

Autoreferat rozprawy doktorskiej

PROBLEMY OPTYMALIZACJI UKŁADÓW NAPĘDOWYCH W  
AUTOMATYCE I ROBOTYCE

**mgr inż. Marek Długosz**

**Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Mitkowski**

Kraków 2009

W rozprawie doktorskiej autor rozważał różne typy sterowań zastosowane do układów napędowych jakim są silniki prądu stałego. Opisano i przedstawiono sposób modelowania tego typu napędów elektrycznych. Zamieszczono modele liniowe i nieliniowe silników prądu stałego. Opisane modele były także testowane na dwóch stanowiskach laboratoryjnych. Do sterowania silnikami prądu stałego zostały wykorzystane klasyczne regulatory takie jak: PID, LQR, *deadbeat*. W rozprawie zawarto opis sposobów odtwarzania niemierzalnych wartości zmiennych stanu przy pomocy obserwatorów. Autor zaproponował także sposób odtwarzania niemierzalnych wartości zmiennych stanu przy pomocy dwóch obserwatorów. W pracy zaprezentowano wykorzystanie komputerów w układach sterowania. W komputerach takich zaimplementowano i przetestowano złożone struktury sterowania. Symulacje komputerowe były następnie sprawdzane na dwóch stanowiskach laboratoryjnych.

### **Cel i zakres pracy**

Celem pracy były badania i praktyczne zastosowanie różnych typów układów regulacji do układów napędowych automatyki jakimi są silniki prądu stałego. W rozprawie zaprezentowano opis najczęściej wykorzystywanych modeli matematycznych silników prądu stałego. Do sterowania silnikiem prądu stałego wykorzystano klasyczne regulatory. W rozprawie zamieszczono także opis i symulacje sterowania silnikiem z wirnikiem kulistym przy pomocy regulatora PD i szeregowy silnik prądu stałego sterowanego przy pomocy regulatora LQR. Kolejnym problemem rozważanym w rozprawie było wykorzystanie komputerów w układach sterowania silnikami prądu stałego. Wykorzystując komputer do sterowania opracowane bardziej złożone struktury sterowania. Wyniki symulacyjne były następnie testowane na dwóch różnych stanowiskach laboratoryjnych.

## Modele matematyczne silników prądu stałego

Chcąc efektywnie kontrolować jakikolwiek obiekt należy poznać jego zasadę działania. Modele matematyczne są właśnie jednym ze sposobów poznania jak działa określony obiekt. Przy stosowaniu modelu matematycznego należy zawsze pamiętać, że model taki tylko przybliża nam działanie rzeczywistego obiektu. Jeśli jednak to przybliżenie jest na tyle dobre to możemy uznać, że dany model opisuje pewien obiekt rzeczywisty i na podstawie takiego modelu poszukiwać np. regulatorów, obserwatorów, itp. W tej części pracy zaprezentowano opisy najczęściej wykorzystywanych modeli silników prądu stałego. Modele matematyczne zostały sformułowane przy wprowadzeniu pewnych założeń upraszczających: założono niezmiennosc parametrów fizycznych w czasie i przestrzeni takich jak rezystancja, indukcyjność, brak strat strumienia wzbudzenia magnetycznego w szczelinie, liniowa zależność strumienia wzbudzenia od prądu wzbudzenia. Podstawowy model matematyczny silnika prądu stałego, na podstawie którego wyprowadza się modele matematyczne dla konkretnych typów silników ma postać:

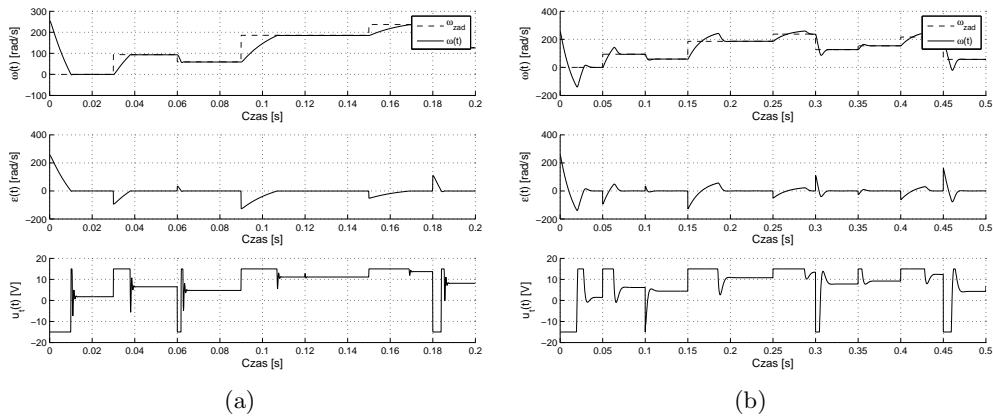
$$\begin{aligned}L_t \frac{di_t(t)}{dt} &= u_t(t) - R_t i_t(t) - c_E \phi_w(t) \omega(t) \\ \frac{d\phi_w(t)}{dt} &= -R_w f^{-1}(\phi_w) + u_w(t) \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} &= c_M \phi_w(t) i_t(t) - B_v \omega(t) - M_Z\end{aligned}\tag{1}$$

