



07.05.2022 r.

Systemy Sterowania i Wspomagania Decyzji

Projekt 1. „Synteza nadążnego, kaskadowego układu sterowania kątem pionowego nachylenia czaszy radaru, przy uwzględnieniu obecności sił tarcia oraz szumów pomiarowych”

Autorzy:

Tomasz Downar-Zapolski S176112

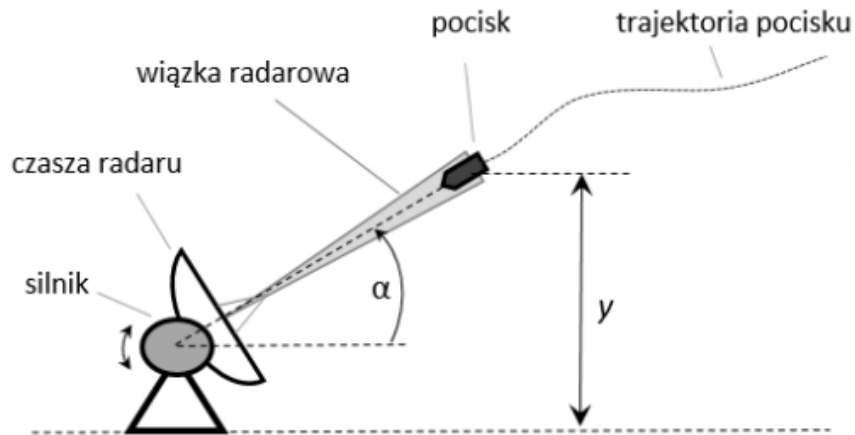
Dominik Bongowski S176145

Cel ćwiczenia:

Celem projektu jest synteza nadążnego kaskadowego układu sterowania kątem pionowym nachylenia czaszy radaru, wchodzącej w skład systemu przeciwrakietowego okrętu wojennego. Specyfika obiektu sterowania wymaga uwzględnienia w układzie sterowania obecności sił tarcia, zakłóceń szybkozmiennych związanych z pomiarami z żyroskopów oraz wolno zmiennymi związanymi z falowaniem wynikającym z warunków pracy na morzu.

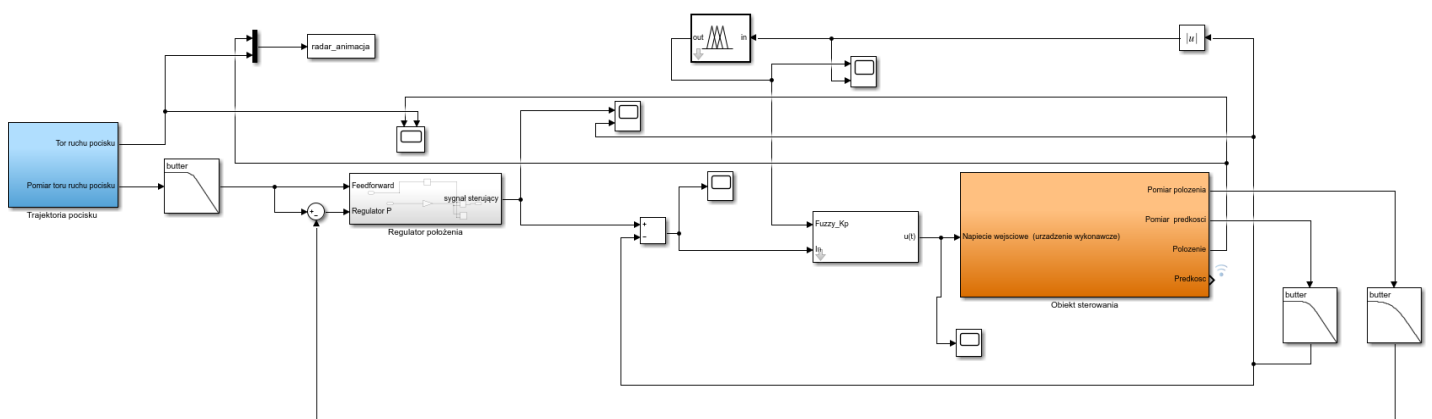
Wstęp:

Rozpatrywanym obiektem sterowania jest czasza radaru, której zadaniem jest śledzenie pocisku w celu dostarczenia informacji o jego odległości od czaszy, ta informacja wykorzystywana jest przez system antyrakietowy, który określa położenie pocisku względem statku.



Rys. 1. Radar śledzący nadlatujący obiekt

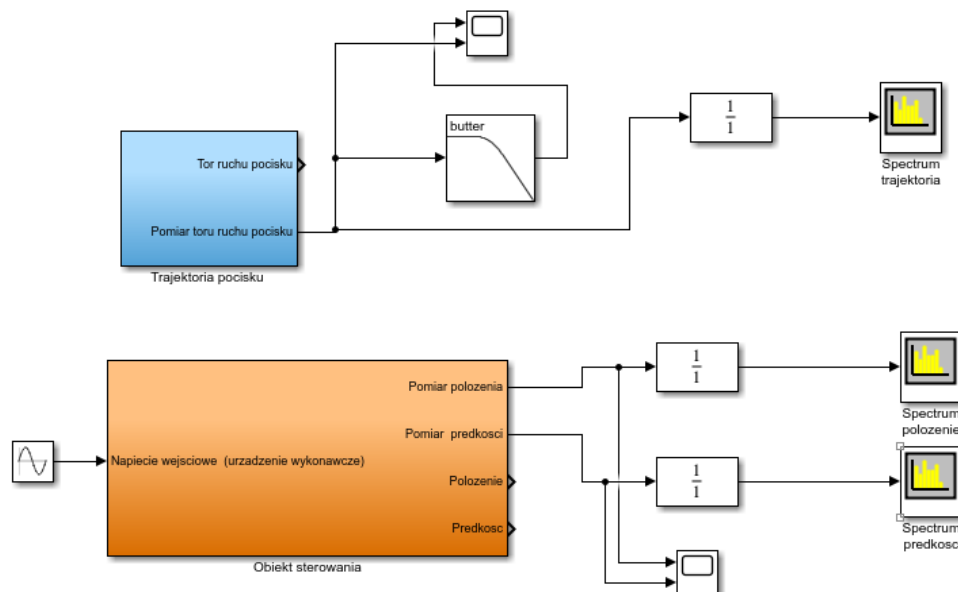
W celu jego sterowania wykorzystano kaskadową strukturę sterowania z wewnętrzną pętlą odpowiadającą za sterowanie prędkości czaszy, oraz zewnętrzną realizującą nadążanie za położeniem pocisku.



