

## 1. Cel projektu.

Przeprowadzić badania symulacyjne układu regulacji z liniowym regulatorem predykcyjnym GPC oraz obiektem  $G(s)$  z zadania nr 1, dla skokowej zmiany wartości zadanej z 0 na 0.5. Jako model obiektu do syntezy regulatora użyć należy model dyskretny  $G(z^{-1})$  również z zadania nr 1.

- Sprawdzić wpływ długości horyzontów predykcji  $N_2$  i sterowania  $N_u$  oraz współczynnika wagi za sterowanie  $\lambda$ . Przyjąć początek horyzontu predykcji  $N_1$  równy  $\kappa+1$ , gdzie  $\kappa$  to dyskretny opóźnienie obiektu.
- Sprawdzić wpływ ograniczeń sygnału sterującego oraz ograniczeń przyrostów sygnału sterującego.
- Powtórzyć badania zwiększając opóźnienie obiektu  $G(s)$  o cztery okresy próbkowania  $T_p$ . Badania przeprowadzić bez zmiany modelu dyskretnego oraz z odpowiednią zmianą modelu.

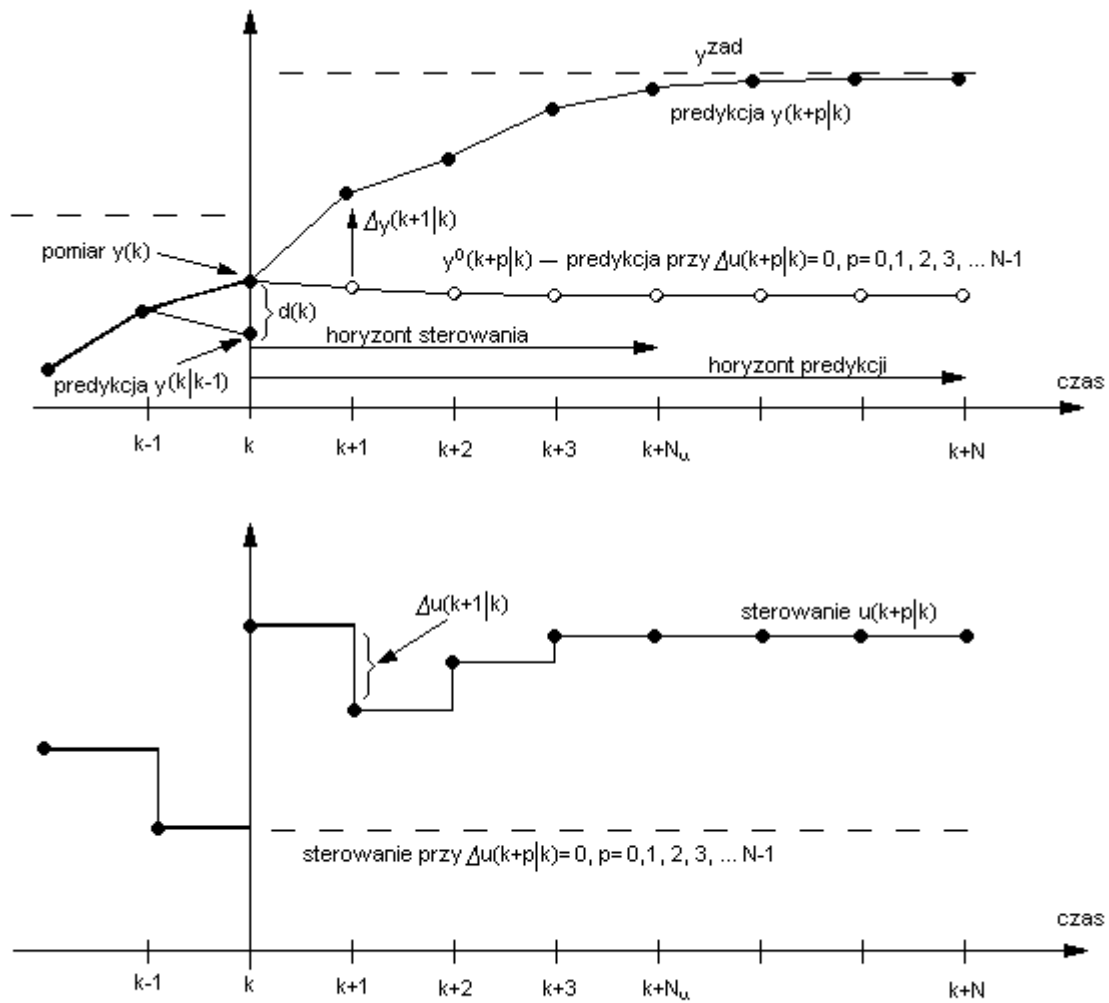
## 2. Wprowadzenie teoretyczne.

Technika regulacji MPC jest jedyną z tzw. zaawansowanych technik regulacji (ang. advanced control techniques - bardziej zaawansowanych niż standardowa regulacja PID), która odniosła olbrzymi sukces w aplikacjach praktycznych wywierając dominujący wpływ zarówno na kierunek rozwoju przemysłowych układów regulacji i sterowania, jak i prac badawczych w tym obszarze.

Algorytmy regulacji predykcyjnej MPC w sposób naturalny potrafią uwzględnić ograniczenia zarówno sygnałów sterujących, jak i ograniczenia wielkości wyjściowych decydujące często o jakości, efektywności i bezpieczeństwie produkcji.

Generują aktualne sterowania uwzględniając zarówno wspomniane ograniczenia, jak i, dzięki bezpośredniemu wykorzystaniu modelu, interakcje wewnętrzne w obiekcie, stąd w sposób naturalny można je stosować do obiektów wielowymiarowych, również przy nierównej liczbie wejść sterujących i wielkości regulowanych.

Po trzecie, są to algorytmy, których zasada działania jest zrozumiała, stosunkowo łatwa do wyjaśnienia personelowi inżynierskiemu, jak i operatorskiemu - aspekt bardzo istotny przy wprowadzaniu nowych technik do praktyki przemysłowej.



Jednym z najpopularniejszych algorytmów predykcyjnych okazał się algorytm GPC (Generalized Predictive Control), zaproponowany nieco później niż algorytmy oparte na nieparametrycznych modelach odpowiedzi skokowej czy impulsowej. Algorytm GPC wykorzystuje model obiektu w postaci dyskretnego równania różnicowego opisującego relację wejście - wyjście (transmitancji dyskretnej).

### 3. Sprawdzenie wpływu długości horyzontów predykcji i sterowania oraz współczynnika wagi za sterowanie, na układ regulacji.

Naszym obiektem regulacji jest następująca transmitancja:

$$G(s) = \frac{1}{27s^2 + 12s + 1} \circ e^{-4s}$$

Jako modelem obiektu do syntezy regulatora posłużymy się modelem dyskretnym, uzyskanym z powyższego modelu ciągłego przy czasie próbkowania  $T_p$  równy 2 sekundom:

$$G(z^{-1}) = \frac{0.0556z^{-1} + 0.04136z^{-2}}{1 - 1.314z^{-1} + 0.4111z^{-2}} \circ z^{-2}$$

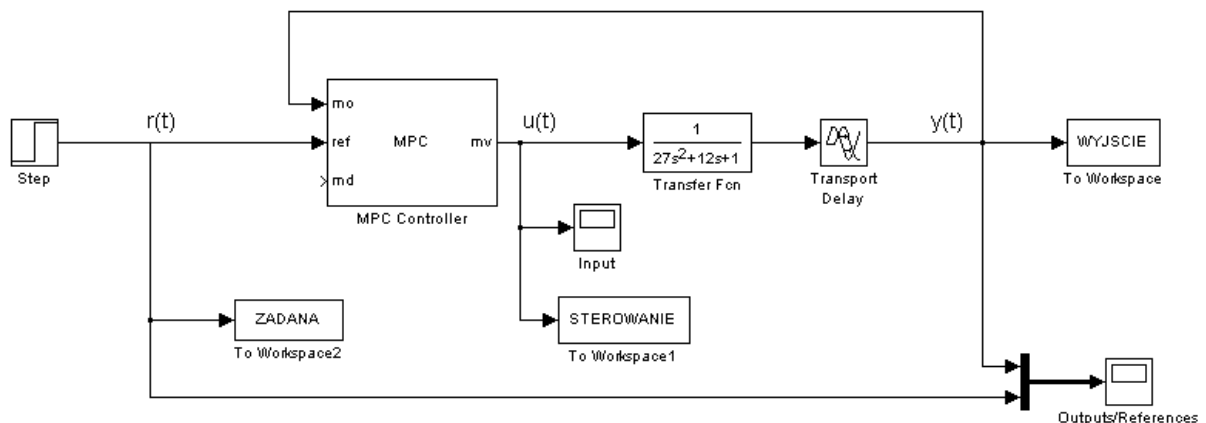
Początek horyzontu predykcji  $N_1$  wynosi  $\kappa+1$ . W naszym modelu opóźnienie dyskretne  $\kappa=2$ , co daje nam początek horyzontu predykcji o wartości  $N_1=3$ .

