



AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

AGH Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

PROJEKTOWANIE UKŁADÓW AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ – PROJEKT ZALICZENIOWY

Temat projektu:

**Analiza regulatorów strojonych metodami
Modulus Optimum i Symmetrical Optimum**

Autor:

Gracjan Jucha

Kraków, 2016 r.

Spis treści

1. Opis teoretyczny wykorzystanych metod.	6
1.1. Opis metody Modulus Optimum - kryterium modułu.	8
1.2. Opis metody Symmetrical Optimum – kryterium symetrii.	9
2. Realizacja projektu.	10
2.1. Wyznaczenie transmitancji obiektów.	10
2.3. Wyznaczenie obiektów aproksymowanych dla metody SO.	11
3. Przebieg symulacji.	12
3.1. Obiekt $P5(s)$ dla parametru $\alpha = 0.2$	12
3.2. Obiekt $P9(s)$ dla parametru $T = 0.1$	16
3.3. Obiekt $P1s$ dla parametru $T = 0.02$	19
3.4. Obiekt $P1s$ dla parametru $T = 0.05$	23
3.5. Obiekt $P2s$ dla parametru $T = 1.5$	26
3.6. Obiekt $P3s$ dla parametru $T = 0.05$	30
3.7. Obiekt $P4s$ dla parametru $n=3$	33
3.8. Obiekt $P6s$ dla parametru $L1 = 0.01$	37
3.9. Obiekt $P7s$ dla parametru $T = 5$ i $L1 = 0.5$	40
3.10. Obiekt $P8s$ dla parametru $\alpha = 0.6$	44
4. Wnioski.	48
Źródła	49
Zawartość projektu.	49

Spis ilustracji

Rysunek 1. Model układu generującego dane dla funkcji iddata. Plik tf_est.slx.....	10
Rysunek 2. Model do symulacji układu sterowania. Plik object.slx.....	11
Rysunek 3. Odpowiedź skokowa obiektu i jego aproksymacji. Obiekt $P5(s)$, $\alpha = 0.2$, metoda MO.....	12
Rysunek 4 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda MO....	13
Rysunek 5 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda MO.....	13
Rysunek 6. Odpowiedź skokowa obiektu i jego aproksymacji. Obiekt $P5(s)$, $\alpha = 0.2$, metoda SO.....	14
Rysunek 7. Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda SO. ...	14
Rysunek 8 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda SO.	15
Rysunek 9 Odpowiedź skokowa obiektu $P9(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.1$, metoda MO.	16
Rysunek 10. Odpowiedź skokowa obiektu $P9(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.1$, metoda SO.	17
Rysunek 11. Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda MO. ...	17
Rysunek 12 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda MO.	18
Rysunek 13. Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda SO.....	18
Rysunek 14 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda SO.....	19
Rysunek 15 Odpowiedź skokowa obiektu $P1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.02$, metoda MO.	20
Rysunek 16 Odpowiedź skokowa obiektu $P1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.02$, metoda SO.	20
Rysunek 17 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda MO. ..	21
Rysunek 18 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda MO.	21
Rysunek 19 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda SO.....	22
Rysunek 20 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda SO.....	22

Rysunek 21 Odpowiedź skokowa obiektu $P1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda MO.	23
Rysunek 22 Odpowiedź skokowa obiektu $P1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda SO.	24
Rysunek 23 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO. ..	24
Rysunek 24 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO.	25
Rysunek 25 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.....	25
Rysunek 26 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.....	26
Rysunek 27 Odpowiedź skokowa obiektu $P2(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 1.5$, metoda MO.	27
Rysunek 28 Odpowiedź skokowa obiektu $P2(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 1.5$, metoda SO.	27
Rysunek 29 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P2(s)$ dla $T = 1.5$, metoda MO.	28
Rysunek 30 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P2(s)$ dla $T = 1.5$, metoda MO.	28
Rysunek 31 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P2(s)$ dla $T = 1.5$, metoda SO.....	29
Rysunek 32 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P2(s)$ dla $T = 1.5$, metoda SO.....	29
Rysunek 33 Odpowiedź skokowa obiektu $P3(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda MO.	30
Rysunek 34 Odpowiedź skokowa obiektu $P3(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda SO.	31
Rysunek 35 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO. ...	31
Rysunek 36 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO.	32
Rysunek 37 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.....	32
Rysunek 38 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.....	33
Rysunek 39 Odpowiedź skokowa obiektu $P4(s)$ i jego aproksymacji dla $n=3$, metoda MO... ..	34
Rysunek 40 Odpowiedź skokowa obiektu $P4(s)$ i jego aproksymacji dla $n=3$, metoda SO. ...	34
Rysunek 41 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda MO.....	35
Rysunek 42 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda MO.....	35

Rysunek 43 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda SO.	36
Rysunek 44 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda SO.	36
Rysunek 45 Odpowiedź skokowa obiektu $P6(s)$ i jego aproksymacji dla $L1 = 0.01$, metoda MO.	37
Rysunek 46 Odpowiedź skokowa obiektu $P6(s)$ i jego aproksymacji dla $L1 = 0.01$, metoda SO.	38
Rysunek 47 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P6(s)$ dla $L1 = 0.01$, metoda MO.	38
Rysunek 48 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P6(s)$ dla $L1 = 0.01$, metoda MO.	39
Rysunek 49 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P6(s)$ dla $L1 = 0.01$, metoda SO... ..	39
Rysunek 50 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P6(s)$ dla $L1 = 0.01$, metoda SO.	40
Rysunek 51 Odpowiedź skokowa obiektu $P7(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 5$ i $L1 = 0.5$, metoda MO.	41
Rysunek 52 Odpowiedź skokowa obiektu $P7(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 5$ i $L1 = 0.5$, metoda SO.	41
Rysunek 53 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L1 = 0.5$, metoda MO.	42
Rysunek 54 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L1 = 0.5$, metoda MO.	42
Rysunek 55 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L1 = 0.5$, metoda SO.	43
Rysunek 56 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L1 = 0.5$, metoda SO.	43
Rysunek 57 Odpowiedź skokowa obiektu $P8(s)$ i jego aproksymacji dla $\alpha = 0.6$, metoda MO.	44
Rysunek 58 Odpowiedź skokowa obiektu $P8(s)$ i jego aproksymacji dla $\alpha = 0.6$, metoda SO.	45
Rysunek 59 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P8(s)$ dla $\alpha = 0.6$, metoda MO... ..	45
Rysunek 60 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P8(s)$ dla $\alpha = 0.6$, metoda MO.	46
Rysunek 61 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P8(s)$ dla $\alpha = 0.6$, metoda SO. ...	46

1. Opis teoretyczny wykorzystanych metod.

W niniejszym rozdziale zostaną opisane dwie zastosowane w projekcie metody strojenia regulatorów: Modulus Optimum oraz Symmetrical Optimum. Obie wymienione metody zostały zastosowane do nastrojenia regulatora PI dla obiektów z poniższej tabeli.