Rys. 2. Schemat sterowania zaprojektowany w programie matlab simulink

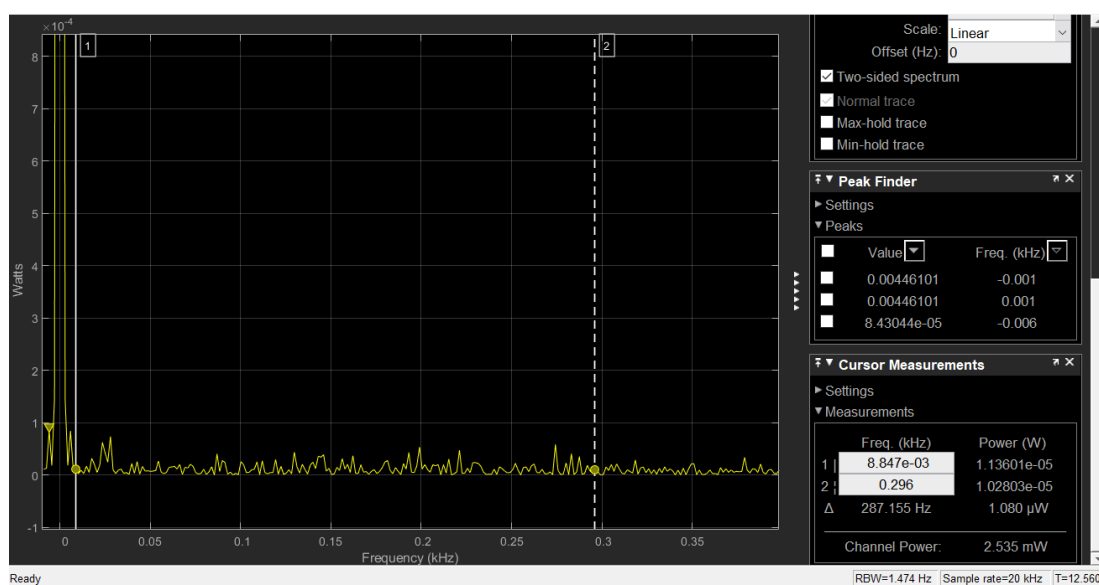
Dobór filtrów:

Pierwszą napotkaną problematyką zrealizowania sterowania jest wysoki poziom stochastycznych zakłóceń szybkozmiennych w wielkościach pomiarowych, ich przyczyną jest częste korzystanie z pomiarów wykonanych za pomocą żyroskopu, które charakteryzują się wysokim poziomem tych właśnie zakłóceń. Z uwagi na wysokie zaszumienie sygnałów zdecydowano się za zaprojektowanie filtrów dolnoprzepustowych. W tym celu dokonano analizy widmowej mocy sygnałów, przy której posłużono się modelem symulacyjnym przedstawionym na Rysunku 3. W celu oddzielenia sygnału użytecznego od szumu na wejście modelu zadano przebieg sinusoidalny o częstotliwości 1 Hz. Czas symulacji ustawiono na całkowitą wielokrotność sygnałów użytecznych.



Rys. 3. Układ wyznaczający analizę widmową mocy sygnałów

Przy wykorzystaniu powyższego schematu otrzymano następujący rozkład mocy odpowiadający poszczególnym częstotliwościom w badanym sygnale.



Rys. 4. Rozkład mocy na poszczególne składowe częstotliwościowe w badanym sygnale

Na podstawie Powyższego wykresu zdecydowano się na zastosowanie dolnoprzepustowego filtra Butterwortha od 1 do 3 rzędu z częstotliwością graniczną wynoszącą 8 Hz. Następnie operując już na modelu symulacyjnym dostosowaliśmy parametry filtrów na podstawie analizy przebiegów sygnałów przed i po filtracji, w celu znalezienia kompromisu między jakością sygnału a dynamiką układu.

Projekt pętli wewnętrznej:

Następnie przystąpiliśmy do projektu wewnętrznej pętli sterowania. Przy jej projektowaniu konieczne było uwzględnienie realistycznego modelu tarcia zakładającego wyższe tarcie dla niższych prędkości. Sterowanie ze zmiennymi właściwościami modelu zależnymi od jego stanu wymagało zastosowania regulatora rozmytego z logiką Mamdaniego dostosowywując nastawy regulatora do stanu obiektu, będącego prędkością ruchu czaszy. W pierwszej kolejności oszacowano wartości tarcia przy niskich i wysokich prędkościach zadając na wyizolowany bloczek odpowiadający za wprowadzenie tarcia, wymuszenia o wartościach 0,05 (odpowiadający niskim prędkościom) oraz 7 (odpowiadający wysokim prędkościom) wyznaczając jego wzmocnienie. Wykonano analityczne obliczenia modelu obiektu w przestrzeni stanu z uwzględnieniem regulatora PI dla niskich prędkości. Tok obliczeń przedstawiono na Rysunku 5.

$$G_0(s) = \frac{0,914}{s + 17,15} = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

$$s Y(s) + 17,15 Y(s) = 0,914 U(s)$$

$$\dot{y}(t) + 17,15 y(t) = 0,914 u(t)$$

Model ss obiektu

zmienne stanu: $x_1 = y$

rownanie stanu: $\dot{x}_1 = -17,15 x_1 + 0,914 u$

Regulator PI:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

$$x_i = \int e(t) dt$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i x_i$$

$$\dot{x}_1 = -17,15 x_1 + 0,914 (K_p e(t) + K_i x_i)$$

$e(t)$ jest wejściem układu więc $e(t) = u_n$

$$\dot{x}_1 = -17,15 x_1 + 0,914 K_p u_n + 0,914 K_i x_i$$

$$\dot{x}_i = \frac{d}{dt} \left(\int e(t) dt \right) = e(t) = u_n$$

$$y = x_1$$

$$A = \begin{bmatrix} -17,15 & 0,914 K_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,914 K_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 0] \quad D = 0$$

Rys. 5. Analityczne obliczenia modelu obiektu

Następnie obliczone wartości zweryfikowano w programie MatLab i zaimplementowano możliwość modyfikacji parametru tarcia.

```
Kt = 0.18; %współczynnik tarcia dla 0.05 speed
%Kt = 0.000143; %współczynnik tarcia dla 7 speed

sys1 = tf( 1 , [9.64e-6+1/2*2.1*0.1^2 0.0257^2/2.675]);
sys2 = tf(Kt);
sys3=feedback(sys1,sys2);
sys4=tf(0.0257/2.675);
sys5=series(sys4,sys3)
```