gdzie  $c_E$ ,  $c_M$  stałe,  $\phi_w(t)$  strumień magnetyczny obwodu wzbudzenia (zakładamy, że w szczelinie powietrznej nie ma strat). Na podstawie tych równań, przyjmując odpowiednie założenia upraszczające otrzymuje się modele dla silnika obcowzbudnego, bocznikowego i szeregowego.

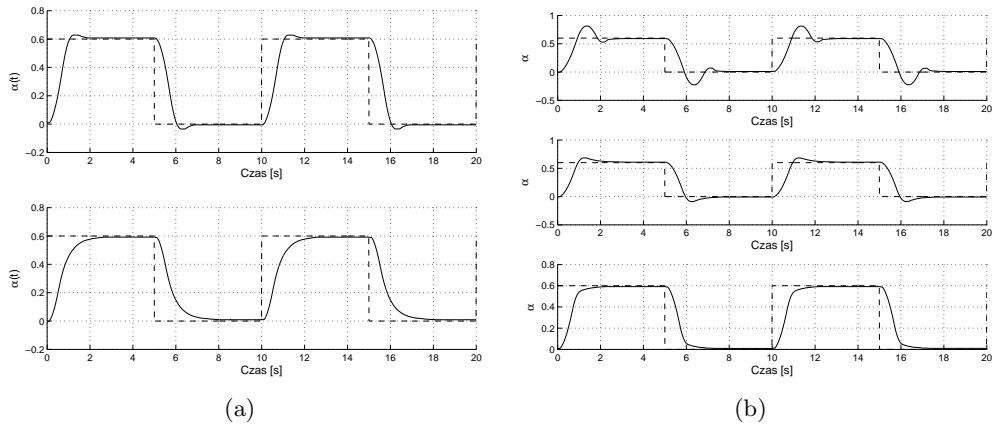
Modele silników o specjalnych konstrukcjach np. silnik z wirnikiem kulistym wymagają odrębnego podejścia. Ze względu na charakter konstrukcji takich silników, zachodzących w nim zjawisk fizycznych dla każdego takiego silnika opracowuje się model indywidualnie. Silniki z wirnikiem kulistym są w dalszym ciągu konstrukcjami laboratoryjnymi. Modele matematyczne takich typów silników mają postać silnie nieliniowych równań różniczkowych. Sterowanie takimi silnikami jest dużo bardziej złożone. Pomimo trudności występujących przy modelowaniu i sterowaniu takimi silnikami w dalszym ciągu prowadzone są prace badawcze, ponieważ potencjalne korzyści jakie może przynieść zastosowanie tego typu napędu są bardzo duże.

## Sterowanie silnikami

Wielkościami wyjściowymi, którymi steruje się w silnikach prądu stałego są prędkość obrotowa lub położenie kątowe wału silnika. W rozprawie przedstawiono klasyczne regulatory takie jak: PID, LQR, *deadbeat*. Zamieszczono opis numerycznego sposobu dobierania parametrów regulatora PID. Szerzej opisano algorytm sterowania LQR. Algorytm ten bardzo często pojawia się w zagadnieniu optymalizacji układów sterowania. W rozprawie zamieszczono opis sposobu, w jaki można przeformułować zadanie doboru parametrów regulatora PID do zadania wyznaczenia pewnego regulatora LQR lub *deadbeat*. Oprócz klasycznych regulatorów do sterowania wykorzystano komputery w których można implementować dużo bardziej złożone algorytmy i struktury sterowania. Na stanowisku laboratoryjnym do badania serwo mechanizmu prądu stałego praktycznie przetestowano sterowanie takim serwo mechanizmem przy wykorzystaniu dwóch regulatorów: LQR i *deadbeat*, które są włączane w odpowiednich momentach. Dobranie prawidłowych chwil w których następuje przełączanie regulatorów jest zadaniem kluczowym. Przełączanie regulatorów w nieodpowiednich momentach może w efekcie spowodować znacznie gorszą pracę całego układu.