Tabela 1. Zestawienie obiektów wykorzystanych w projekcie.

Transmitancja obiektu	Parametry obiektu
$P_1(s) = \frac{e^{-s}}{1 + sT}$	$T = 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.5, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000$
$P_2(s) = \frac{e^{-s}}{(1 + sT)^2}$	$T = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.5, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 50, 100, 200, 500$
$P_3(s) = \frac{e^{-s}}{(1 + sT)(1 + sT)^2}$	$T = 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 2, 5, 10$
$P_4(s) = \frac{1}{(1 + sT)^n}$	$n = 3, 4, 5, 6, 7, 8$
$P_5(s) = \frac{1}{(1 + s)(1 + \alpha s)(1 + \alpha^2 s)(1 + \alpha^3 s)}$	$\alpha = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$
$P_6(s) = \frac{e^{-sL_1}}{s(1 + sT)}$	$L_1 = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$ $T_1 + L_1 = 1$
$P_7(s) = \frac{Te^{-sL_1}}{(1 + sT)(1 + sT_1)}$	$T = 1, 2, 5, 10 \quad T_1 + L_1 = 1$ $L_1 = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$
$P_8(s) = \frac{1 - \alpha s}{(s + 1)^3}$	$\alpha = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1$
$P_9(s) = \frac{1}{(1 + s)((sT)^2 + 1.4sT + 1)}$	$T = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$

1.1. Opis metody Modulus Optimum - kryterium modułu.

„Idealny układ regulacji powinien wiernie odwzorowywać sygnał wejściowy, czyli powinien spełniać warunek $y(t) = x(t)$. Wynika stąd następująca zależność na transmitancję układu zamkniętego:

$$G_z(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = 1 \quad (1)$$

W praktyce nie jest na ogół możliwe zrealizowanie regulatora o transmitancji spełniającej powyższy warunek. Dlatego korzysta się z kryterium modułu wyrażonego następującą zależnością:

$$|G_z(s)| \approx 1 \quad (2)$$

co oznacza, że amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa powinna w możliwie szerokim paśmie częstotliwości mieć wartość stałą równą jedności.” [1]

Prowadzi to w konsekwencji do wzoru określanego, jako kryterium modułu optymalnego:

$$\left(\frac{d^{2n}|G_z(\omega)|}{d\omega^{2n}} \right)_{\omega=0} = 0 \quad (3)$$

„W praktyce stosuje się często uproszczone kryterium modułu, polegające na skompensowaniu przy pomocy regulatora pewnej liczby dominujących stałych czasowych obiektu.” [1]

Idea zastosowania tej metody polega na sprowadzeniu obiektu do postaci:

$$G(s) = K \frac{1}{1 + sT_1} \cdot \frac{1}{1 + sT_\sigma} \quad (4)$$

gdzie:

T_1 – jedyna znacząca (duża) stała czasowa

T_σ – suma zastępcza pozostałych (małych) stałych czasowych

W celu skompensowania stałej czasowej T_1 stosuje się regulator w postaci:

$$G_R(s) = K_R \frac{1 + sT_R}{sT_R} \quad (5)$$

dla którego przyjmuje się:

$$T_R = T_1 \quad (6)$$

Analiza transmitancji układu zamkniętego przy zachowaniu zależności (2) oraz (6) prowadzi do poniższego wzoru na wzmocnienie regulatora:

$$K_R = \frac{T_1}{2KT_\sigma} \quad (7)$$

Wzory (6) i (7) zostały bezpośrednio zaimplementowane do regulatora PI w projekcie.

1.2. Opis metody Symmetrical Optimum – kryterium symetrii.

„Określanie nastaw według tzw. kryterium symetrii stosuje się w przypadku obiektu, którego transmitancję można zapisać, jako połączenie członu całkującego oraz zastępczej małej stałej czasowej T_σ .” [1]

$$G(s) = K \frac{1}{sT_0} \cdot \frac{1}{1 + sT_\sigma} \quad (8)$$

Dla regulatora o transmitancji opisanej zależnością (5), na podstawie transmitancji obiektu zamkniętego wyprowadzone zostały wzory na współczynniki regulatora:

$$T_R = 4T_\sigma, \quad K_R = \frac{T_0}{2KT_\sigma} \quad (9),(10)$$

„Wprowadzenie zmiennej $q = 2T_\sigma s$ daje standardową postać transmitancji zamkniętego układu regulacji III rzędu z regulatorem nastawionym według kryterium symetrii:

$$G_z(q) = \frac{1 + 2q}{1 + 2q + 2q^2 + q^3} \quad (11)$$

Nazwa kryterium jest związana z faktem, że powyższa funkcja spełnia warunki symetrii:” [1]

$$G_z(q)G_z(1/q) = 1, \quad G_z(q) + G_z(1/q) = 1 \quad (12)$$

Wzory (9) i (10) zostały bezpośrednio zaimplementowane do regulatora PI w projekcie.

2. Realizacja projektu.

Zrealizowany projekt można podzielić na kilka głównych części:

- Wyznaczenie transmitancji obiektów
- Wyznaczenie obiektów aproksymowanych obiektem (4) dla metody MO
- Wyznaczenie obiektów aproksymowanych obiektem (8) dla metody SO
- Wyznaczenie regulatora PI dla metody MO
- Wyznaczenie regulatora PI dla metody SO

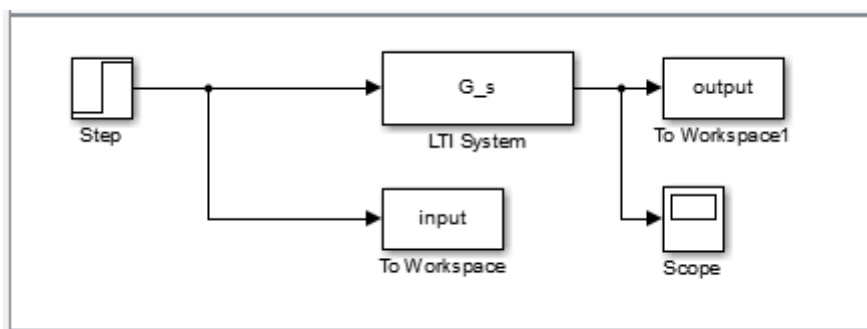
Wyżej wymienione części zostały opisane w kolejnych podrozdziałach.