Rys. 6. Kod odpowiadający za syntezę obiektu sterowania w programie matlab

Z tak utworzonego obiektu wyznaczyliśmy wzmacnienia regulatora PI dla niskich oraz wysokich prędkości wykorzystując metodę LQR.

```
21 - sys=ss(Aroz,Broz,Croz,Droz)
22 - Q=[1 0;0 10];
23 - R=[0.002];
24
25 % [K, S, e]=lqr(sys,Q,R)
26 - K=lqr(Aroz,Broz,Q,R)
```

Command Window

```
sys =

    A =

        x1    x2
    x1 -17.15  0.9142
    x2      0      0

    B =

        u1
    x1  0.9142
    x2      1

    C =

        x1  x2
    y1   1   0

    D =

        u1
    y1   0

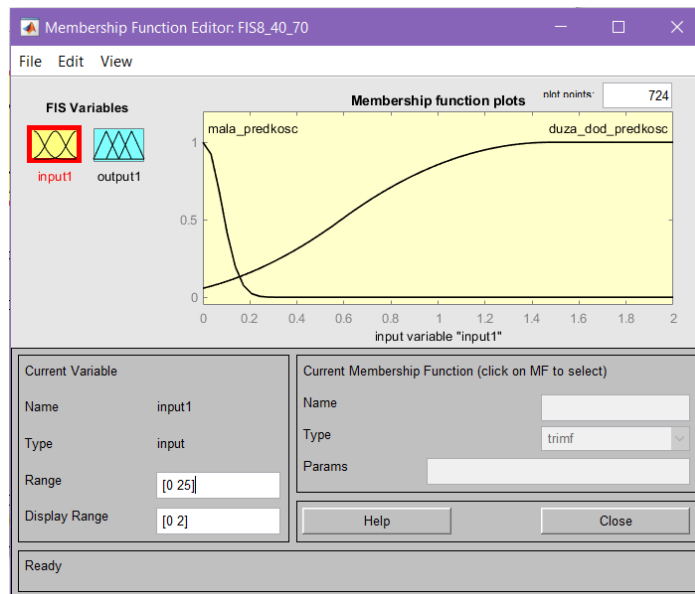
Continuous-time state-space model.

K =

    2.7163    70.5759
```

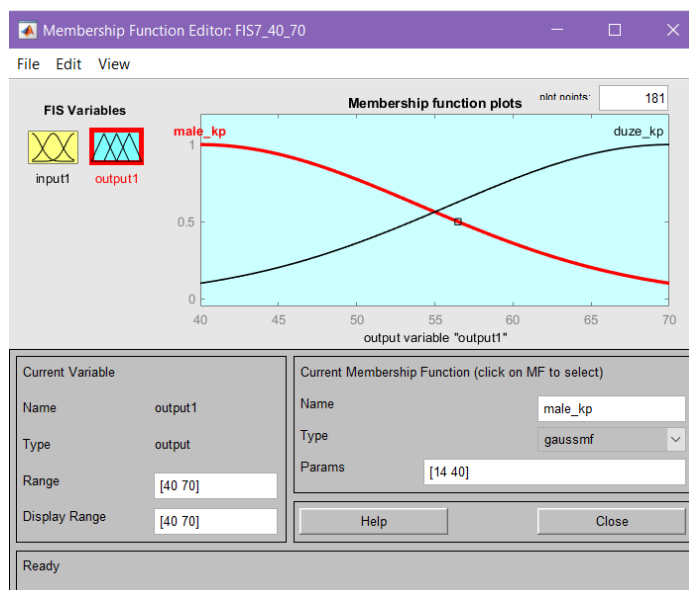
Rys. 7. Wynik obliczeń nastaw regulatora PI metodą LQR dla małych prędkości.

Następnie wykonano funkcję przynależności dla regulatora rozmytego za pomocą nakładki Fuzzy Logic Designer. Miejsce przecięcia “małej prędkości” i “dużej prędkości” ustawiono na wartości około 0.1. Przedstawiono to na Rysunku 8.



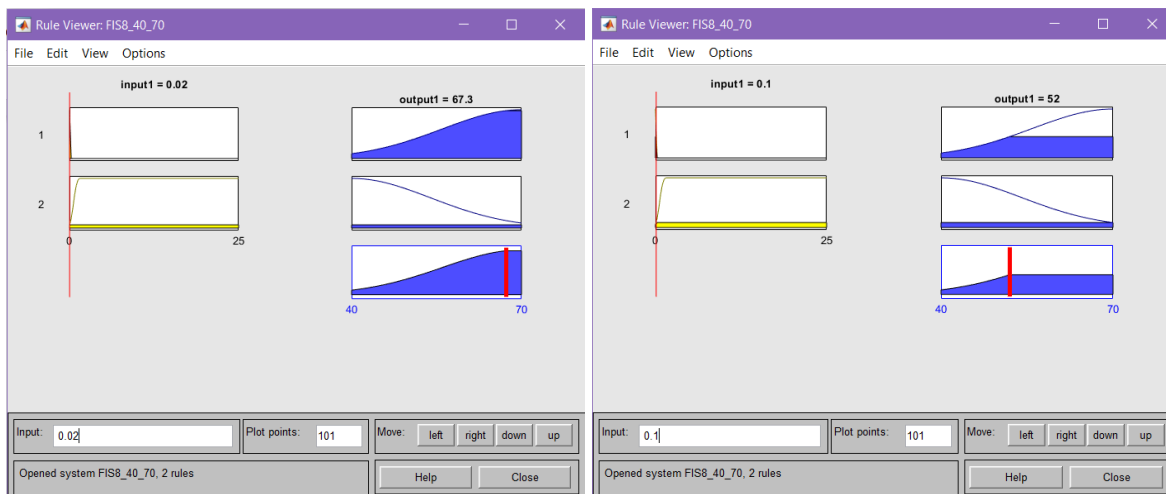
Rys. 8. Funkcja przynależności wejścia do regulatora rozmytego.

Wyjście z regulatora zrealizowano za pomocą funkcji przedstawionej na Rysunku 9.