Współczynnik wagi sterowania  $\lambda$  na początku naszej pracy z regulatorem GPC został automatycznie dobrany przy projektowaniu „MPC simulink block design tool” jako wartość domyślna i wynosi  $\lambda=0.8$ .

Jako początkową długość horyzontu predykcji przyjęliśmy czas ustalenia się obiektu ciągłego  $G(s)$  przy dopowiedzi na skok jednostkowy. Czas ten wynosił 70 sekund, czyli 35 taktów. Za długość horyzontu sterowania przyjęliśmy wartość 5.

$$\begin{aligned} HP &= 35 \\ HS &= 5 \\ \lambda &= 0.8 \\ T_p &= 2 \end{aligned}$$

Schemat układu regulacji:



Listing postępowania w programie „Matlab”:

```
Gs=tf([1],[27 12 1],'outputdelay',4)
```

Transfer function:

$$\exp(-4*s) * \frac{1}{27 s^2 + 12 s + 1}$$

Tp = 2; czas próbkowania

```
Gz=c2d(Gs,Tp)
```

Transfer function:

$$z^{(-2)} * \frac{0.0556 z + 0.04136}{z^2 - 1.314 z + 0.4111}$$

Sampling time: 2

```
set(Gz,'var','z^-1')
```

Gz

Transfer function:

$$z^{(-2)} * \frac{0.0556 z^{-1} + 0.04136 z^{-2}}{1 - 1.314 z^{-1} + 0.4111 z^{-2}}$$

Sampling time: 2

```
HP = 35;
```

```
HS = 5;
```

```
Tstop=100;
```

Horyzont predykcji

Horyzont sterowania

Czas zakończenia symulacji

```
mpc_controller=mpc(Gz,Tp,HP,HS)
```

Ustawienie parametrów regulatora GPC

MPC object (created on 16-Jun-2006 18:57:44):

-----  
Sampling time: 2  
Prediction Horizon: 35  
Control Horizon: 5

Model:

Plant: [1x1 tf]

Disturbance: []

Noise: []

Nominal: [1x1 struct]

Output disturbance model: default method (type "getoutdist(mpc\_controller)" for details)

Details on Plant model: (I/O delay = 2)

```
-----  
1 manipulated variables -->|      tf |  
|                               |--> 1 measured outputs  
0 measured disturbances -->| 1 inputs |  
|                               |--> 0 unmeasured outputs  
0 unmeasured disturbances -->| 1 outputs |  
-----
```

Weights: (default)

ManipulatedVariables: 0

ManipulatedVariablesRate: 0.1000

OutputVariables: 1

ECR: 100000

MPC\_PROJEKT\_4

sim('MPC\_PROJEKT\_4',Tstop)

Odpalenie symulacji w Silulinku

-->Converting Model.Plant to state-space.

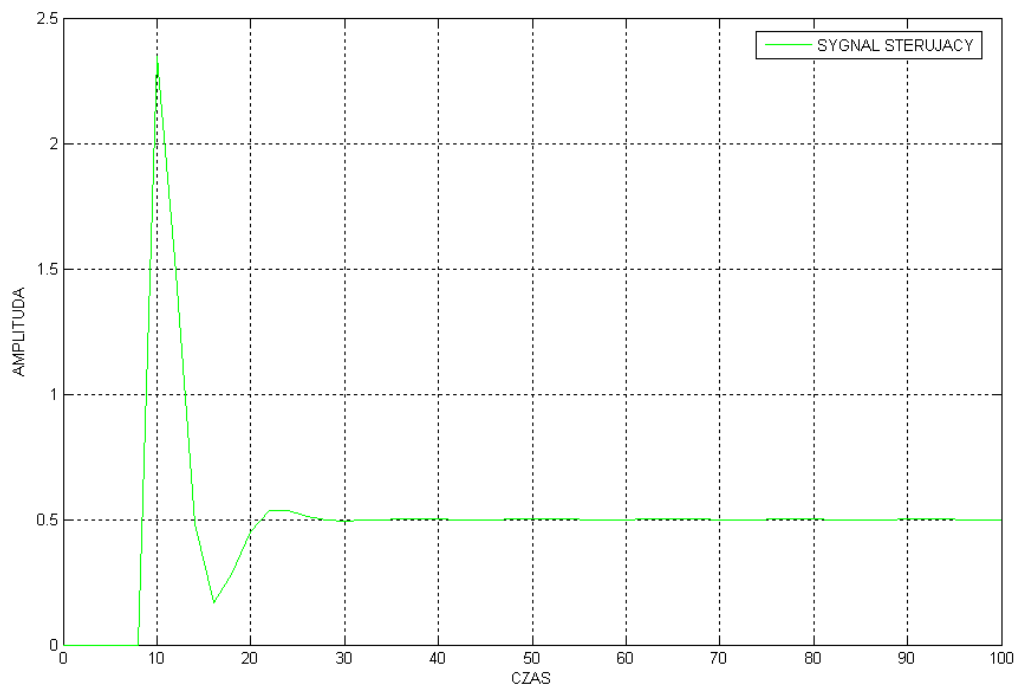
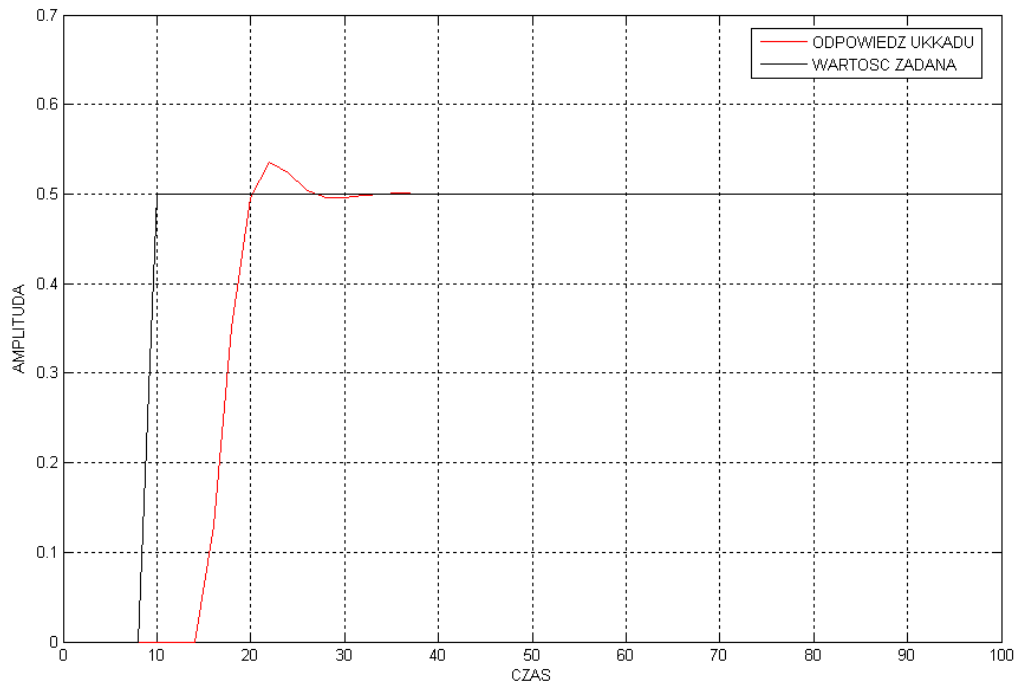
-->Converting delays to states.