2.1. Wyznaczenie transmitancji obiektów.

W celu utworzenia transmitancji obiektów opisanych w Tabeli 1 utworzony został skrypt ***Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..*** Na początku zostały wprowadzane wektory parametrów dla każdego obiektu, a następnie przy pomocy funkcji ***tf*** utworzone zostały transmitancje.

2.2. Wyznaczenie obiektów aproksymowanych dla metody MO.

Do wyznaczenia przybliżeń obiektów, uwzględnionych w projekcie, wykorzystana została funkcja ***procest***. Jako parametry podawane były dane o wejściu i wyjściu w postaci obiektu wyjściowego z funkcji ***iddata***. Jako drugi parametr podawany był ciąg znaków ***'P2'*** określający postać aproksymacji (obiekt inercyjny drugiego rzędu). Na poniższym rysunku przedstawiony został model utworzony w Simulinku, generujący dane wejściowe dla funkcji ***iddata***.



Rysunek 1. Model układu generującego dane dla funkcji *iddata*. Plik *tf_est.slx*.

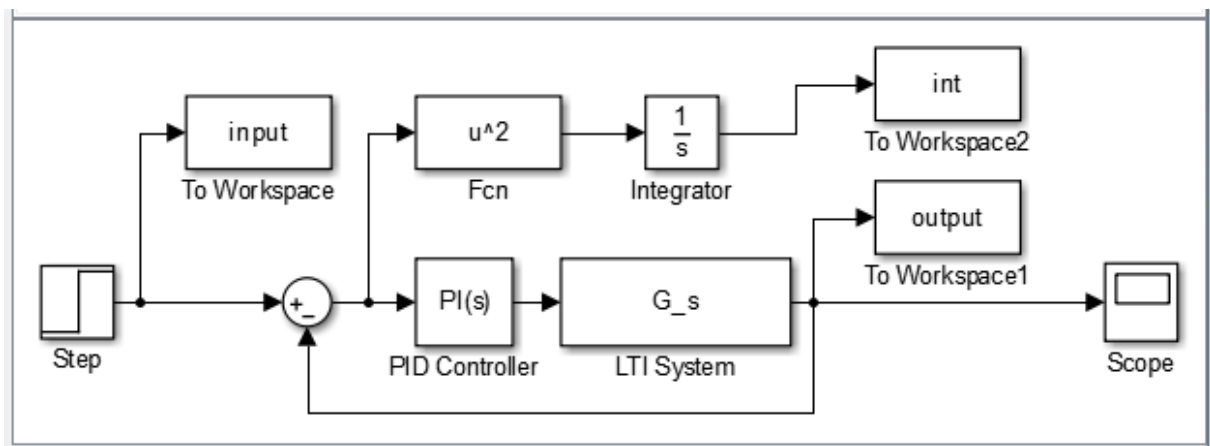
Dodatkowo został narysowany wykres odpowiedzi skokowej dla każdego aproksymowanego obiektu oraz obiektu oryginalnego.

2.3. Wyznaczenie obiektów aproksymowanych dla metody SO.

Wyznaczenie aproksymowanych obiektów dla metody Symmetrical Optimum przebiegało analogicznie jak opisane w podrozdziale 2.2. Jedyną różnicą był drugi parametr podawany do funkcji *procest*. Ponieważ w przypadku tej metody obiekt oryginalny należało aproksymować obiektem inercyjnym z całkowaniem drugim parametrem był łańcuch znaków **'PII'**.

2.4. Wyznaczenie regulatora PI dla metody MO.

Aby w prosty sposób wyznaczać regulator PI dla danego obiektu została napisana funkcja *set_controller_MO*, przyjmująca jako parametr transmitancję obiektu, natomiast wartością zwracaną były parametry regulatora K_R oraz T_R , wyznaczone ze wzorów (6),(7). Następnie uruchamiany był model przeprowadzający symulację regulatora. Wykorzystany w tym celu model przedstawiony został na Rysunek 2.



Rysunek 2. Model do symulacji układu sterowania. Plik object.slx.

Po przeprowadzeniu symulacji rysowany był wykres wartości zadanej oraz wyjścia z obiektu w funkcji czasu. Dodatkowo dla każdej symulacji został policzony wskaźnik jakości, jako całka z kwadratu uchybu.

2.5. Wyznaczenie regulatora PI dla metody SO.

Aby wyznaczyć regulator PI w przypadku metody Symmetrical Optimum została stworzona funkcja *set_controller_SO*. Również w tym przypadku przyjmowała ona jako argument transmitancję obiektu, oraz zwracała parametry regulatora K_R oraz T_R . Zaimplementowane wewnątrz funkcji wzory były zgodne z (9),(10). Wyznaczony w ten sposób regulator był testowany dla każdego obiektu w modelu *object.slx*.

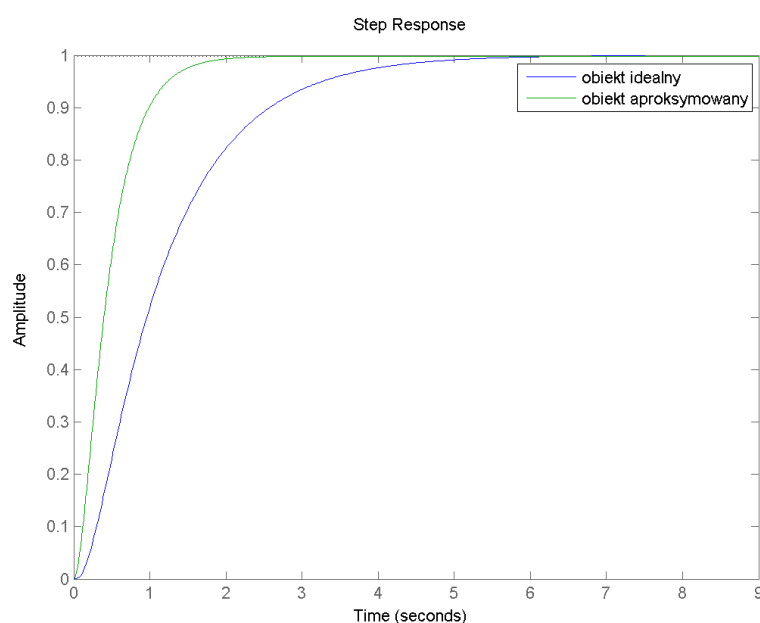
3. Przebieg symulacji.

