaczne większe ograniczenie niepożądanego zjawiska szybkich oscylacji.

Głównym założeniem wykorzystania obserwatora w układzie sterowania ślizgowego jest wymuszenie ruchu ślizgowego zmiennej po określonej trajektorii w pomocniczej pętli sprzężenia zwrotnego. Ponieważ realizacja tego ruchu odbywa się całkowicie w algorytmie sterowania obliczanym przez mikroprocesor, szybkość przełączeń nieciągłych sterowań jest znacznie większa od częstotliwości impulsowania przekształtnika. Inną zaletą tego rozwiązania jest brak wpływu dynamiki obiektu, która nie została uwzględniona w trakcie projektowania układu regulacji ze względu na niepewność modelu matematycznego.

W układzie z obserwatorem sygnały sterujące obliczane są w pętli pomocniczej, a następnie wysyłane do obiektu sterowanego z częstotliwością impulsowania układu regulacji. Sygnały w głównej pętli sprzężenia zwrotnego korygowane są zmianami sygnałów w pętli pomocniczej.

Ogólny schemat struktury układu regulacji z obserwatorem dynamiki zmiennych sterowanych przedstawiono na rys. 5.5



Układ sterowania maszyną dwustronnie zasilaną z regulatorem ślizgowym i obserwatorem zmiennych multiskalarnych

wyniku niskiej częstotliwości impulsowania układu regulacji w przebiegach wielkości regulowanych mogą pojawić się oscylacje o dużej częstotliwości i małej amplitudzie. W przebiegach wartości regulowanych pojawia się również stała wartość średnia. I

Inną przyczyną tego typu zjawisk jest pominięcie w procesie projektowania regulatora ślizgowego dynamiki torów pomiarowych, urządzeń wykonawczych jak również niepewności przyjętego modelu matematycznego obiektu sterowania.

Najprostszym rozwiązaniem ograniczającym niekorzystne zjawisko jest zwiększenie częstotliwości impulsowania układu regulacji. Jednakże w niektórych przypadkach jest to niekorzystne lub niemożliwe. Jednym z wielu opisywanych w literaturze rozwiązań umożliwiających ograniczenie tego zjawiska jest podejście zaproponowane w [95]. Rozwiązanie to polega na wymuszeniu ruchu ślizgowego w dodatkowej pomocniczej pętli sprzężenia zwrotnego obejmującego swoim działaniem obserwator zmiennych sterowanych.