-->Integrated white noise added on measured output channel #1

-->No Model.Noise specified, assuming white noise on each measured output channel

Po wprowadzeniu wszystkich parametrów do naszego regulatora GPC uzyskaliśmy następujące odpowiedzi sygnału sterującego i układu regulacji, przy ustawionych parametrach:

Horyzont predykcji  $HP=35$   
Horyzont sterowania  $HS=5$   
Współczynnik wagi sterowania  $\lambda=0.8$



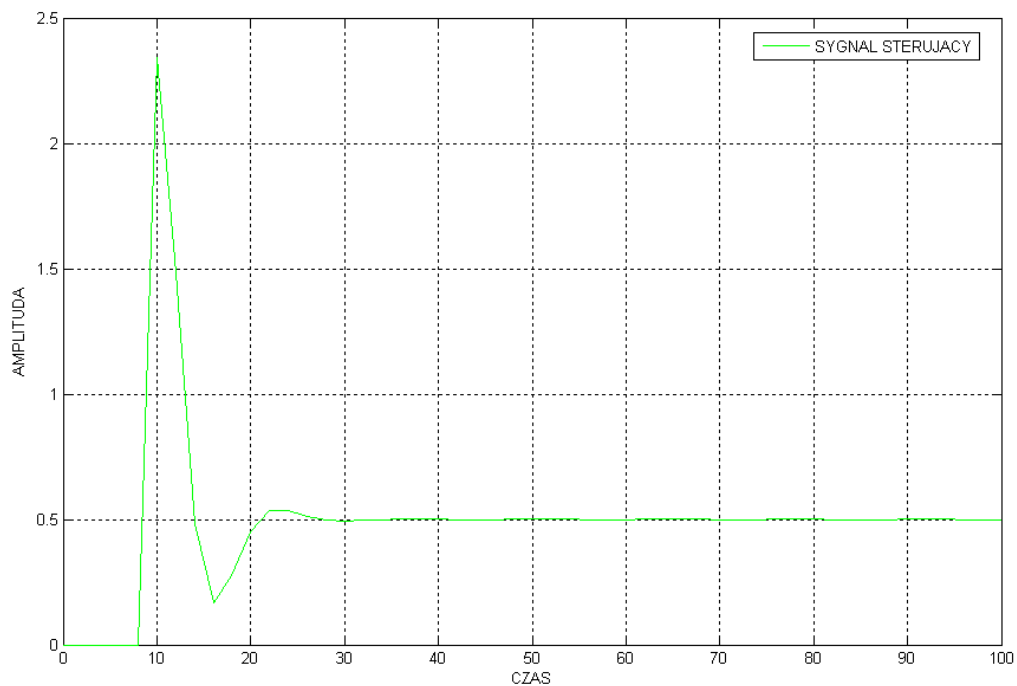
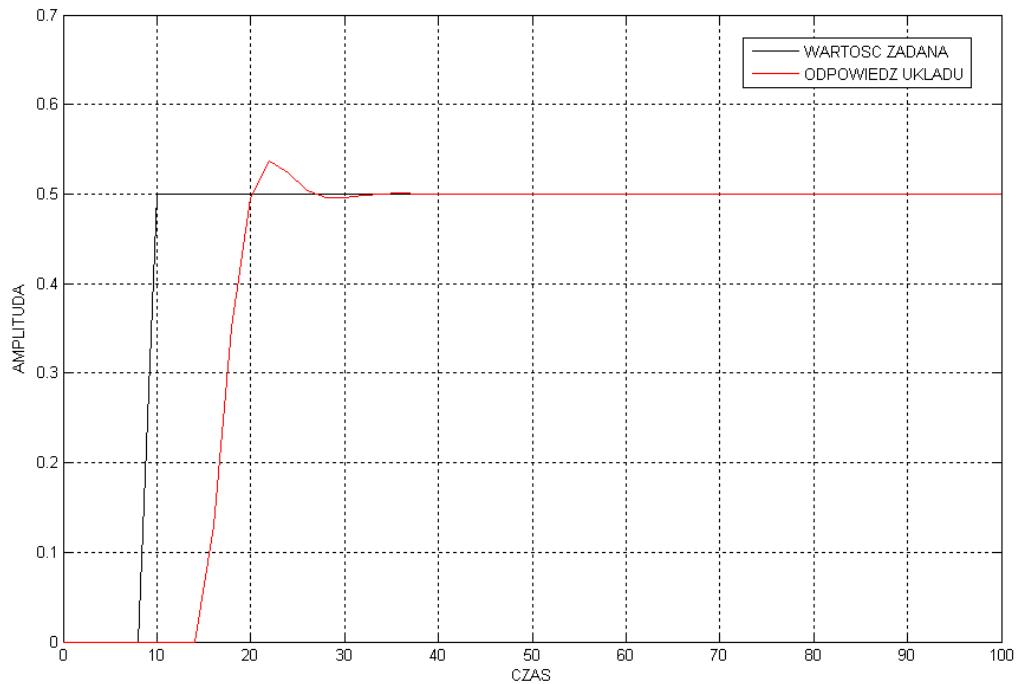
W następnej symulacji zmieniliśmy wartość horyzontu predykcji na wartości:

HP1=20,

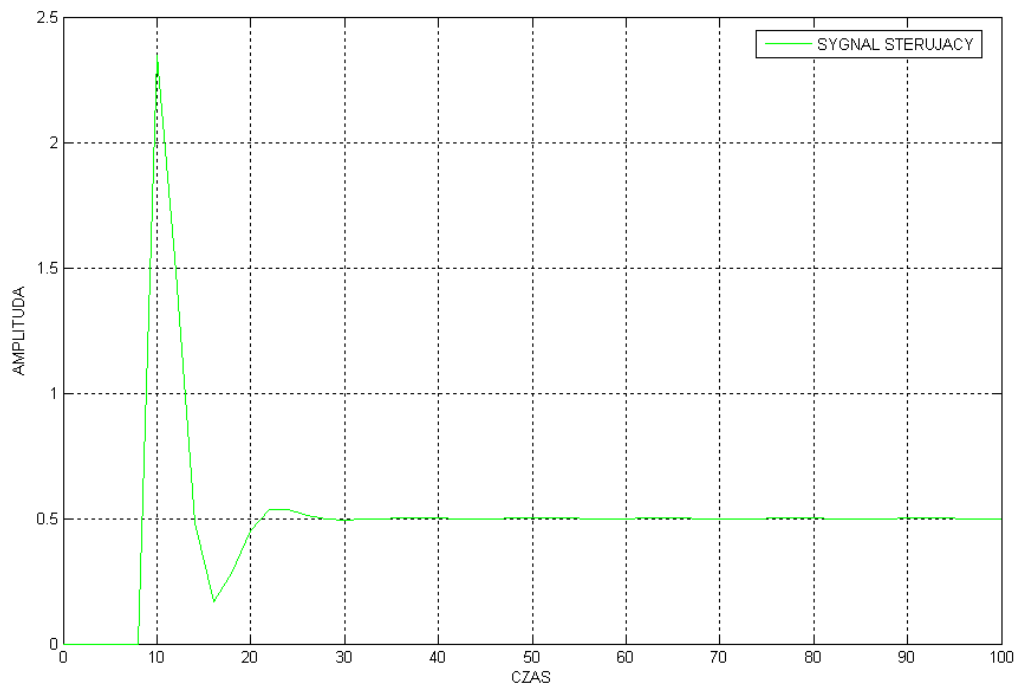
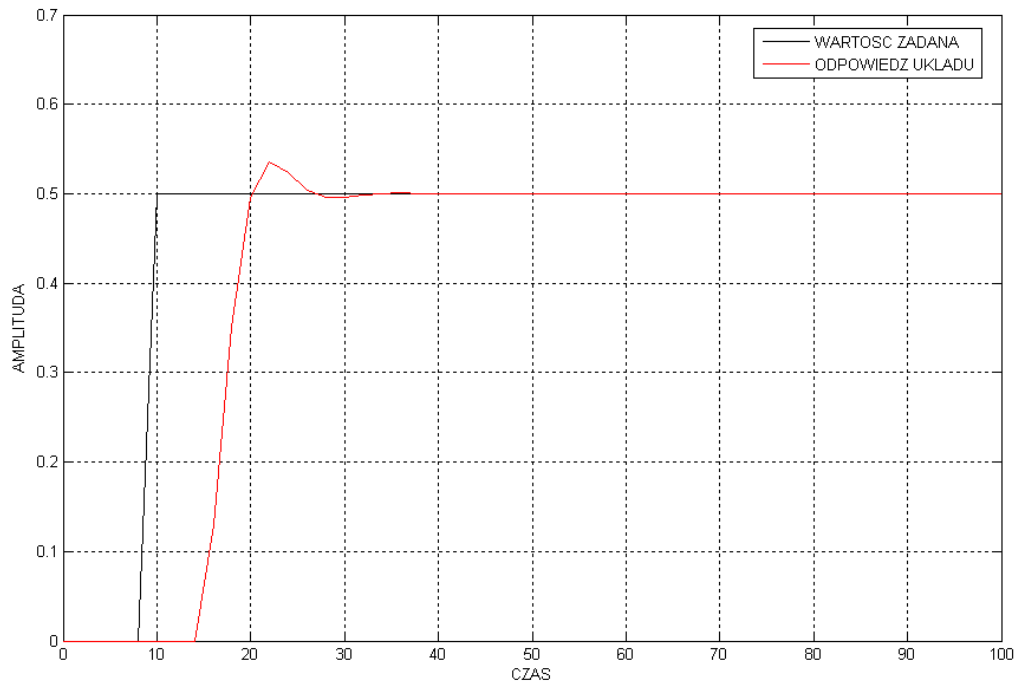
HP2=50,

a pozostałe współczynniki pozostawiamy bez zmian, HS=5 i  $\lambda=0.8$ .

Charakterystyki odpowiedzi naszego układu i sygnału sterującego przy zmianie horyzontu predykcji na wartość HP1=20:



Charakterystyki odpowiedzi naszego układu i sygnału sterującego przy zmianie horyzontu predykcji na wartość  $HP2=50$ :

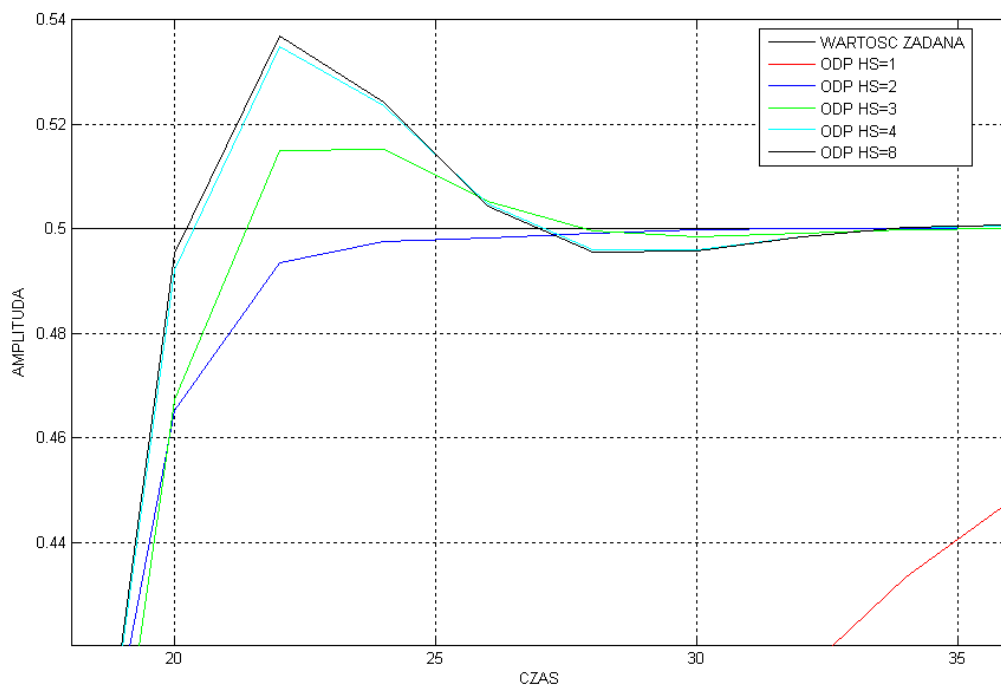
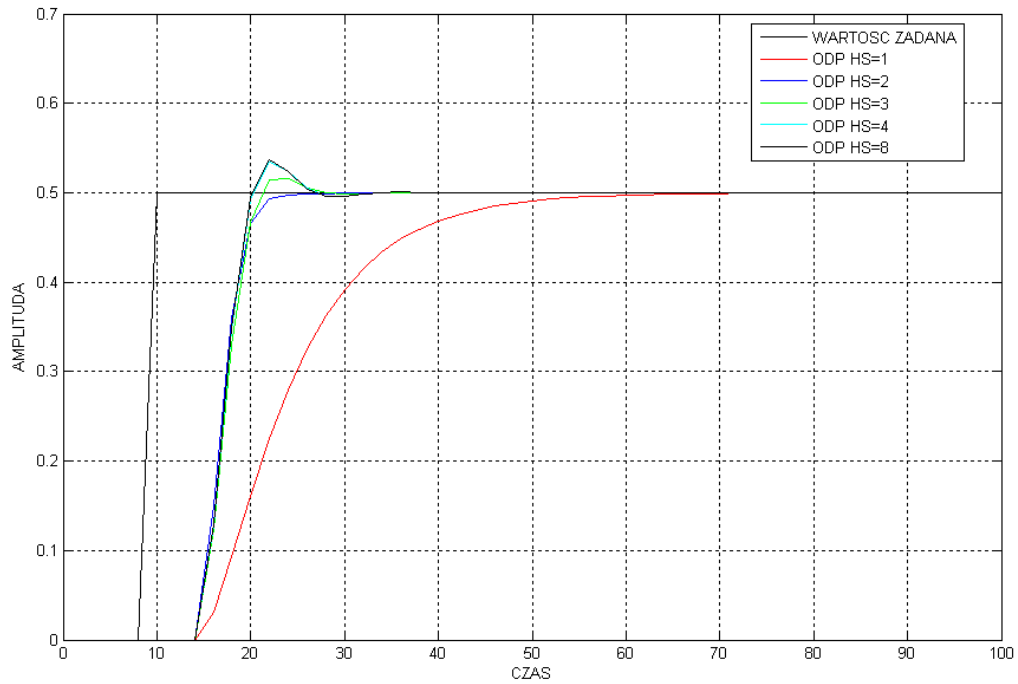


Jak widać zmiana horyzontu predykcji nie wpływa na odpowiedź naszego układu regulacji, jak również na wartość sygnału sterującego podawanego na nasz obiekt  $G(s)$ .