W tym rozdziale zostaną przedstawione niektóre wyniki symulacji dla wyznaczonych regulatorów PI. Ze względu na prostotę metody, oraz często występującą małą dokładność aproksymacji ściśle określonymi obiektami, wiele wyników prowadziło do utraty stabilności układu regulacji.

3.1. Obiekt $P_5(s)$ dla parametru $\alpha = 0.2$.

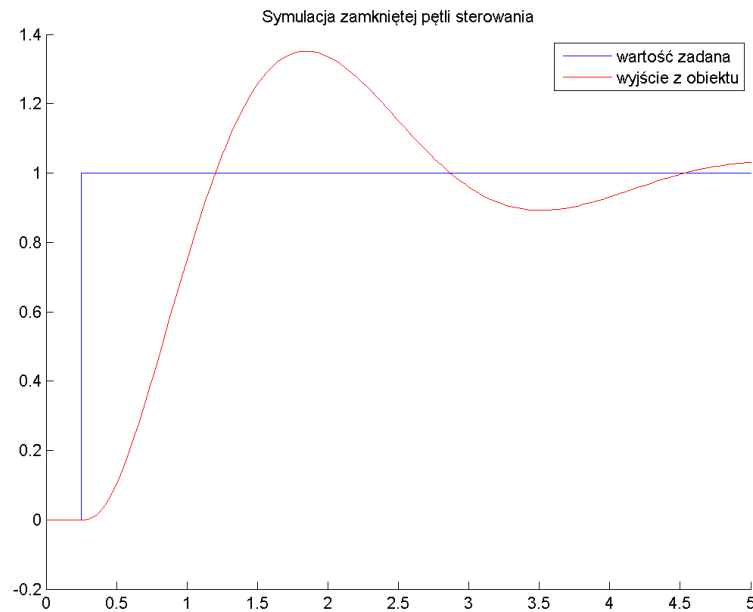
Na pierwszy wykresie w tym rozdziale przedstawione zostały odpowiedzi skokowe obiektu i jego aproksymacji dla metody MO:

$$P_5(s) = \frac{1}{(1+s)(1+0.2s)(1+0.2^2s)(1+0.2^3s)}$$
$$\widetilde{P}_5(s) = \frac{0.9983}{(1+0.3465s)(1+0.1431s)}$$

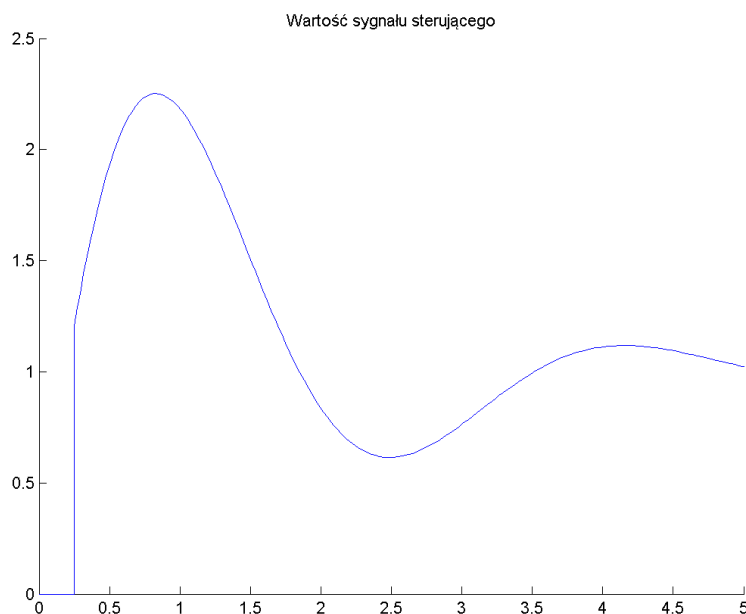


Rysunek 3. Odpowiedź skokowa obiektu i jego aproksymacji. Obiekt $P_5(s)$, $\alpha = 0.2$, metoda MO.

Na rysunku 4 przedstawiony został wykres wartości zadanej oraz wyjścia z obiektu.



Rysunek 4 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda MO.

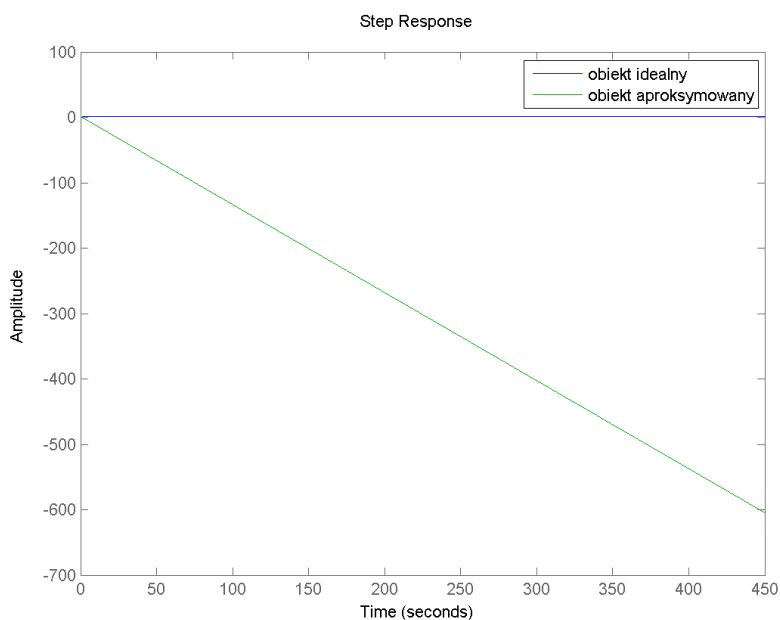


Rysunek 5 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda MO.

