

Badanie kaskadowego układu regulacji na przykładzie serwomechanizmu

1. WSTĘP

Serwomechanizmy są to przeważnie układy regulacji położenia. Są trzy główne typy zadań serwomechanizmów:

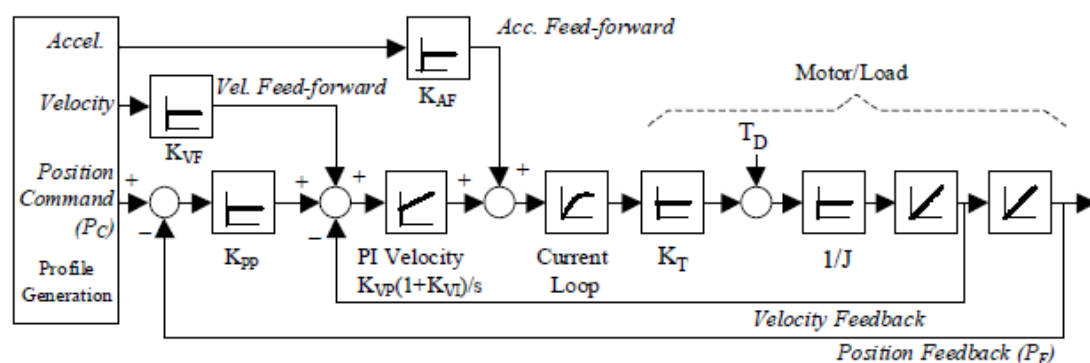
- ruch point-to-point,
- śledzenie trajektorii (kształtu),
- regulacja prędkości.

Głównym celem w sterowaniu point-to-point jest wykonanie ruchu zadanego jak najszybciej i przeważnie bez przeregulowania. W aplikacjach śledzenia trajektorii, szczególnie w aplikacjach wieloosiowych ważne jest aby człon wykonawczy był blisko trajektorii zadanej na całej długości. W aplikacjach z regulacją prędkości, położenie często nie jest kontrolowane a ruch odbywa się ze stałą prędkością. W aplikacjach takich najważniejsze jest zminimalizowanie wpływu zakłóceń. Dwa pierwsze zadania: point-to-point i śledzenie trajektorii wymagają sterowania położeniem.

Jest kilka topologii układu sterowania serwomechanizmami opartych na regulatorach P, PI lub PID. Trzy główne topologie to:

1. Nadrzędna pętla regulacji położenia z regulatorem P z podporządkowanym układem regulacji prędkości z regulatorem PI, (P/PI) (rys.1)
2. Nadrzędna pętla regulacji położenia z regulatorem PI z podporządkowanym układem regulacji prędkości z regulatorem P, (PI/P)
3. Pętla regulacji położenia typu PID, (PID)

Dwie pierwsze topologie to układy regulacji o strukturze kaskadowej.



Rys.1 Regulator położenia typu P a regulator prędkości PI [1]

Układ regulacji z rysunku 1 o strukturze kaskadowej złożony jest z dwóch pętli: zewnętrznej pętli regulacji położenia i wewnętrznej pętli regulacji prędkości. W rzeczywistych serwomechanizmach układ regulacji składa się z połączonych kaskadowo trzech regulatorów: położenia, prędkości i prądu. W serwomechanizmach przemysłowych regulator prądu jest dobierany fabrycznie przez producenta i nie jest dostępny dla użytkownika. Pętla regulacji prądu jest nastawiana w taki sposób aby szybko i z minimalnym przeregulowaniem śledzić prąd zadany. Obwód regulacji prądu, w torze wartość zadana prądu – prąd, można zastąpić obiektem inercyjnym pierwszego rzędu o stałej czasowej małej w stosunku do pozostałych stałych czasowych obiektu („current loop” na rysunkach). Należy pamiętać, że w układach przemysłowych wartości zadane prędkości i prądu są ograniczona ze względu na dopuszczalną prędkość, przyspieszenie i prąd silnika. Wobec tego w regulatorze prędkości typu PI konieczne jest zastosowanie techniki tzw. anti wind up.