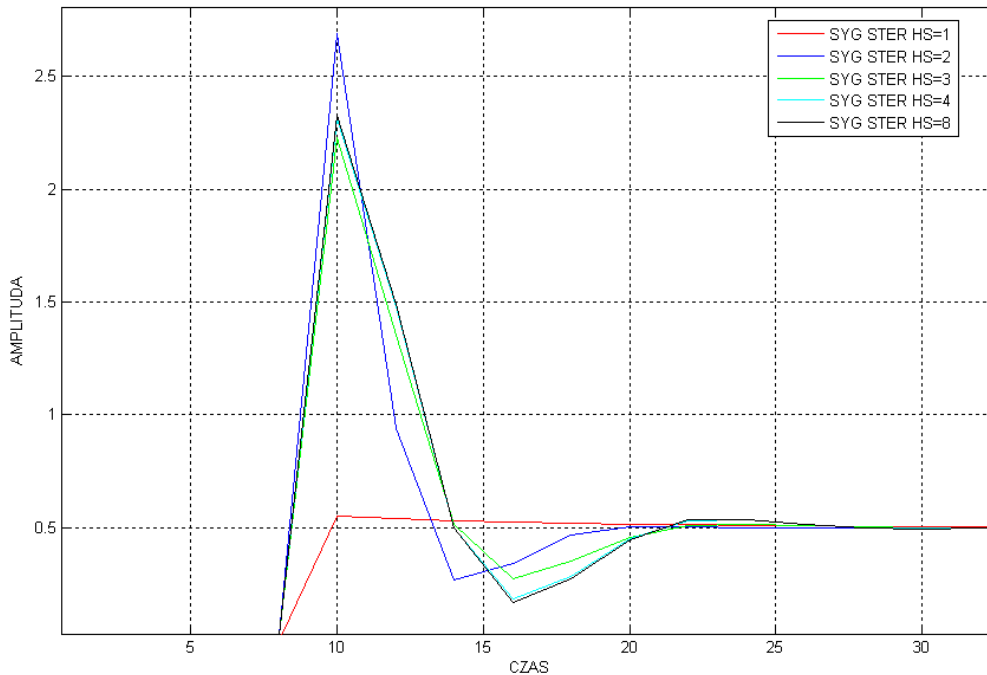
Kolejnym krokiem będzie zmiana wartości horyzontu sterowania HS na wartości:  
 $HS \in \{1;2;3;4;8;20\}$

Pozostawiając wartości pozostałych parametrów jak na samym początku naszego projektu.

Charakterystyki naszego układu regulacji przy zmianie horyzontu sterowania:



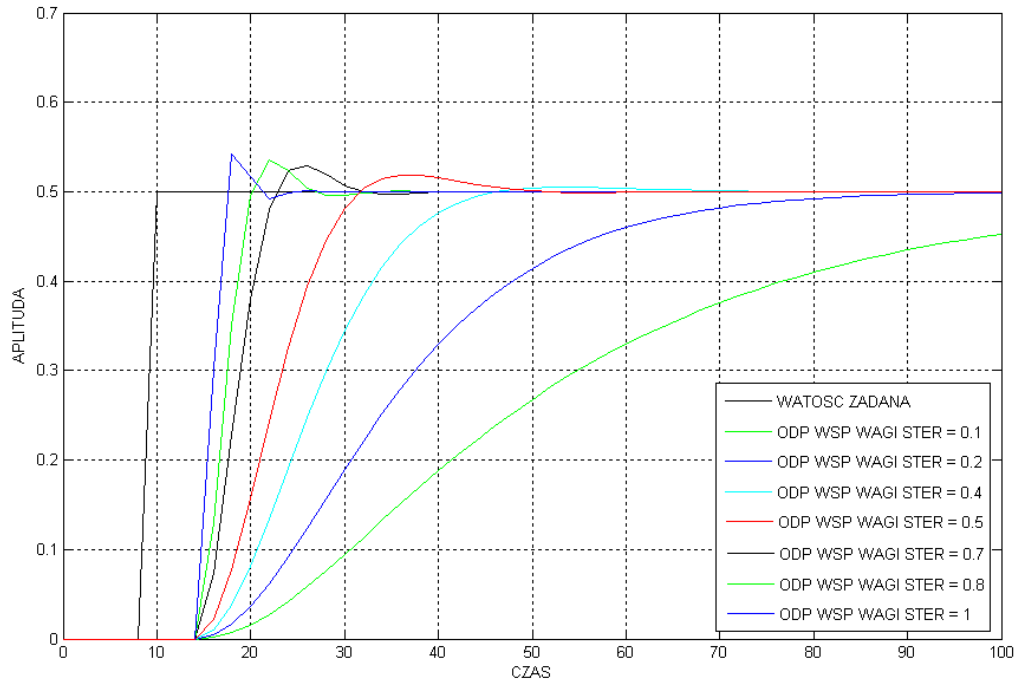
## Charakterystyki sygnału sterującego przy zmianie horyzontu sterowania:



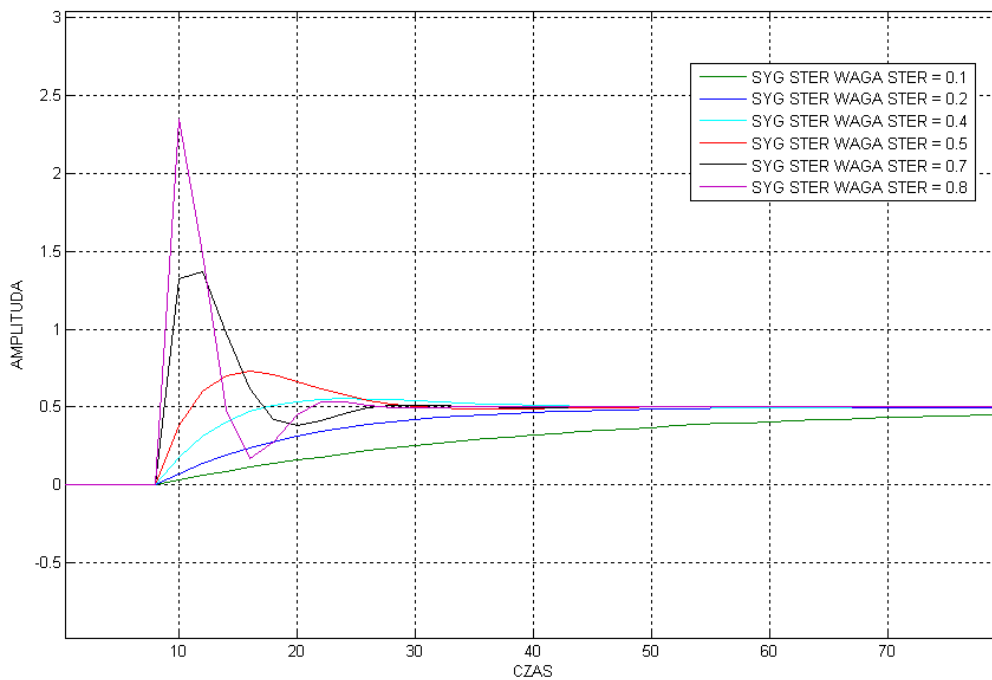
Jak widzimy, zmiana wartości horyzontu sterowania ma znaczący wpływ na kreowanie odpowiedzi naszego układu regulacji. Im mniejszą wartość przyjmuje współczynnik  $N_u$ , tym odpowiedź układu z zastosowaniem algorytmu GPC generuje nam odpowiedź o coraz to mniejszym przeregulowaniu. Jednakże nie może to być wartość za mała, ponieważ układ reaguje wtedy dużo wolniej, przez co ma dłuższy czas ustalenia się odpowiedzi na wartości zadanej. Możemy to zauważyć na naszym przykładzie przyglądając się odpowiedzi układu przy horyzoncie sterowania równym jeden. Czas ustalenia się układu wynosi 35 taktów (70 sekund), co w porównaniu już ze współczynnikiem  $N_u$  na poziomie wartości od dwóch wzwyż zmniejsza nam go do wartości 16 taktów (32 sekund). Zauważyliśmy również, że nie można horyzontu sterowania dowolnie zwiększać i nadawać mu dużych wartości z myślą o jak najlepszej regulacji, gdyż takie działanie powoduje powstawanie coraz to większego przeregulowania, które w naszym przykładzie dochodzi do wartości 10% (dla  $N_u=8$ ). Najbardziej optymalną wartością w naszym przykładzie jest horyzont sterowania dla  $N_u=2$ , przy którym układ bardzo szybko odpowiada i to bez przeregulowania. Sprawdziliśmy również możliwość błędnego zwiększenia tego współczynnika do bardzo dużych wartości ( $N_u=20$ ) i z naszych obserwacji wynika, iż odpowiedź układu ulega nasycaniu się. Dla naszego przykładu jest to widoczne od wartości  $N_u=4$  (dla  $N_u=4-8$  i 20, który to pokrywa się z sygnałem dla  $N_u=8$ ).