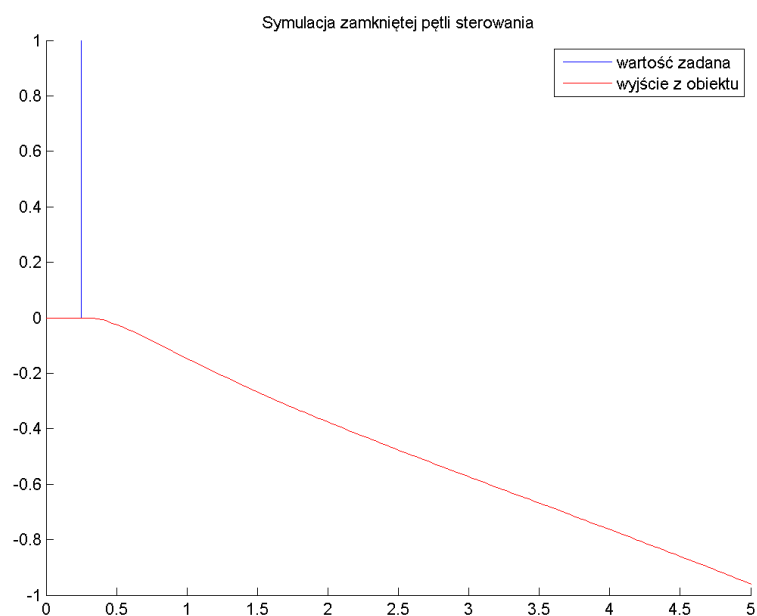
Jak widać przybliżenie obiektu było wystarczająco dokładne aby obiekt udało się ustabilizować. Całkowy wskaźnik jakości w tym przypadku osiągnął wartość 10.8825. Dla porównania poniżej przedstawiono wykresy dla tego samego obiektu podczas strojenia metodą SO.

Obiekt wyznaczony poprzez aproksymację:

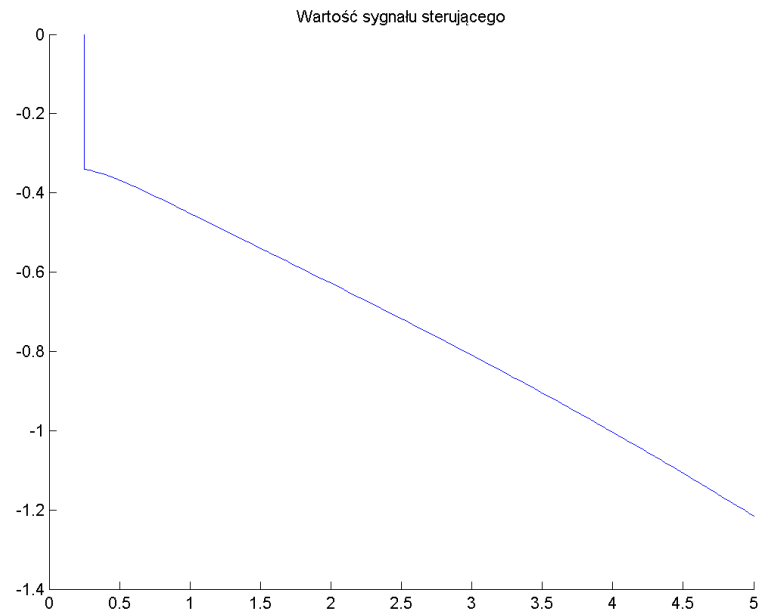
$$\widetilde{P}_5(s) = \frac{-1.3461}{s(1 + 1.0926s)}$$



Rysunek 6. Odpowiedź skokowa obiektu i jego aproksymacji. Obiekt $P_5(s)$, $\alpha = 0.2$, metoda SO.



Rysunek 7. Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P_5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda SO.



Rysunek 8 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P5(s)$ dla $\alpha = 0.2$, metoda SO.

Jak widać na powyższych wykresach, zmiana metody doprowadziła do błędnej aproksymacji, a co za tym idzie, sterowany obiekt uległ destabilizacji oraz osiągnął wartości nieakceptowalne w realnym zastosowaniu.

3.2. Obiekt $P_9(s)$ dla parametru $T = 0.1$.

Analizowany w tym rozdziale obiekt był opisany transmitancją:

$$P_9(s) = \frac{1}{(1+s)((0.1s)^2 + 0.14sT + 1)}$$

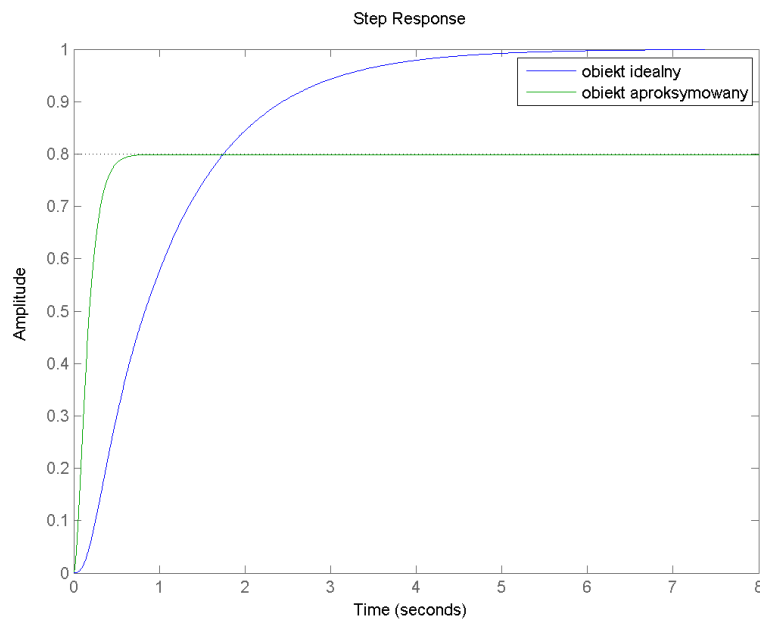
Jego aproksymacja dla metody MO wynosiła:

$$\widetilde{P}_9(s) = \frac{0.9983}{(1 + 0.3465s)(1 + 0.1431s)}$$

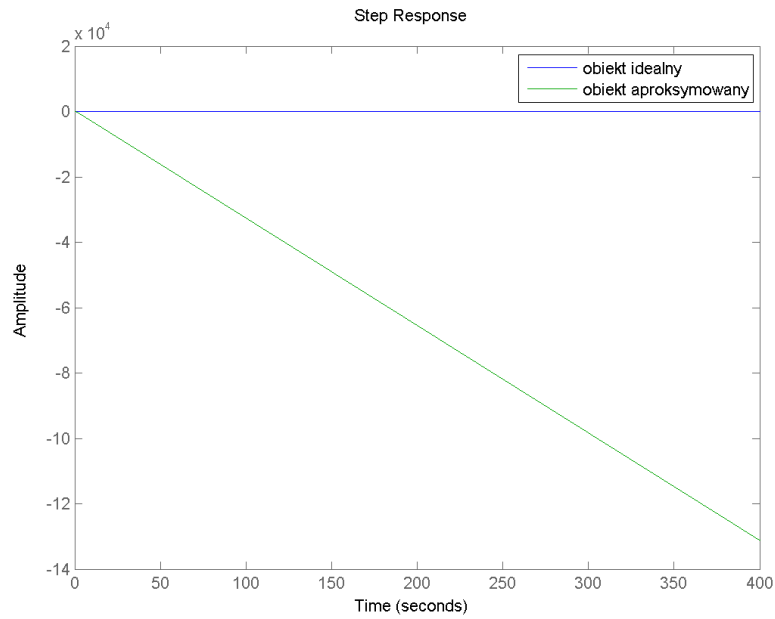
natomiast dla metody SO:

$$\widetilde{P}_9(s) = \frac{-1.3461}{s(1 + 1.0926s)}$$

Zachowanie się obiektu i jego aproksymacji zostało przedstawione na rysunku 7.



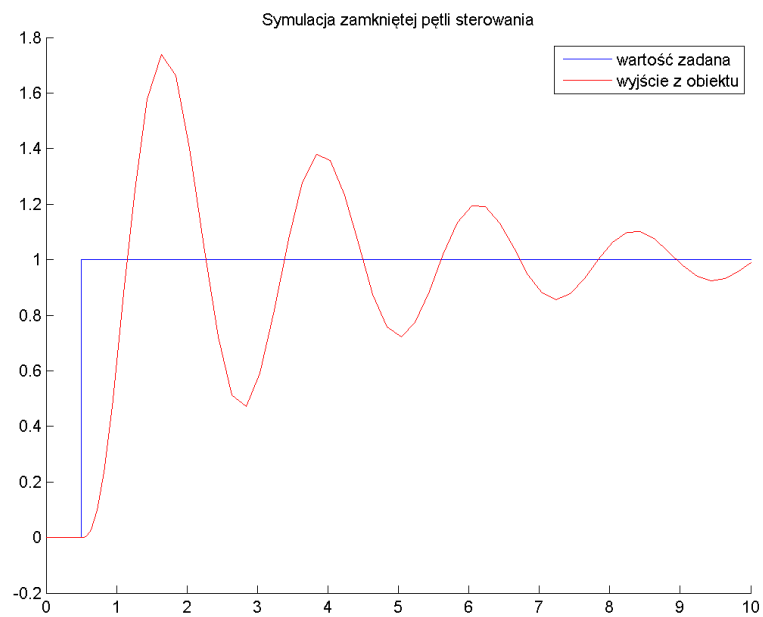
Rysunek 9 Odpowiedź skokowa obiektu $P_9(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.1$, metoda MO.



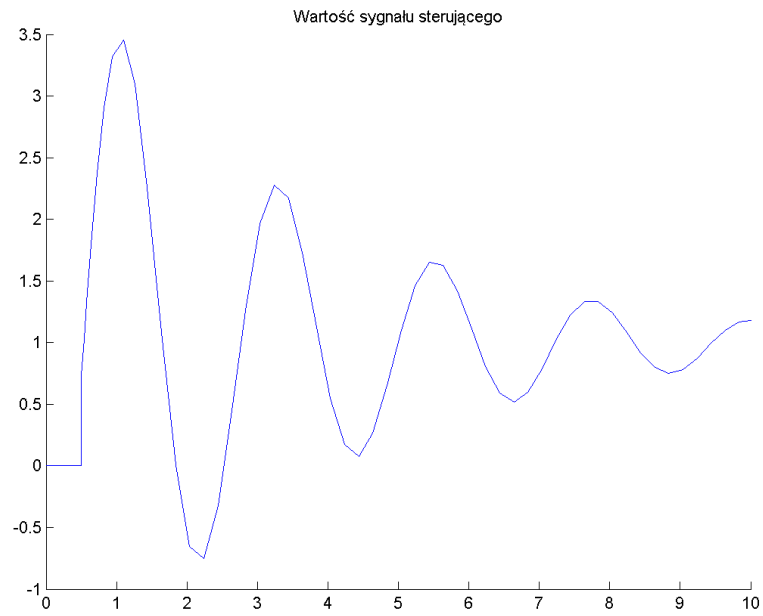
Rysunek 10. Odpowiedź skokowa obiektu $P9(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.1$, metoda SO.

Aproksymacja danego obiektu za pomocą obiektu drugiego rzędu dała znacząco lepsze wyniki, niż aproksymacja obiektem inercyjnym z całkowaniem.

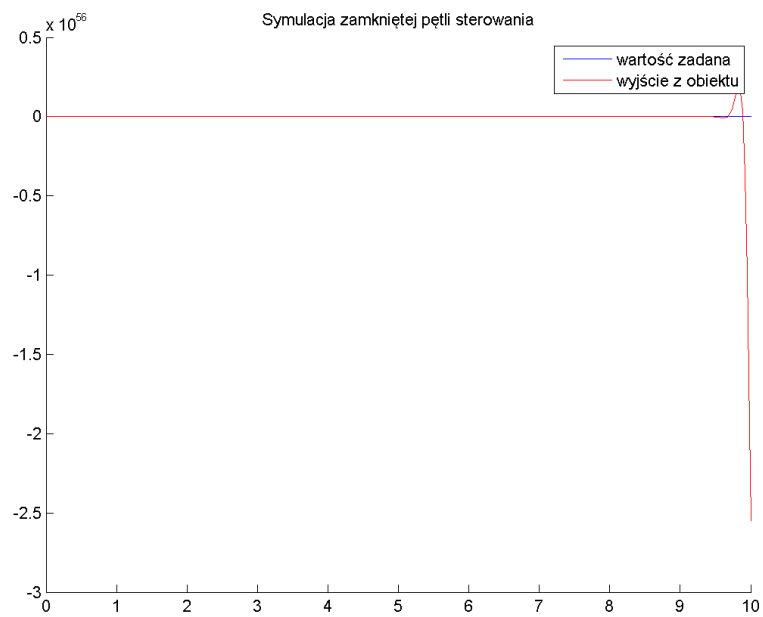
Poniżej przedstawiono wykresy wartości zadanej i wyjścia z obiektu dla obu metod.



