

## STRESZCZENIE PRACY DOKTORSKIEJ

### ZASTOSOWANIE TEORII GIER RÓŻNICZKOWYCH W OPTYMALNYM STEROWANIU ADAPTACYJNYM RUCHEM MOBILNEGO ROBOTA KOŁOWEGO.

**mgr inż. Paweł Penar**

Promotor: prof. dr hab. inż. Zenon Hendzel,

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marcin Szuster, prof. PRZ

Słowa kluczowe: gra różniczkowa, sterowanie  $H_\infty$ , sieci neuronowe, mobilny robot kołowy

#### Streszczenie:

Niniejsza rozprawa dokumentuje wyniki badań dotyczących zastosowania teorii gier różniczkowych w sterowaniu układami nieliniowymi, na przykładzie mobilnego robota kołowego (MRK). Wpisuje się w rozwój innowacyjnych rozwiązań inżynierskich w obszarze badań dotyczących optymalnych rozwiązań w układach mechatronicznych, do których należą MRK.

Jej celem jest wykazanie przydatności teorii gier różniczkowych, technik uczenia ze wzmocnieniem, szczególnie rodziny technik znanych jako neuronowe programowanie dynamiczne, w optymalnym sterowaniu układami mechatronicznymi.

W pierwszej części pracy opisano nieliniowy model dynamiki oraz przytoczono klasyczną metodę badania stabilności układów nieliniowych - metodę bezpośrednią Lapunowa. Dalej opisano sieci neuronowe, problem sterowania optymalnego wynikający z zasady optymalności Bellmana, struktury aktor-krytyk, pojęcie dyssypacyjności oraz związaną z nią stabilność typu wejście-wyjście. Takie podejście do stabilności obiektu dynamicznego prowadzi do wyznaczenia sterowania typu  $H_\infty$ , które minimalizuje wzmocnienie  $L_2$  analizowanego układu tj.  $\gamma^*$  dla sygnałów o skończonej energii. Ten problem znajduje rozwiązanie w dwuosobowej grze różniczkowej o sumie zerowej. Z punktu widzenia teorii optymalizacji jest to problem typu minmax a jego rozwiązanie polega na wyznaczeniu rozwiązania równania Hamiltona-Jacobiego-Issaca.

W kolejnym rozdziale przedstawiono obiekty dynamiczne, które posłużyły do weryfikacji przyjętych założeń teoretycznych dotyczących zastosowania teorii gier różniczkowych o sumie zerowej w sterowaniu obiektem liniowym jakim jest moduł napędowy MRK i nieliniowym jakim jest MRK.

Kolejne rozdziały pracy dotyczą syntezy sterowania optymalnego z zastosowaniem teorii gier różniczkowych o sumie zerowej w odniesieniu do modułu napędowego. W tym przypadku wyznaczenie sterowania optymalnego w obecności najbardziej niekorzystnych zakłóceń sprowadza się do wyznaczenia rozwiązania równania Riccatiego.

W przypadku MRK rozwiązanie optymalne jest aproksymowane z zastosowaniem struktury aktor-krytyk. Ponadto przyjęto, że MRK realizuje zadanie nadążania oraz zadanie stabilizacji – proste zachowanie behawioralne typu jedź do celu. W celu oceny stabilności typu wejście-wyjście, w testach numerycznych sprawdzono warunek sterowania  $H_\infty$  poprzez wprowadzenie do modelu matematycznego robota zakłóceń parametrycznych rozumianych jako zmiana oporów ruchu. Wyznaczone minimalne wzmocnienie  $\gamma$  potwierdziło spełnienie warunku  $H_\infty$ , tj.  $\gamma^* \leq \gamma$ , co stanowi symulacyjne potwierdzenie stabilności typu wejście-wyjście.

Ostatnia część pracy zawiera wyniki badań weryfikacyjnych sterowania suboptymalnego w zmiennych warunkach pracy. W tej części opisano weryfikację sterowania

optymalnego modułem napędowym w obecności najbardziej niekorzystnych zakłóceń. W celu sprawdzenia warunku  $H_\infty$  do układu wprowadzono zakłócenia w postaci dodatkowego momentu oporowego. Ze względu na trudność pomiaru jego wielkości została oceniona na podstawie modelu matematycznego modułu napędowego. Na tej podstawie oceniono, że warunek  $\gamma^* \leq \gamma$  jest spełniony, co stanowi weryfikacyjne potwierdzenie stabilności typu wejście-wyjście weryfikowanego optymalnego układu sterowania. Dalsza część weryfikacji dotyczyła zadania nadążania oraz zadania jedź do celu dla MRK. Weryfikacja związana z MRK dzieli się na dwie części. Pierwsza dotyczy sterowania z zastosowaniem gry różniczkowej o sumie zerowej, w której realizowano procedurę adaptacji wag krytyka aproksymując rozwiązanie równania HJI. Druga wynika z potrzeby sprawdzenia warunku sterowania  $H_\infty$ . W tym przypadku na MRK działają zakłócenia wynikające ze zmiany podłoża, po którym robot przemieszcza się. Ich wartości są trudno mierzalne, dlatego do sprawdzenia warunku  $H_\infty$  zastosowano oszacowanie wynikające z różnicy sterowań dla ruchu MRK z i bez zakłóceń. Na tej podstawie oszacowano warunek sterowania typu  $H_\infty$ ,  $\gamma^* \leq \gamma$ , co pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących stabilności typu wejście-wyjście oraz odporności projektowanego układu na zmienne warunki pracy.

Uzyskane rozwiązania są poszerzeniem problematyki sterowania optymalnego z punktu widzenia syntezy układu sterowania typu wejście – wyjście z uwzględnieniem osłabienia wpływu zmiennych warunków pracy i innych zakłóceń na założony ruch MRK. Ponadto uzyskano potwierdzenie poprawności przyjętych rozwiązań analitycznych i symulacyjnych w badaniach eksperymentalnych, potwierdzając tym samym postawioną w pracy tezę.