Wpływ zmiany współczynnika wagi sterowania  $\lambda$  na odpowiedź układu sterowania:

Domyślnie nasza waga sterownia została ustalona na wartości  $\lambda=0.8$



oraz na sygnał sterujący:



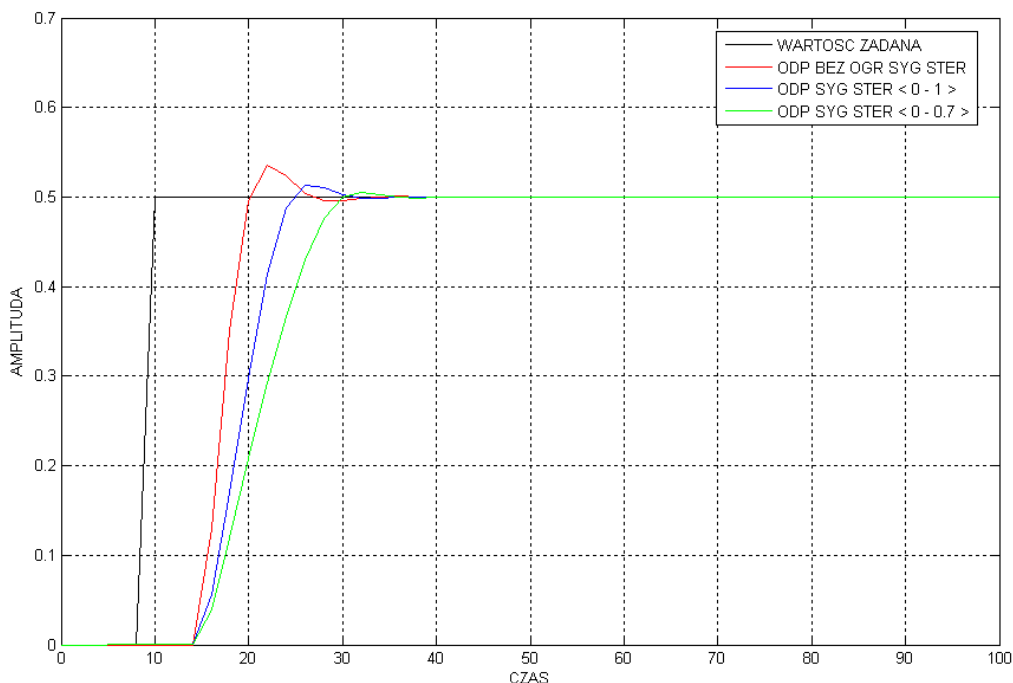
W tym przypadku zmiany współczynnika wagi sterowania  $\lambda$  w porównaniu ze zmianą horyzontu sterowania HS, mamy bardziej płynną możliwość ustalenia jakości odpowiedzi naszego układu. Jak daje się zauważyć na wcześniej pokazanych charakterystykach, dzięki zmianie  $\lambda$  od wartości 0.1 do wartości 1, zmianą ulegały: czas narastania sygnału, czas ustalenia się sygnału i wartość przeregulowania. Pozwala nam to na dobranie odpowiedzi sygnału na wartość zadaną w taki sposób, jak tylko potrzebujemy. Dla naszego przykładu najbardziej optymalną wartością współczynnika wagi sterowania byłaby wartość między 0.5, a 0.7, dla których to układ posiada niewielkie przeregulowanie w granicach 3.8-5.8%. Czas narastania i czas ustalenia się są bardzo krótkie i mieszczą się w granicach: czas narastania 22-27sekund, a czas ustalenia się w 35-50 sekund.

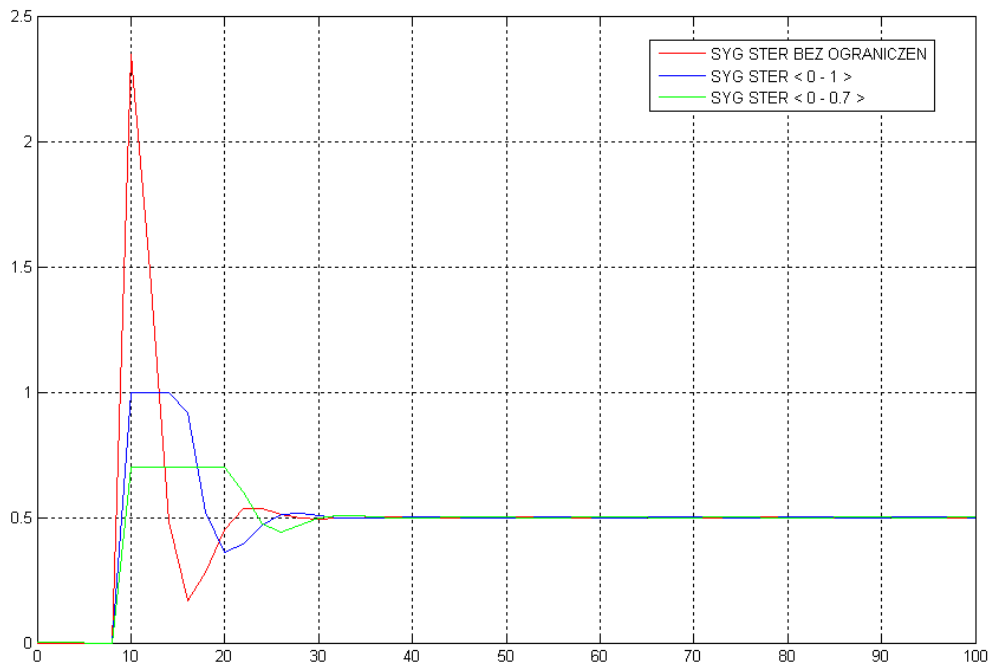
#### 4. Wpływ ograniczeń sygnału sterującego.

Aby ograniczyć sygnał sterujący należy wykorzystać funkcję:

```
mpc_controller.MV=struct('Min',0,'Max',1);
```

w naszym przykładzie przedstawiamy wpływ ograniczenia sygnału sterującego do wartości: niebieski wykres  $\langle 0 - 1 \rangle$ , `mpc_controller.MV=struct('Min',0,'Max',1)`, zielony wykres  $\langle 0 - 0.7 \rangle$ , `mpc_controller.MV=struct('Min',0,'Max',0.7)`.