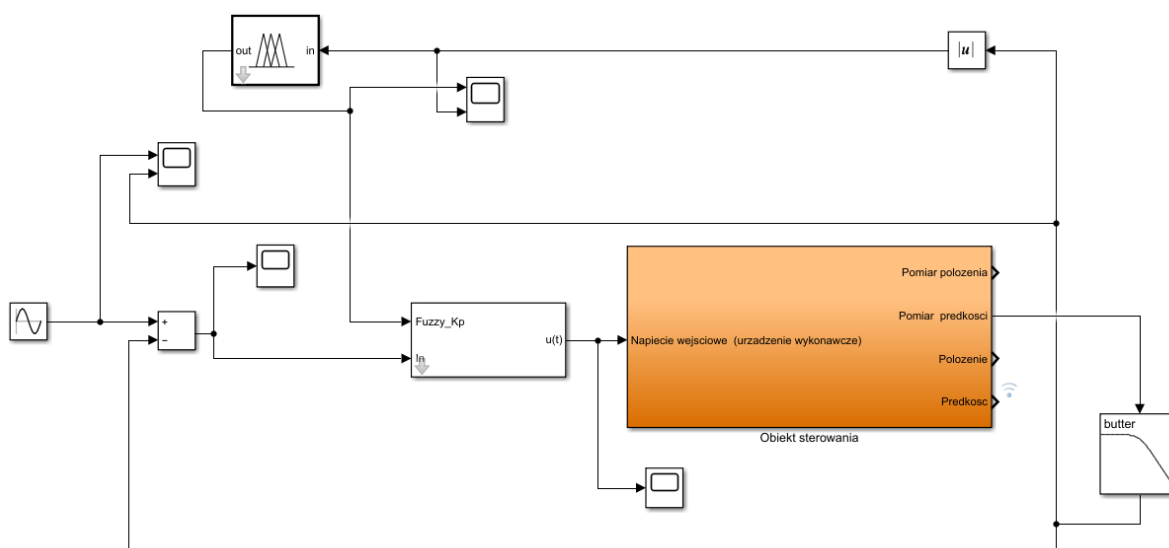
Rys. 9. Funkcja przynależności wyjścia z regulatora rozmytego.

W efekcie otrzymano sterowanie wzmocnieniem członu proporcjonalnego w zależności od prędkości przedstawione na Rysunku 10.

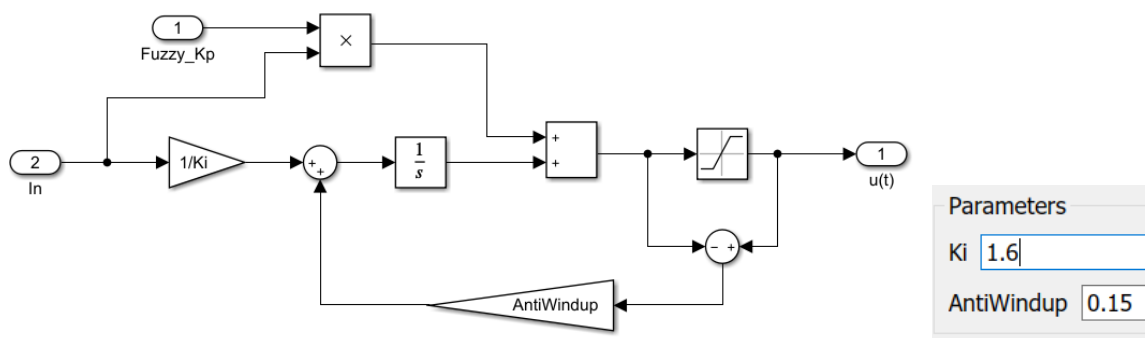


Rys. 10. Zależność wejścia do wyjścia regulatora rozmytego.

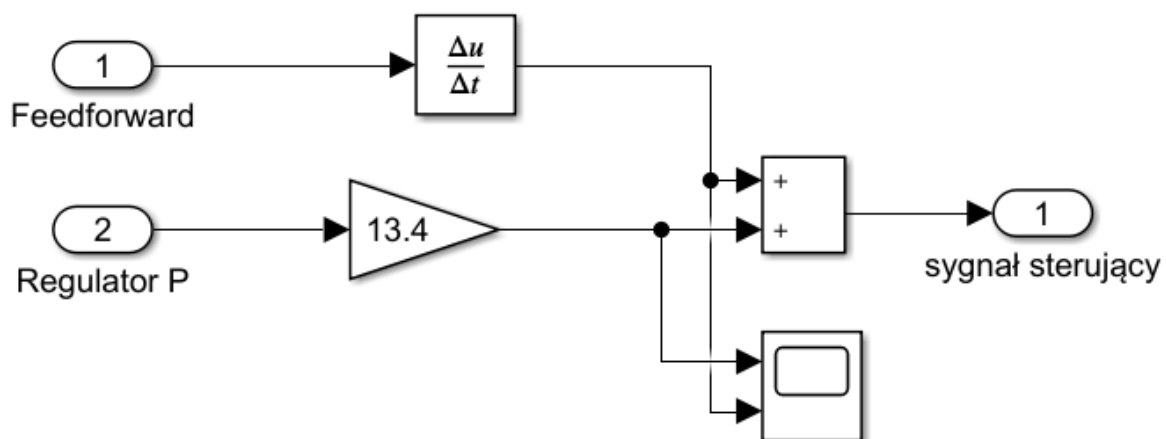
Następnie wykonano model symulacyjny pętli wewnętrznej w której zaimplementowano opracowany regulator rozmyty i przetestowano jego pracę. Schemat modelu przedstawiono na Rysunku 11-13.



Rys. 11. Model symulacyjny pętli wewnętrznej.