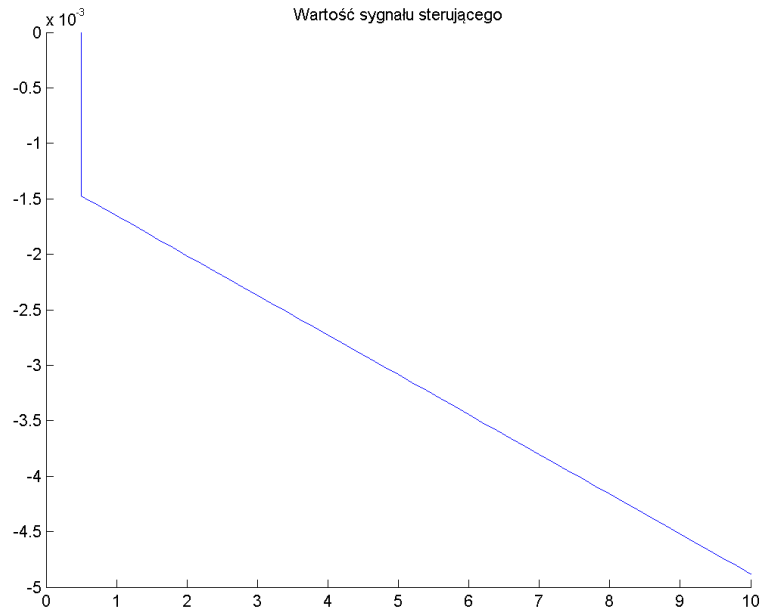
Rysunek 11. Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda MO.



Rysunek 12 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda MO.



Rysunek 13. Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda SO.



Rysunek 14 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P9(s)$ dla $T = 0.1$, metoda SO.

Również w tym przypadku ze względu na lepszą aproksymację obiektem inercyjnym drugiego rzędu, metoda MO doprowadziła do ustabilizowania obiektu, natomiast metoda SO spowodowała, iż regulator doprowadził do utraty stabilności. Dla pierwszej metody wskaźnik jakości wyniósł 9.55 natomiast ze względu na brak stabilności w drugiej metodzie wskaźnik jakości nie może być brany pod uwagę.

3.3. Obiekt $P_1(s)$ dla parametru $T = 0.02$.

Obiekt dokładny:

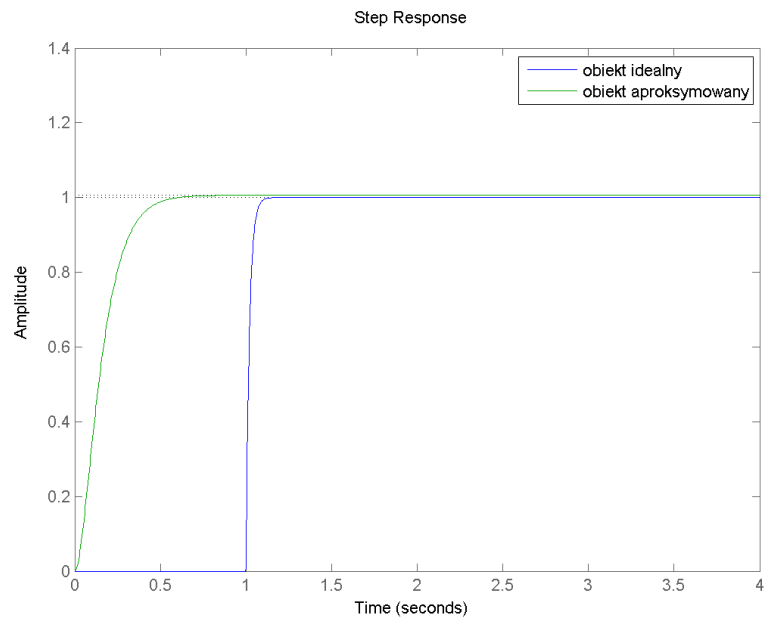
$$P_1(s) = \frac{e^{-s}}{1 + 0.02s}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

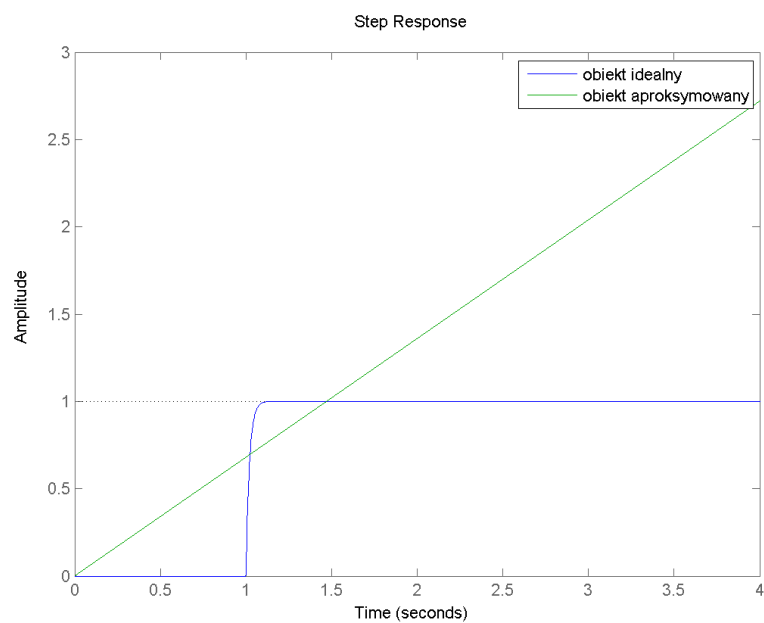
$$\widetilde{P}_1(s) = \frac{1.0061}{(1 + 0.0837s)(1 + 0.0832s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