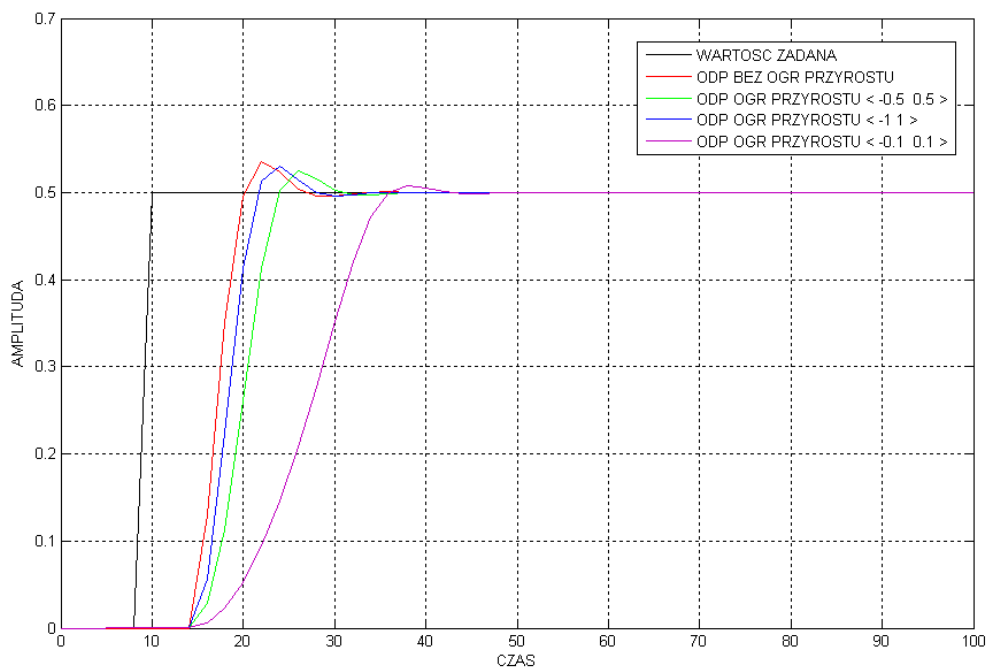


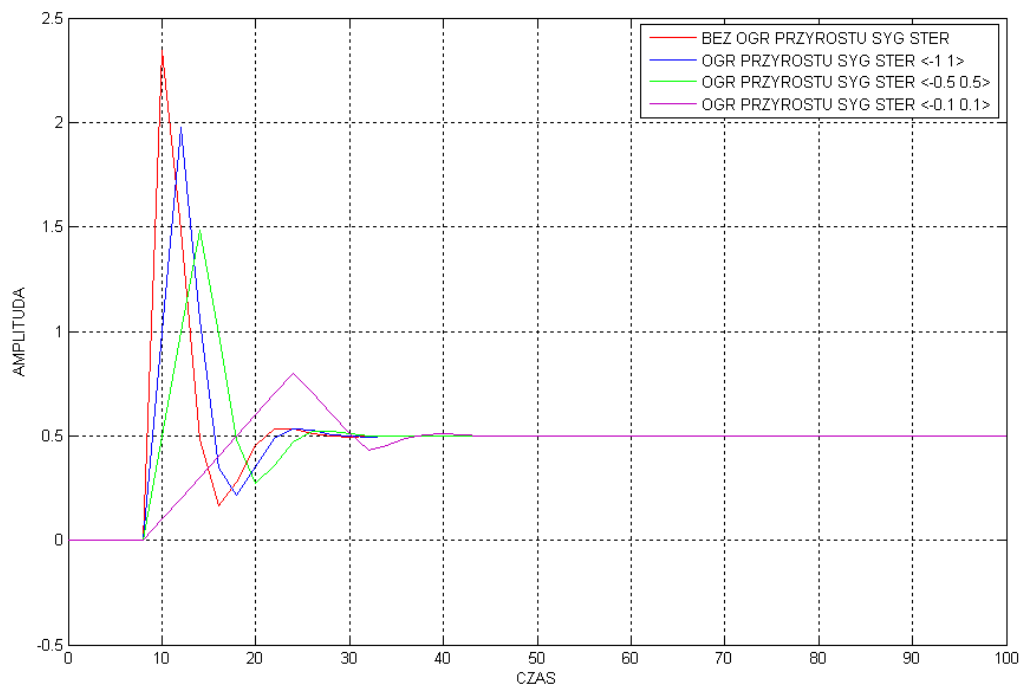


Aby ograniczyć przyrost sygnału sterującego należy wykorzystać funkcję:

```
mpc_controller.MV=struct('RateMin',-1,'RateMax',1);
```

w naszym przykładzie przedstawiamy wpływ ograniczenia sygnału sterującego do wartości:  
niebieski wykres  $\langle -1 \ 1 \rangle$ , `mpc_controller.MV=struct('RateMin',-1,'RateMax',1)`,  
zielony wykres  $\langle -0.5 \ 0.5 \rangle$ , `mpc_controller.MV=struct('RateMin',-0.5,'RateMax',0.5)`,  
fioletowy wykres  $\langle -0.1 \ 0.1 \rangle$ , `mpc_controller.MV=struct('RateMin',-0.1,'RateMax',0.1)`.





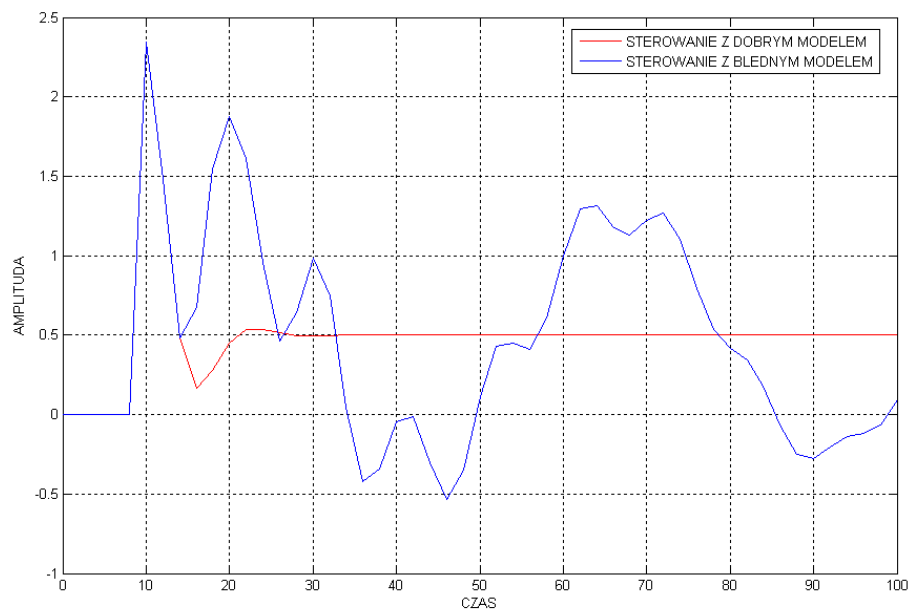
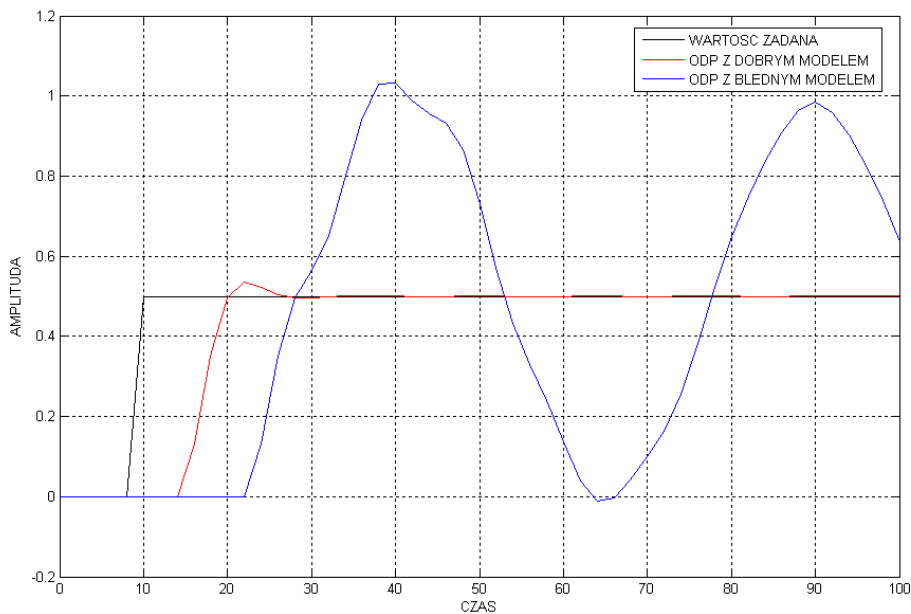
Jak widzimy, wpływanie na sygnał sterujący poprzez jego ograniczenie lub ograniczenie jego przyrostu ma duże znaczenie na odpowiedź naszego układu. Zmieniając go przez różne ograniczenia, powodujemy zwiększenie się czasu narastania, jak również (co z tym jest bezpośrednio związane) zwiększenie czasu ustalenia się obiektu na wartości zadanej. Pozytywnym aspektem jest spadek wartości przeregulowania, które to (widoczne na naszych zamieszczonych powyżej charakterystykach odpowiedzi układu regulacji), spada z wartości 8% aż do wartości 2%. Sygnał sterujący przed zastosowaniem ograniczeń osiąga wartość 2.35 amplitudy. Jak wiemy, nie zawsze możemy dysponować taką wartością sygnału sterującego, dlatego stosujemy różnego rodzaju ograniczenia. W przypadku wprowadzonych przez nas ograniczeń sterowania naszym obiektem wartość sygnału sterującego zmniejszyliśmy średnio o połowę, co i tak pozwoliło nam na dobre sterowanie naszym obiektem.