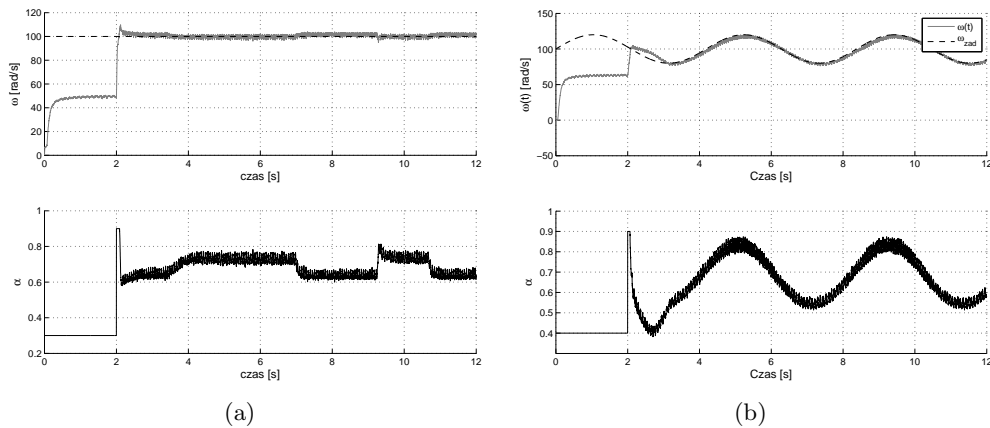


Rysunek 1: Działanie regulatora PID którego parametry wyznaczono w oparciu o regulator 1(a) LQR i 1(b) *deadbeat*. Wykres górny – prędkość obrotowa zadana  $\omega_z(t)$  (linia przerywana) i prędkość obrotowa silnika  $\omega(t)$  (linia ciągła), wykres środkowy – błąd  $\epsilon(t)$ , wykres dolny – napięcie sterujące  $u(t)$



Rysunek 2: Położenie katowe serwomechanizmu prądu stałego przy sterowaniu regulatorem LQR 2(a) i przy sterowaniu dwoma regulatorami 2(b) LQR i *deadbeat*.

W rozprawie zamieszczono wyniki praktycznych eksperymentów sterowania silnikiem prądu stałego o mocy 11 kW. Ze względu na swoje wymiary, a w konsekwencji znaczne wartości prądu potrzebne do sterowania takim silnikiem stanowisko laboratoryjne umożliwiała sterowanie takim silnikiem w układzie PWM. Do sterowania użyto komputera w raz z specjalizowaną kartą kontrolno-pomiarową. Zadanie sterowania polegało na stabilizacji prędkości obrotowej. Komputer realizował algorytm sterowania LQR stabilizacji prędkości obrotowej przy zmiennym momencie obciążenia. Do prawidłowego działania regulatora LQR konieczne było dodanie obserwatora zewnętrznego momentu obciążenia silnika. Dodatkowo w komputerze sterującym dodano układ bezpiecznego rozruchu takiego silnika.

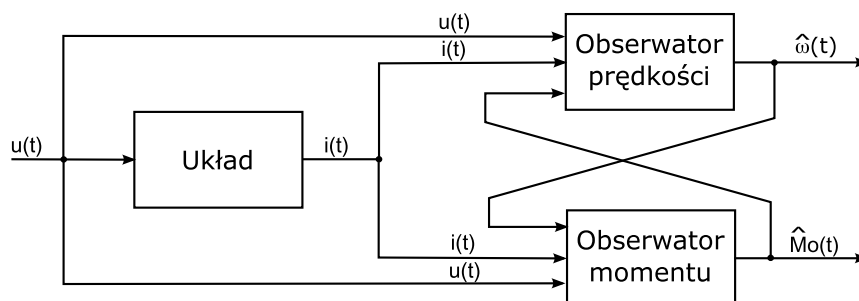


Rysunek 3: Działanie regulatora LQR. Wykres 3(a) stabilizacja prędkości obrotowej silnika przy zmiennym momencie obciążenia, wykres 3(b) nadążanie prędkości obrotowej za zadaną wartością.