W przemysłowych serwomechanizmach dedykowanych do śledzenia trajektorii stosowane są dodatkowe sprzężenia w przód z generatora trajektorii. W bloku tym zaprogramowana jest zadana trajektoria położenia oraz na jej podstawie zadane trajektorie dla prędkości i przyspieszenia. Na rysunku 1 reprezentowane są przez dwa sprzężenia w przód o wzmocnieniach K_{AF} , K_{VF} . W wersji układu sterowania z rysunku 1 pętla regulacji prędkości PI jest objęta pętlą regulacji położenia typu P. Wartość zadania dla regulatora prędkości jest sumą błędu położenia pomnożoną przez K_{pp} i sygnału sprzężenia w przód (feed-forward) - sygnału wartości zadanej

prędkości (* K_{VF}) z generatora trajektorii. Wartość zadana prądu jest sumą sygnału wyjściowego z regulatora prędkości i sygnału wartości zadanej momentu z generatora trajektorii (* K_{AF}).

Transmitancja układu w torze położenie/ wartość zadana wszystkich trzech topologiach są podobne z wielomianem trzeciego rzędu w liczniku i mianowniku. Poniżej pokazano transmitancję dla topologii z rys. 1. Można się spodziewać, że przy odpowiednim doborze regulatorów (na np. ten sam zapas stabilności) właściwości trzech struktur będą podobne.

P/PI:

$$\frac{P_F(s)}{P_C(s)} = \frac{K_{AF}s^3 + K_{VP}K_{VF}s^2 + K_{VP}(K_{VI}K_{VF} + K_{PP})s + K_{VP}K_{VI}K_{PP}}{\frac{J}{K_T}s^3 + K_{VP}s^2 + K_{VP}(K_{VI} + K_{PP})s + K_{VP}K_{VI}K_{PP}}$$

Reakcja na zakłócenie

W serwomechanizmach głównym zakłóceniem jest zmiana momentu obciążenia (T_D). Odpowiedź układu na zakłócenie określa się przez odchyłkę położenia spowodowaną zmianą momentu obciążenia. Poniżej pokazano transmitancję zakłócenia układu P/PI:

$$\frac{P_F(s)}{T_D(s)} = \frac{s^3 / K_T}{\frac{J}{K_T}s^3 + K_{VP}s^2 + K_{VP}(K_{VI} + K_{PP})s + K_{VP}K_{VI}K_{PP}}$$

Celem zadania jest zamodelowanie, zbadanie właściwości i ocena zadanej topologii układu regulacji serwomechanizmu. Oceny dokonuje się na podstawie: odpowiedzi na wartość zadaną, odpowiedzi na zakłócenie, charakterystyk Bode i oceny stabilności. Badania prowadzone są w oparciu o transmitancję obiektu i badania symulacyjne.

Strojenie regulatorów

Ocena przedstawionych wyżej struktur wymaga odpowiedniej, logicznej procedury strojenia regulatorów. Poniżej pokazano przykładową zasady strojenia regulatorów:

1. Najpierw ustala się pasmo przenoszenia,
2. Wzmocnienie jest ograniczone przez np. okres próbkowania czy opóźnienie pętli regulacji prądu.
3. Pasma przenoszenia powinno być ustawione na ok. 200Hz w pętli regulacji prędkości. Jest to wartość właściwa dla współczesnych, wysokiej jakości serwonapędów, które nie mają rezonansów mechanicznych.
4. Pozostałe wzmocnienia są ustawiane na poziomie poniżej tego, przy którym w odpowiedzi na wymuszenie skokowe pojawia się przeregulowanie.

Przy takiej metodzie strojenia, wzmocnienie proporcjonalne regulatora ma dominujący wpływ na pasmo przenoszenia pętli. Strojenie zaczyna się od wzmocnienia w pętli o najszerszym paśmie przenoszenia (wewnętrznej); pozostałe wzmocnienia są zerowane. Po ustawieniu tego wzmocnienia, wzmocnienie w kolejnej wolniejszej pętli jest ustawiane a następnie kolejne w pętli najwolniejszej. W każdym przypadku pętla jest poddawana wymuszeniu i wzmocnienie jest zwiększane do granicy stabilności a następnie zmniejszane. Przykładowy algorytm pokazany w załączniku 1. Można skorzystać z narzędzi programowych pakietu Matlab/Simulink.

Przy strojeniu najszybszej pętli (pętli regulacji prędkości) ważne jest aby wartość zadana była prostokątna. Pobudza to szeroki zakres częstotliwości i ułatwia znalezienie granicy stabilności. Pętle wolniejsze (położenia) nie wymagają pobudzenia prostokątnego. Praktyka jest taka, że pętla regulacji prędkości jest pobudzana sygnałem prostokątnym a pętla regulacji położenia mniej agresywnym sygnałem jak np.: trapezoida. Wyjątkiem jest strojenie części różniczkowej regulatora PID w pętli położeniowej, gdzie stosowany powinien być sygnał prostokątny (wysoka częstotliwość).