## 5. Zwiększenie opóźnienia obiektu $G(s)$

Opóźnienie naszego obiektu  $G(s)$  wynosi 4 sekundy, jeżeli zwiększymy jego wartość o cztery okresy próbkowania ( $T_p = 2$ ), to zwiększy się ono do 12 sekund.

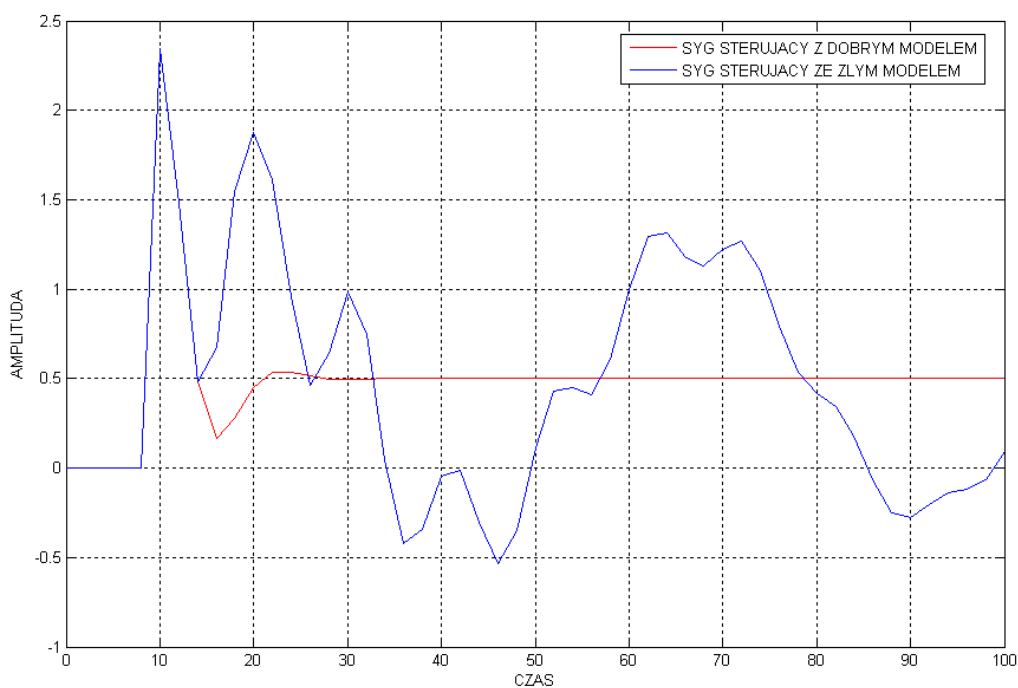
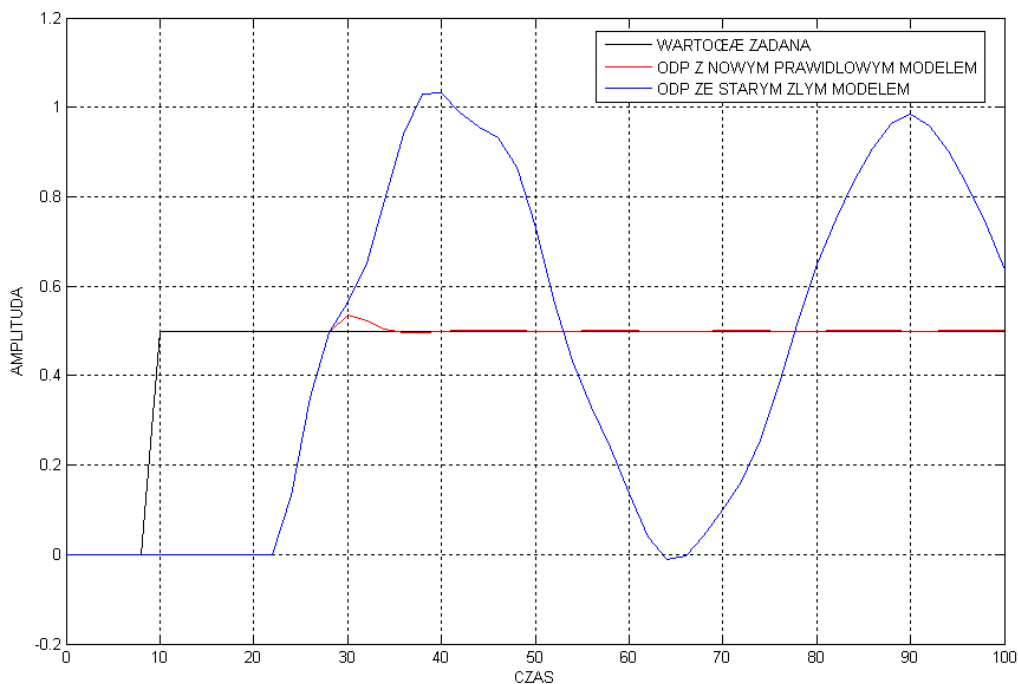
$$G(s) = \frac{1}{27s^2 + 12s + 1} \circ e^{-12s}$$

Jeżeli zwiększymy opóźnienie naszego obiektu, bez uwzględnienia zmian w naszym modelu zastosowanym w regulatorze predykcyjnym GPC, to otrzymamy następujące odpowiedzi układu i sygnału sterującego:



Jeżeli jednak dla obiektu  $G(s)$  wyznaczmy odpowiedni model dyskretny  $G(z^{-1})$  i zastosujemy go jako model w naszym liniowym regulatorze predykcyjnym GPC to otrzymamy następujące wyniki:

$$G(z^{-1}) = \frac{0.0556z^{-1} + 0.04136z^{-2}}{1 - 1.314z^{-1} + 0.4111z^{-2}} \circ z^{-6}$$



## 6. Wnioski.

Po przeprowadzeniu symulacji z liniowym regulatorem predykcyjnym GPC widzimy, że duże znaczenie dla naszego regulatora predykcyjnego ma użycie właściwego modelu. Zastosowanie błędnego modelu w naszym regulatorze, tak jak to uczyniliśmy w punkcie 5 projektu spowodowało całkowite rozregulowanie się regulatora i wyprowadziło oscylacyjną odpowiedź naszego URA. Duży wpływ na sterowanie jakością naszej odpowiedzi na wartość zadaną jest wprowadzanie zmian w horyzoncie sterowania i zmiany wagi współczynnika sterowania. Dzięki tym parametrom możemy łatwo regulować przebiegiem odpowiedzi układu do uzyskania przez nas żądanej charakterystyki, przeciwnie jest natomiast ze zmianą długości horyzontu predykcji, która nie wpływa na odpowiedź układu regulacji.

Łatwo daje się zauważyć, że prawidłowe posługiwanie się regulatorem predykcyjnym GPC wiąże się z odpowiednim posługiwanym się wartościami powyższych parametrów. Każdy nieprawidłowo użyty parametr powoduje pogorszenie się jakości sterownia naszym obiektem, wprowadzając do odpowiedzi układu zwiększone przeregulowanie lub wydłużenie się czasu narastania i ustalenia się odpowiedzi na wartości zadanej.