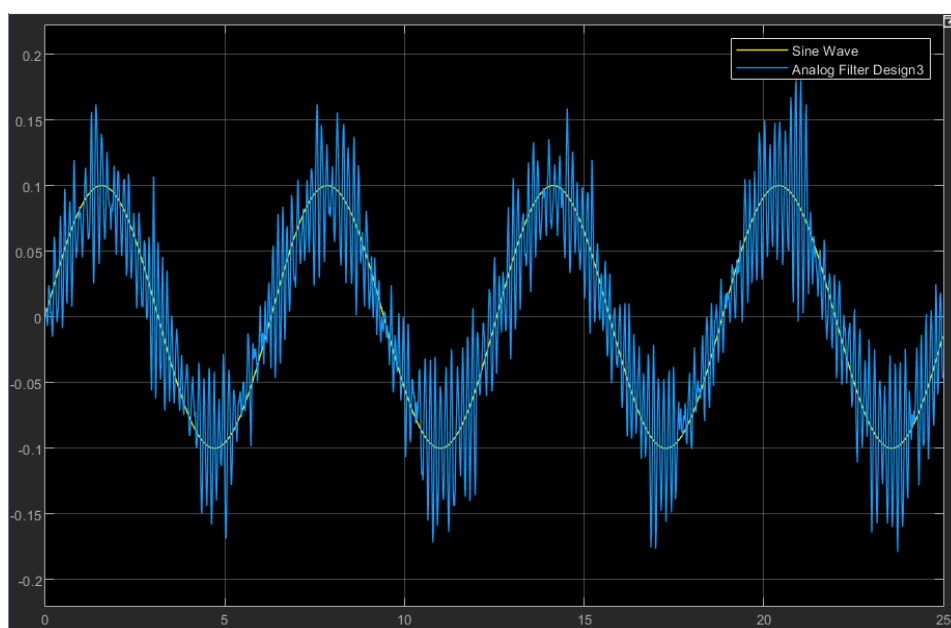


Rys. 12. Budowa wewnętrznej pętli sterowania z wykorzystaniem logiki Mamdaniego oraz filtru anti windup.

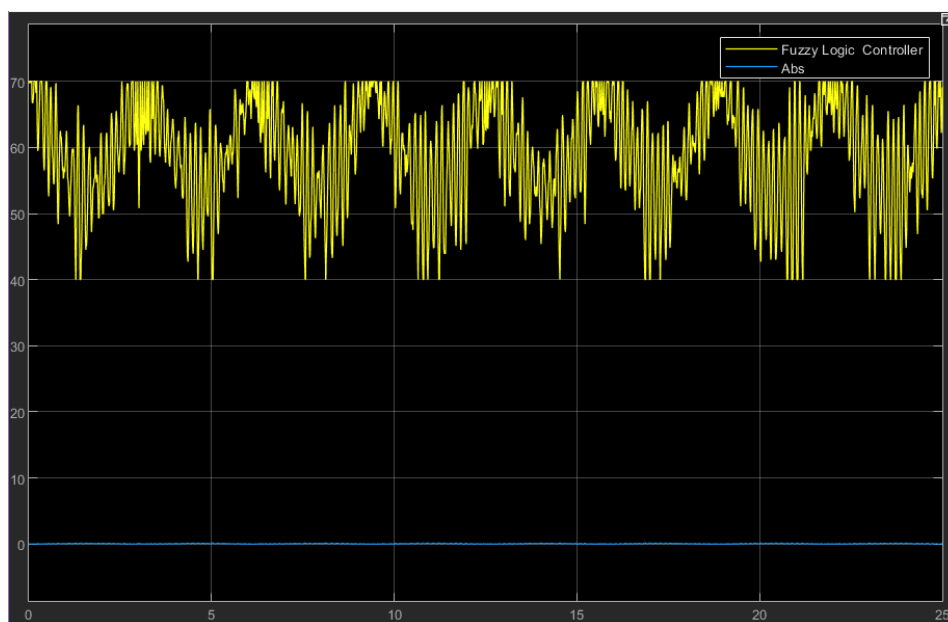


Rys. 13. Budowa zewnętrznej pętli sterowania feed-forward.

Wejście do pętli pobudzone było sygnałem sinusoidalnym o różnych amplitudach aby sprawdzić poprawność działania algorytmu sterowania. Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono wyniki symulacji dla niskich prędkości (amplituda 0.1).



Rys. 14. Sygnał sterujący i sygnał wyjściowy na jednym wykresie.



Rys. 15. Sygnał wejściowy i wyjściowy regulatora rozmytego.

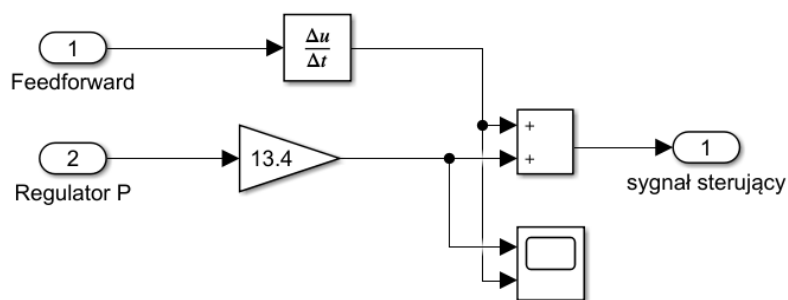
Projekt pętli zewnętrznej:

W pętli zewnętrznej zaimplementowano regulator proporcjonalny, a także sprzężenie w przód (feed-forward). Wykonano obliczenia analityczne transmitancji obiektu w celu zapoznania się z wpływem zmian wzmocnienia proporcjonalnego na obiekt. Do obliczeń przyjęto, że pętlę wewnętrzną reprezentuje obiekt całkujący ($1/s$).

$$\begin{aligned}
 G_{ob}(s) &= \frac{1}{s} & G_P(s) &= K_P \\
 G_{ot}(s) &= \frac{K_P}{s} \\
 G_{sum}(s) &= \frac{G_{ot}}{1 + G_{ot}} = \frac{\frac{K_P}{s}}{1 + \frac{K_P}{s}} = \frac{K_P}{K_P + s}
 \end{aligned}$$

Rys. 16. Obliczenia transmitancji pętli zewnętrznej

Na tej podstawie, a także korzystając z modelu symulacyjnego przedstawionego na Rysunku 2 dobrano eksperymentalnie nastawy regulatora pętli zewnętrznej. Wzmocnienie członu proporcjonalnego ustawiono na 13.4.