Należy unikać nasycenia regulatora prądu w trakcie całego procesu strojenia.

Strojenie P/PI

W trakcie strojenia struktury P/PI najpierw zablokuj pętlę położeniową i zastosuj prostokątne wymuszenie dla pętli prędkościowej. Zwiększaj wzmocnienie proporcjonalne K_{VP} , które odpowiada za pasmo przenoszenia do

najwyższej wartości, która nie generuje przeregulowania. Następnie ustaw część całkującą K_{VI} na ok. 5% przeregulowanie. Należy pamiętać aby amplituda wymuszenia dla pętli prędkościowej była niewielka, aby uniknąć nasycenia regulatora prądu. Teraz odblokuj pętlę położeniową i zastosuj najbardziej agresywny ruch jaki będzie wykonywany w aplikacji (trapezoidalny). Sprzężenie feed-forward wyzeruj i ustaw wzmocnienie proporcjonalne K_{PP} trochę poniżej poziomu gdy występuje przeregulowanie w prędkości.

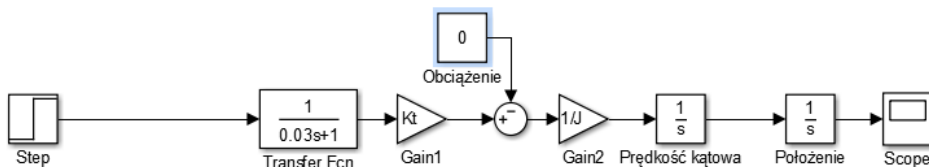
Wzmocnienia feed-forward przekazują kształt trajektorii zadanej przed pętlę. Wzmocnienia te są strojone na końcu. Sprzężenia feed-forward nie powodują niestabilności bo są poza pętlą regulacji. Tym niemniej duże wartości wzmocnień mogą powodować duże przeregulowania. W układach sterowania ruchem sprzężenie od prędkości K_{VF} jest powszechne. Powinno być ustawione na 50% albo 80% aby przyspieszyć odpowiedź a jednocześnie K_{PP} musi być zmniejszone aby skompensować powstałe przeregulowanie.

Przeważnie stosuje się sprzężenie w przód od prędkości K_{VF} i przyspieszenia (K_{AF}) jednocześnie. Przeregulowanie spowodowane sprzężeniem od prędkości może być wyeliminowane przez sprzężenie od przyspieszenia. Stosując oba sprzężenia można uzyskać dobrą dynamikę bez zmniejszania K_{PP} .

Powyższe wskazówki dotyczące sposobu dobru nastaw są ogólne i mogą być istotne różnice w zależności od aplikacji. Na przykład wzmocnienie całkujące K_{VI} jest ustawiane na małej wartości aby ograniczyć przeregulowanie. Głównym negatywnym skutkiem jest słaba reakcja układu na zakłócenie. W aplikacjach gdzie ważna jest szybka kompensacja zakłócenia wartość wzmocnienia całkującego może być większa. I odwrotnie, wzmocnienie całkujące może być wyzerowane w aplikacji, gdzie musi być szybka i bez przeregulowań odpowiedź na bardzo agresywne wymuszenie.

2. OPIS OBIEKTU

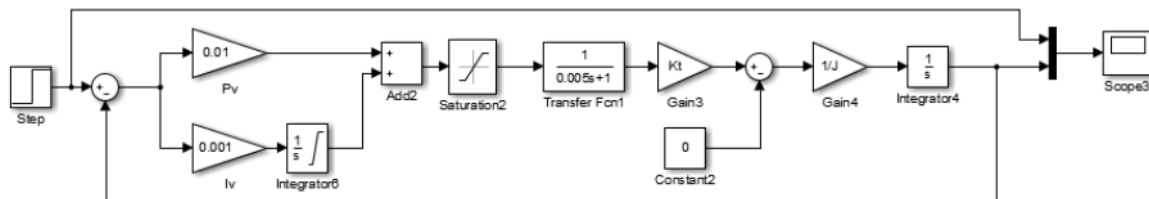
Na rys.1 przedstawiona jest ogólna struktura badanego obiektu i układu regulacji w wersji P/PI. Obiektem sterowania jest silnik elektryczny wraz z układem regulacji prądu (rys.2).