## Odtwarzanie wielkości niemierzalnych

Niektóre z regulatorów do poprawnej pracy wymagają znajomości wartości wszystkich zmiennych stanu. Znając wszystkie wartości zmiennych stanu regulator jest w stanie wygenerować poprawne sterowanie, które realizuje założony cel sterowania. Nie zawsze jednak jest możliwy pomiar wartości wszystkich zmiennych stanu. Przyczyny tego mogą być różne np. może być to bardzo kosztowne, problemy z fizyczną realizacją takich pomiarów. W takim przypadku do obiektu który ma być sterowany regulatorem od stanu dodaje się urządzenia zwane obserwatorami.

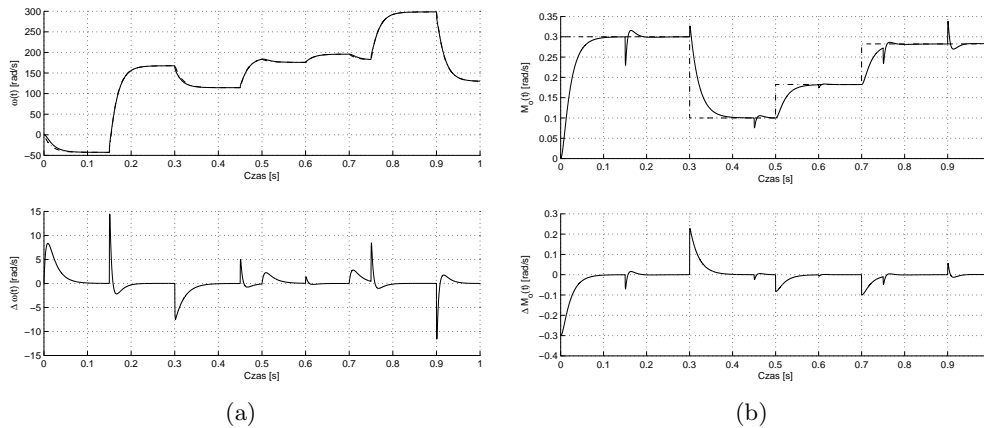
Jednym z bardziej popularnych obserwatorów jest obserwator Luenbergera. W rozprawie zamieszczony opis takiego typu obserwatora wraz z sposobem wyznaczania jego parametrów dla silników prądu stałego. Zmienną stanu która była mierzona jest prąd w obwodzie twornika  $i_t(t)$ . Na podstawie tego pomiaru przy pomocy obserwatorów starano się odtworzyć prędkość obrotową  $\omega(t)$  oraz moment obciążenia  $M_o(t)$ . Wielkości te były odtwarzane przy wykorzystaniu obserwatora zredukowanego i pełnego rzędu. Obserwator pełnego rzędu odtwarza cały wektor stanu  $\mathbf{x}(t)$ , ale także zwiększa dwukrotnie rząd całego układu co nie jest korzystne. Obserwator zredukowany odtwarza tylko “brakujące” składowe wektora stanu, nie zwiększając aż dwukrotnie rzędu całego układu, ale dobór parametrów takiego obserwatora jest znacznie trudniejszy.



Rysunek 4: Odtwarzanie prędkości obrotowej  $\omega(t)$  i momentu obciążenia  $M_o(t)$  przy wykorzystaniu dwóch zredukowanych obserwatorów

W rozprawie zaprezentowano nowy sposób odtwarzania prędkości obrotowej  $\omega(t)$  oraz mo-

ment obciążenia  $M_o(t)$  silnika. Polega on na wykorzystaniu dwóch zredukowanych obserwatorów Luenbergera. Każdy z nich odtwarza stan tylko jednej wielkości nieznannej. Ponieważ do prawidłowego odtwarzania prędkości  $\omega(t)$  potrzebna jest znajomość wartości momentu obciążenia  $M_o(t)$ , a do prawidłowego odtwarzania wartości  $M_o(t)$  potrzebna jest znajomość wartości prędkości obrotowej  $\omega(t)$  obydwie obserwatory na wzajem korzystają z odtworzonych przez siebie sygnałów.