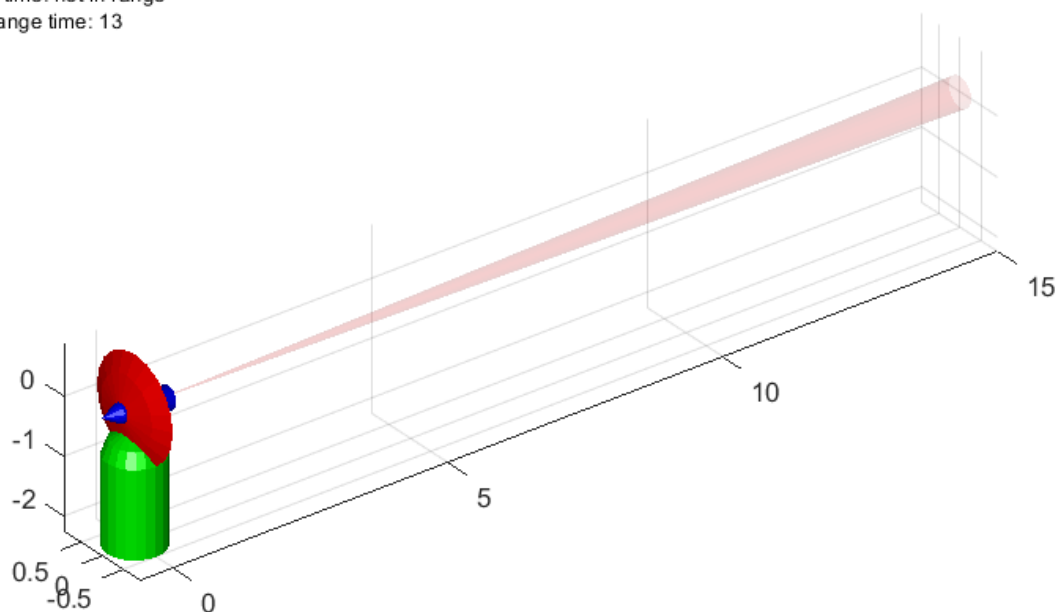
Rys. 17. Model symulacyjny regulatora położenia.

Korzystając z pełnego modelu dostrojono również nastawy regulatora prędkości i modele filtrów, tak aby osiągnąć jak najlepszy efekt sterowania.

Prezentacja i omówienie wyników:

W wyniku działania symulacji udało się uzyskać 13 sekund ciągłego śledzenia pocisku. Przedstawiono to na Rysunku 18.

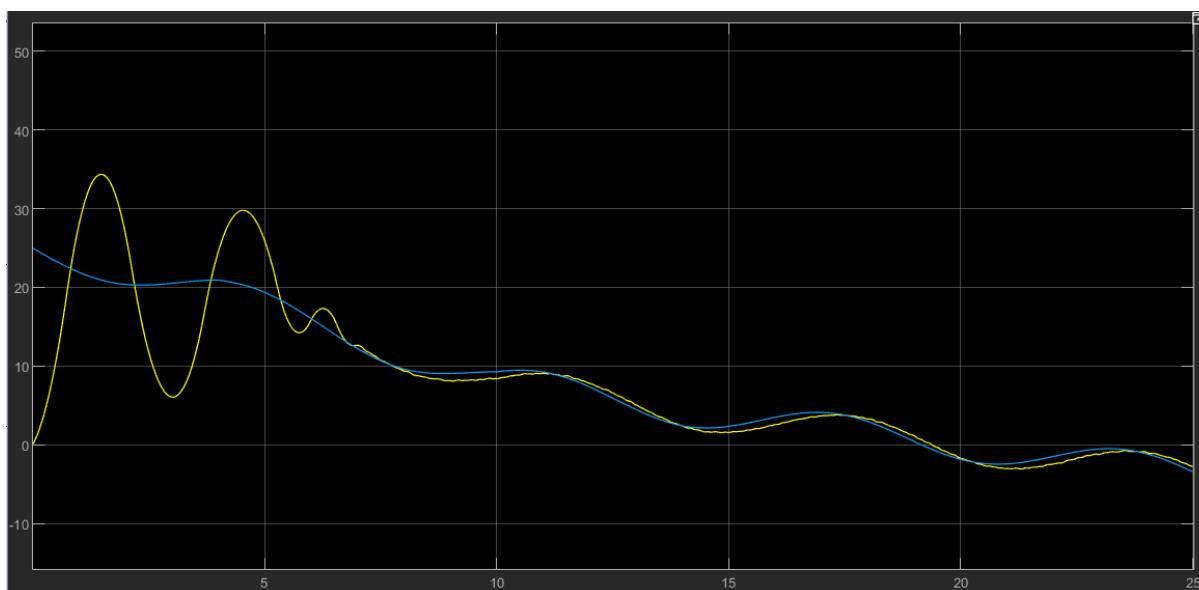
Simulation time: 25.0
In range time: not in range
Max in range time: 13



Copyright © 2011 Grzegorz Ewald, Wojciech Kurek

Rys. 18. Animacja śledzenia czaszy radaru.

Śledzenie staje się skuteczne po około 7 sekundach i radar utrzymuje pocisk w zakresie swojego sygnału do momentu aż stożek wiązki radarowej staje się zbyt wąski względem uchybu, czyli w 20 sekundzie czasu trwania symulacji. Przebieg sygnału referencyjnego i położenia czaszy radaru przedstawiono na Rysunku 19.



Rys. 19. Przebieg sygnału referencyjnego i położenia czaszy radaru.

Jak widać na Rysunku 19 na czas w którym wiązka radarowa zaczyna śledzić obiekt wpływa w głównej mierze spore przeregulowanie wynikające z wysokiej wartości nastawy regulatora prędkości. Jest to jednak kompromis pomiędzy dokładnością śledzenia a czasem ustalania się układu. Zbyt niskie wartości wzmocnienia członu proporcjonalnego skutkowałyby gubieniem śledzonego pocisku. Istotny wpływ na śledzenie ma również położenie początkowe czaszy, gdzie w przypadku wcześniejszego nakierowania na obiekt zanim pojawi się on w zasięgu sygnału umożliwiłoby wydłużenie czasu śledzenia o kolejne 7 sekund. Przeregulowania można jednak ograniczać wykorzystując filtr przeciwnasyceniowy (anti-windup) jednak wpływa on znacząco na dynamikę obiektu i jakość śledzenia. A więc i wpływ działania całkującego pętli wewnętrznej został dobrany drogą kompromisu pomiędzy przeregulowaniami początkowymi a dłuższym czasem śledzenia w końcowych chwilach symulacji.