Rys. 2. Schemat modelu silnika prądu stałego

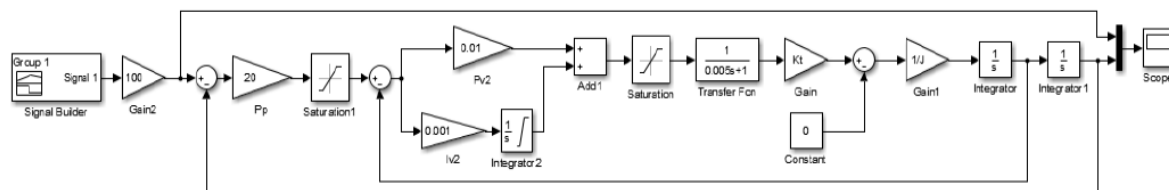
Sygnałem wejściowym do modelu silnika jest wartość zadana prądu a wyjściowym położenie wału maszyny. Pomimo że współczesne serwomechanizmy są sterowane cyfrowo, to w modelu pominięto efekt próbkowania, między innymi dlatego, że jest bardzo krótki (często ok. 100 μ s) i jego wpływ na dynamikę serwomechanizmu jest pomijalny. W rezultacie transmitancja obiektu sterowania to połączone szeregowo: człon inercyjny reprezentujący dynamikę obwodu regulacji prądu, dwa człony całkujące oraz dwa wzmocnienia K_T [Nm/A] i $1/J$ [1/kgm²] reprezentujące stałą mechaniczną maszyny oraz odwrotność momentu bezwładności. Parametry modelu należy ustalić odpowiednio do zadanego typu silnika (karta katalogowa).

Na rysunku 3 pokazano strukturę układu regulacji prędkości. Wartość zadana prądu jest ograniczona i w regulatorze prędkości typu PI konieczne jest zastosowanie techniki tzw. anty wind-up.



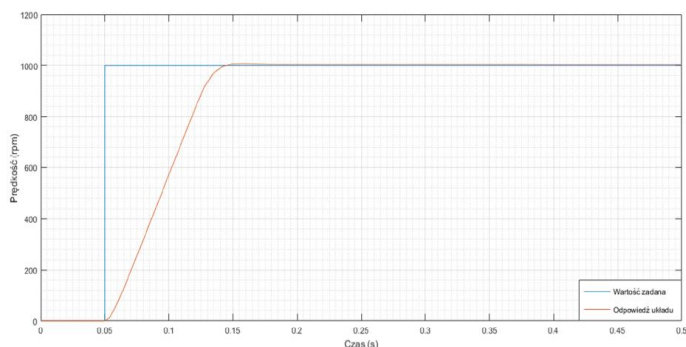
Rys. 3. Struktura układu regulacji prędkości

Na rysunku 4 pokazano strukturę kaskadowego układu regulacji położenia. wartość zadane prędkości ze względu na dopuszczalną prędkość.

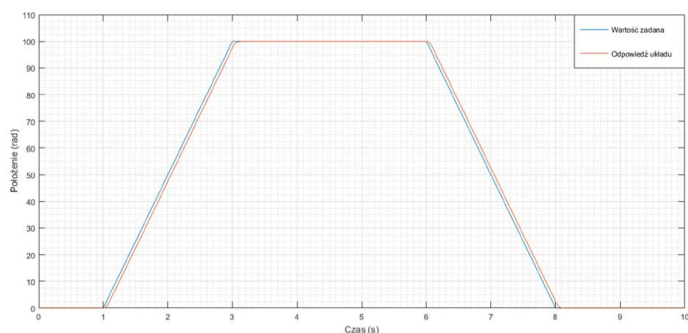


Rys. 4. Struktura układu regulacji położenia serwomechanizmu

Na rysunkach 5, 6 pokazano przykładowe odpowiedzi obu układów regulacji. Należy zwrócić uwagę że w stanie przejściowym zarówno układ regulacji prędkości pracuje na ograniczeniu prądu (stałe przyspieszenie) jak i układ regulacji położenia pracuje na ograniczeniu prędkości (stała prędkość).



Rys. 5. Odpowiedź układu regulacji prędkości na skok o dużej wartości



Rys. 5. Odpowiedź układu regulacji położenia na sygnał trapezoidalny.