Rysunek 5: Odtwarzanie prędkości obrotowej i momentu obciążenia przy pomocy dwóch obserwatorów zredukowanych. Wykresy 5(a) odtwarzanie prędkości obrotowej, wykresy 5(b) odtwarzanie momentu obciążenia. Linia przerywaną zaznaczono rzeczywiste wartości prędkości obrotowej i momentu obciążenia.

## Podsumowanie

W pracy podjęto tematykę optymalizacji układów napędowych z silnikami prądu stałego. Praca stanowi efekt pracy badawczej autora. Część rezultatów zawartych w pracy były publikowane przez autora, zob. np. (Baranowski et al., 2008), (Długosz i Baranowski, 2008) i przedstawiane na konferencjach, zob. np. (Długosz, 2003), (Długosz, 2006), (Długosz i Mitkowski, 2006), (Długosz i Mitkowski, 2007) (Długosz i Mitkowski, 2008), (Długosz, 2008).

Jako najważniejsze i oryginalne osiągnięcia, zdaniem autora, można zaliczyć:

- Pełny przegląd stosowanych modeli matematycznych stosowanych do opisu działania silników prądu stałego. Przedstawiono modele nieliniowe, liniowe, podano możliwe uproszczenia modeli jakie można zastosować.
- Przegląd, opis i symulacje komputerowe wybranego modelu silnika z wirnikiem kulistym.
- Weryfikację wyników teoretycznych poprzez obliczenia i symulacje komputerowe, które zostały wykonane w programie MATLAB/Simulink .
- Odtwarzanie zmiennych niemierzalnych przy wykorzystaniu obserwatorów pełnego rzędu i zredukowanych. Optymalny dobór parametrów obserwatorów, przeformułowanie problemu doboru parametrów obserwatora do problemu wyznaczania regulatora LQR. Zaproponowano sposób w jaki można wykorzystać obserwatory zredukowane do odtwarzania wartości zmiennych niemierzalnych z wzajemnym wykorzystaniem wartości odtworzonych przez te obserwatory.
- Przeformułowanie zadania doboru parametrów regulatora PID do zadania wyznaczania parametrów regulatora *deadbeat*.

- Sterowanie serwomechanizmem przy użyciu komputera w którym zaimplementowano dwa różne regulatory.
- Sterowanie nadążne silnikiem przy pomocy regulatorów stabilizujących. Użycie komputerów do sterowania umożliwia zastosowanie typowych algorytmów stabilizujących do sterowania nadążnego.

## Literatura

- Baranowski, J., Długosz, M. i Mitkowski, W. (2008), ‘Remarks about dc motor control’, *Archives of Control Sciences* **18**(3), 289–322.
- Długosz, M. (2003), Budowa i zastosowanie silników liniowych, *in* ‘W Materiały V Międzynarodowych Warsztatów Doktoranckich OWD’, Vol. 5, Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, pp. 278–282.
- Długosz, M. (2006), Stabilizacja systemów dynamicznych przy pomocy regulatorów suboptymalnych, *in* ‘W Materiały VIII Międzynarodowych Warsztatów Doktoranckich OWD’, Vol. 22, Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, pp. 357–361.
- Długosz, M. (2008), Time optimal control of dc motor, *in* ‘W Materiały X Międzynarodowych Warsztatów Doktoranckich OWD’, Vol. 25, Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, pp. 281–286.
- Długosz, M. i Baranowski, J. (2008), Sterowanie czasooptymalne silnikiem obcowzbudnym prądu stałego, *in* ‘Problemy Współczesnej Nauki. Sterowanie i Automatyzacja’, pp. 87–96.
- Długosz, M. i Mitkowski, W. (2006), Komputerowe sterowanie minimalno-energetyczne, *in* ‘IC – SPETO 2006 : XXIX Międzynarodowa Konferencja z Podstaw elektrotechniki i teorii obwodów’, pp. 365–368.
- Długosz, M. i Mitkowski, W. (2007), Stabilisation of dc motor using lq and deadbeat controllers, *in* ‘IC – SPETO 2007 : XXX Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów’, pp. 157–158.
- Długosz, M. i Mitkowski, W. (2008), Adaptive lqr controller for angular velocity stabilisation in series dc motor, *in* ‘IC – SPETO 2008 : XXXI międzynarodowa konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów’, pp. 7–8.