Wnioski:

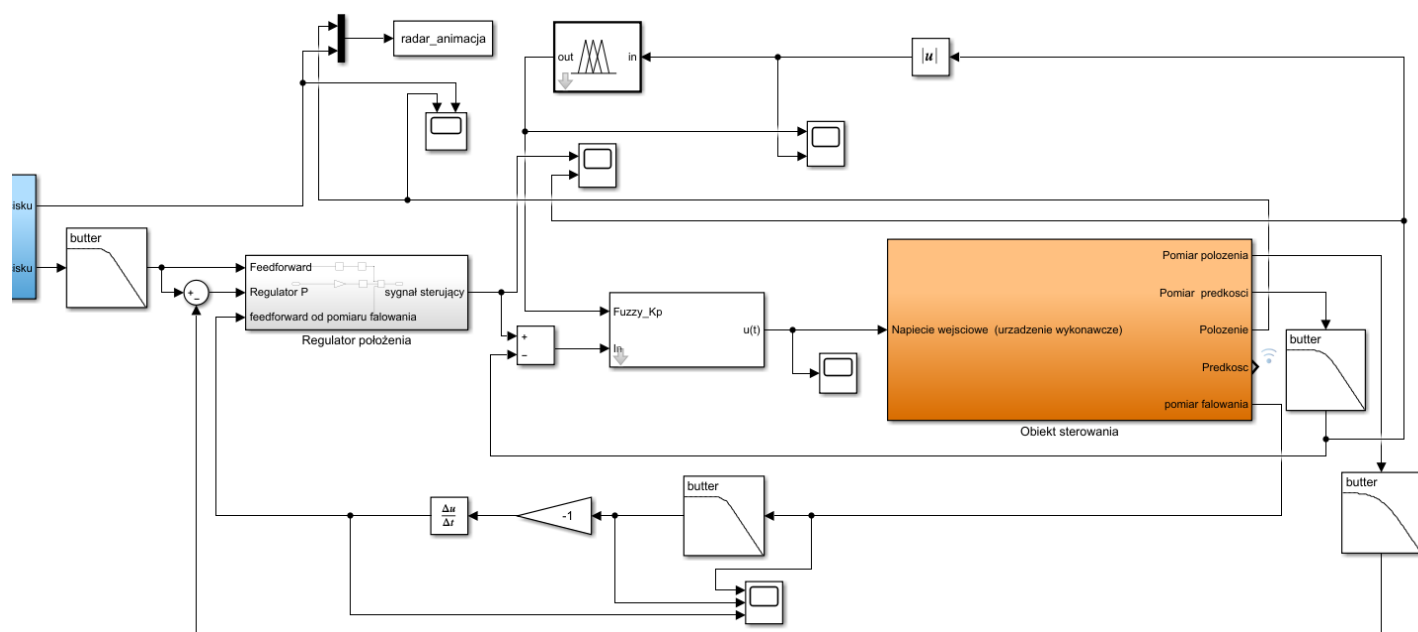
Sterowanie z wykorzystaniem logiki rozmytej Mamdaniego pozwoliło na zadowalającą regulację nastawami w środowisku nieliniowym, gdzie dynamika obiektu jest silnie zależna od prędkości. Wykorzystanie takiego regulatora do obiektów nieliniowych znacząco ułatwia implementację układu regulacji bez konieczności linearyzacji.

Duże szumy pomiarowe wymagają filtracji sygnałów pomiarowych, poziom filtracji jest jednak odwrotnie proporcjonalny do użyteczności sygnału, ponieważ przy wysokim rzędzie filtr, sygnał traci swoją oryginalną dynamikę, co wymusza zastosowanie pewnego kompromisu między poziomem filtracji a dynamiką sygnału.

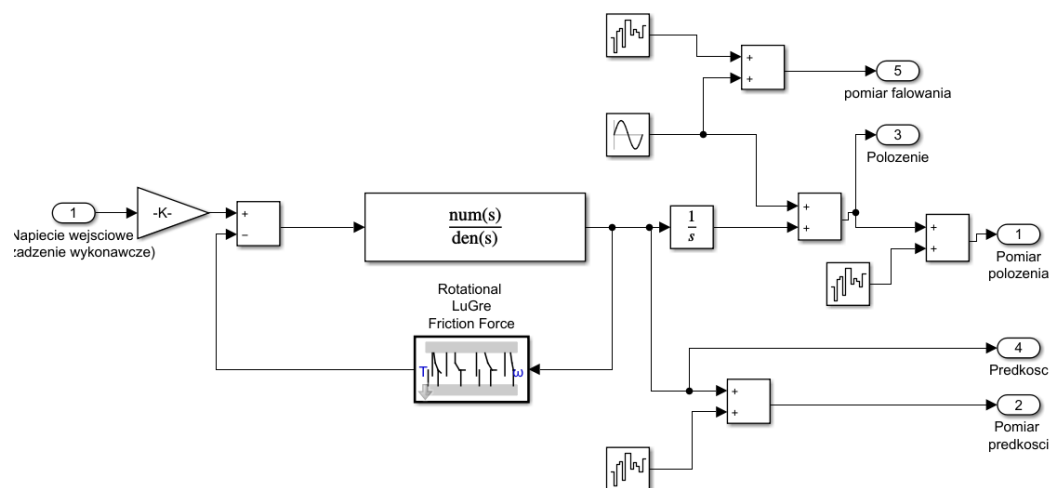
Ze względu na duży wpływ wzmocnienia regulatora położenia na początkowe przeregulowania skutecznym rozwiązaniem byłoby zastosowanie regulatora rozmytego w pętli zewnętrznej, który dla wysokiego błędu sterowania charakteryzowałby się niższymi nastawami, a w momencie faktycznego śledzenia pocisku wartość wzmocnienia wzrastałaby, aby zapewnić wyższą skuteczność podążania za trajektorią zadaną.

Alternatywne rozwiązanie:

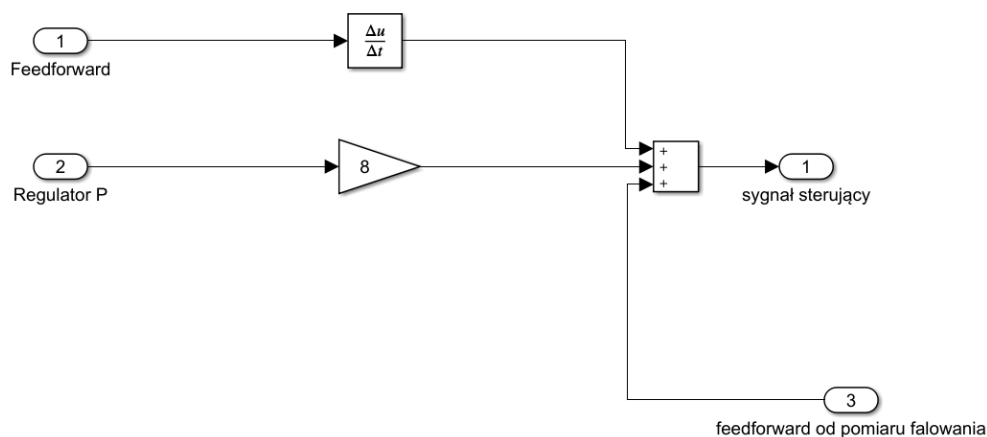
Głównym problemem w śledzeniu trajektorii już namierzonego pocisku był wpływ zakłóceń wolnozmiennych w postaci falowania statku ze względu na ich amplitudę, wymagające wysokich nastaw wzmocnień regulatorów w obydwu pętach, co skutkowało dużymi przeregulowaniami podczas prób osiągnięcia trajektorii pocisku przez radar. Przechylenie statku jest zakłóceniem mierzalnym, które można zrealizować w rzeczywistym zastosowaniu za pomocą żyroskopu, podobnie jak wychylenie czaszy radaru, stąd dołączenie sprzężenia w przód od zakłócenia w postaci falowania statku umożliwia kompensację wpływu falowania statku na pozycję czaszy względem pocisku.