3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

1. Zaimplementować zadaną strukturę układu regulacji.
2. Dla zadanych wartości parametrów silnika napędowego i zadanej struktury układu regulacji dobrać nastawy regulatorów zgodnie z procedurą:
 - dobrać nastawy regulatora prędkości (pokazać efekt strojenia i charakterystykę Bodego dla zamkniętego układu regulacji prędkości) na podstawie odpowiedzi na wymuszenie prostokątne o małej amplitudzie (np.:50 rpm),
 - dobrać nastawy regulatora położenia.
 Należy parametry katalogowe sprowadzić do podstawowego układu jednostek SI.
3. zbadać właściwości zaprojektowanego układu: odpowiedź na trapezoidalne i sinusoidalne położenie zadane, odpowiedź na zakłócenie, charakterystykę Bodego, zapas stabilności.
4. Skoryguj nastawy tak aby uzyskać szybką reakcję na zakłócenie (skok obciążenia). Pokaż właściwości tego układu.

Uwaga:

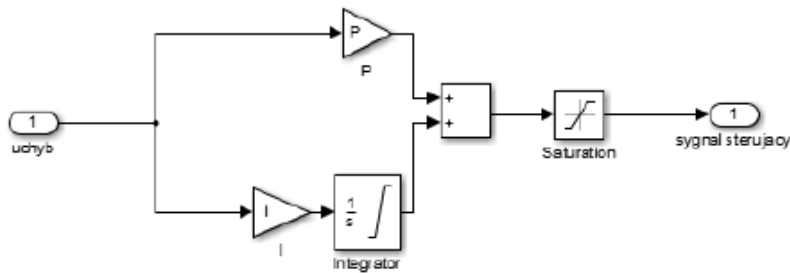
Należy ustawić ograniczenia na prędkość i prąd na wyjściu regulatorów położenia i prędkości. Regulatory typu PI muszą mieć zaimplementowany „anty wind-up”.

4. BIBLIGRAFIA

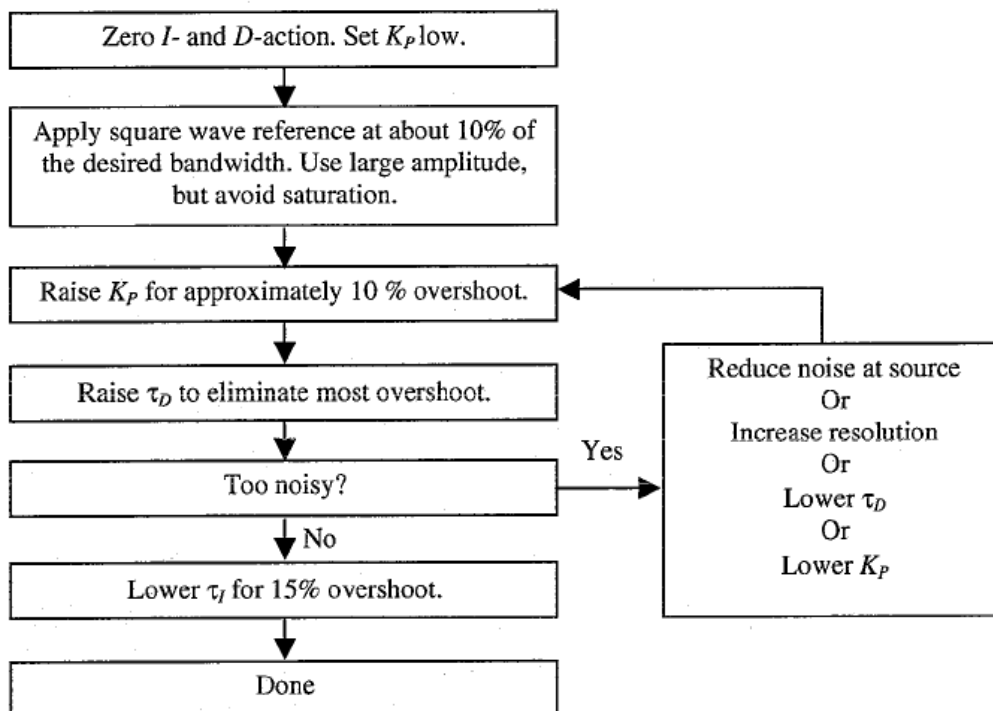
[1] Ellis G.: Comparison of position control for industrial Applications, Danaher Motion, 2002,

[2] Materiały dydaktyczne na stronie KANE

Załącznik 1. Regulator PI



Załącznik 2. Dobór nastaw regulatora PID metodą prób i błędów:



Załącznik 3. Charakterystyki Bode dla układu otwartego i zamkniętego