Rys. 20. Model symulacyjny rozwiązania alternatywnego



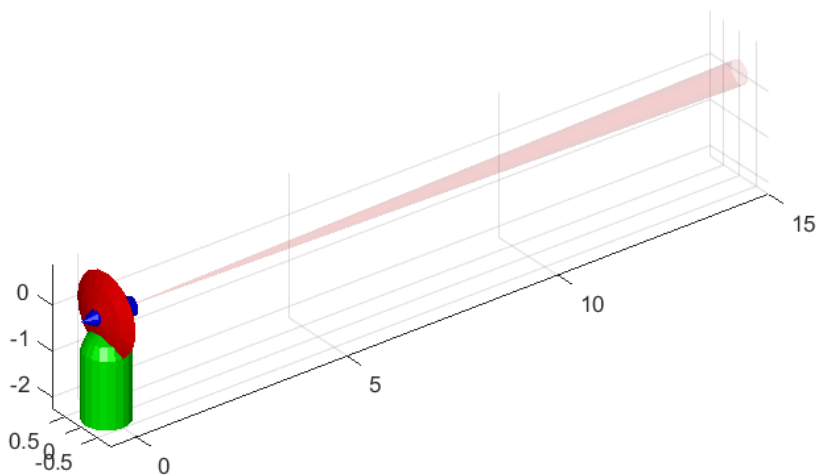
Rys. 21. Model obiektu rozszerzony o pomiar falowania.



Rys. 22. Regulator położenia z dodatkowym sprzężeniem w przód od pomiaru falowania.

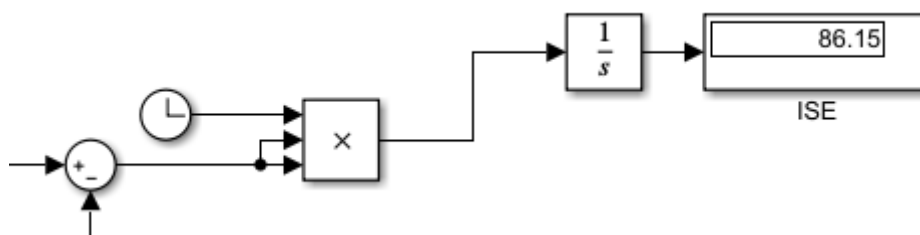
Wykonanie powyżej opisanego zabiegu umożliwiło wydłużenie czasu śledzenia do 18.6 s po dostrojeniu układu. Ponadto poprawność śledzenia przedstawiona za pomocą wskaźnika jakości ISE pokazuje kilkukrotną poprawę.

Simulation time: 25.0
In range time: not in range
Max in range time: 18.6

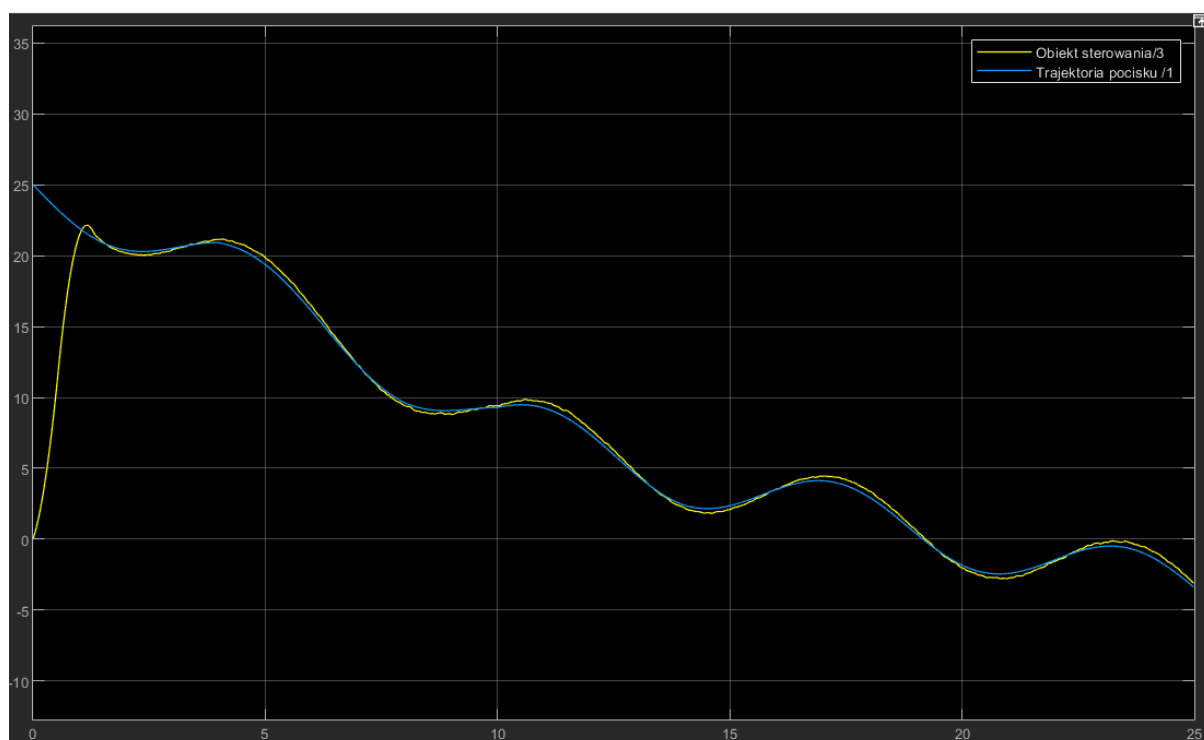


Copyright © 2011 Grzegorz Ewald, Wojciech Kurek

Rys. 23. Animacja przebiegu śledzenia.



Rys. 24. Wskaźnik jakości ISE.



Rys. 25. Trajektoria pocisku i położenie czaszy na jednym wykresie.