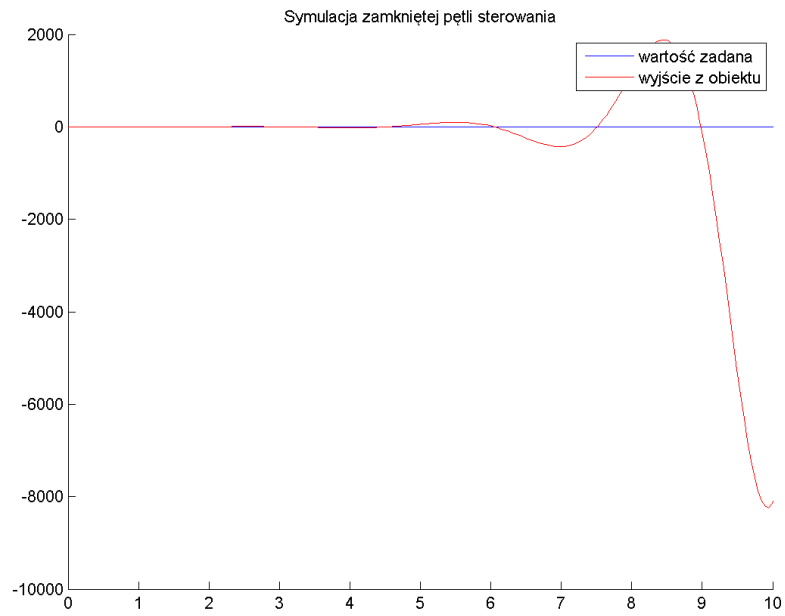
$$\widetilde{P}_1(s) = \frac{0.6798}{s(1 + 0.00046s)}$$



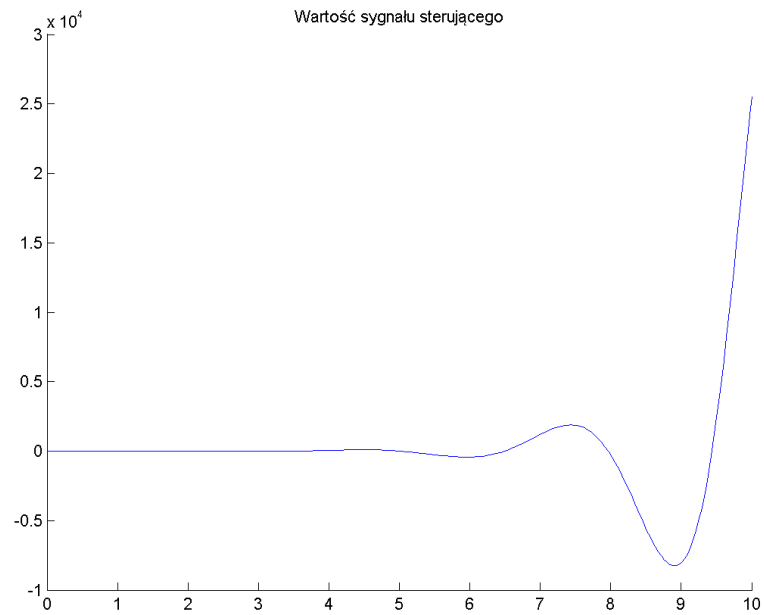
Rysunek 15 Odpowiedź skokowa obiektu $P1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.02$, metoda MO.



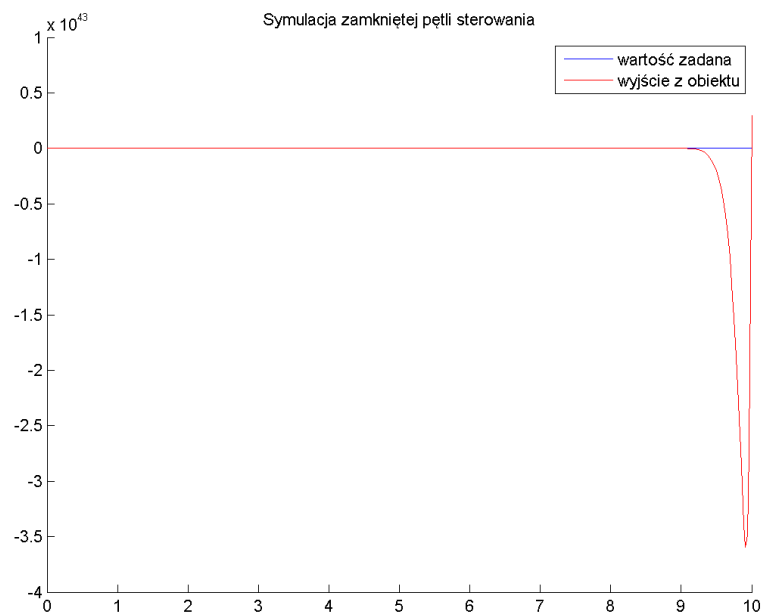
Rysunek 16 Odpowiedź skokowa obiektu $P1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.02$, metoda SO.



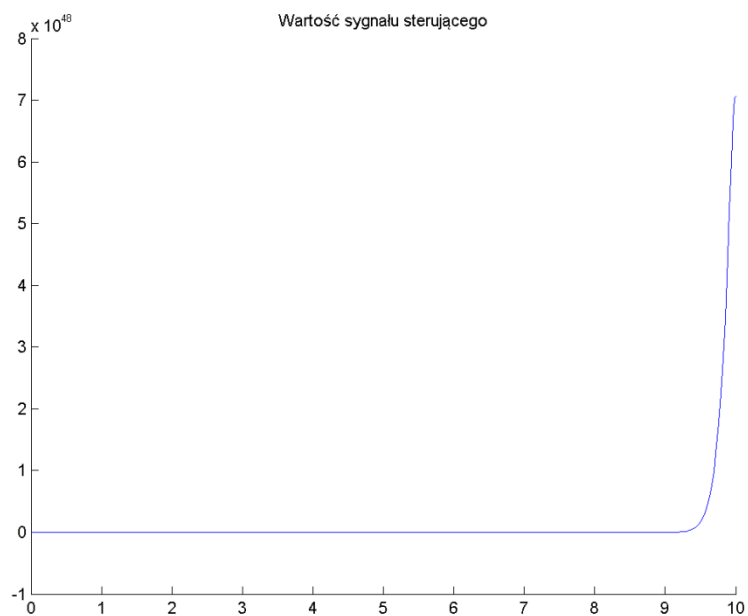
Rysunek 17 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda MO.



Rysunek 18 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda MO.



Rysunek 19 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda SO.



Rysunek 20 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.02$, metoda SO.

3.4. Obiekt $P_1(s)$ dla parametru $T = 0.05$.

Obiekt dokładny:

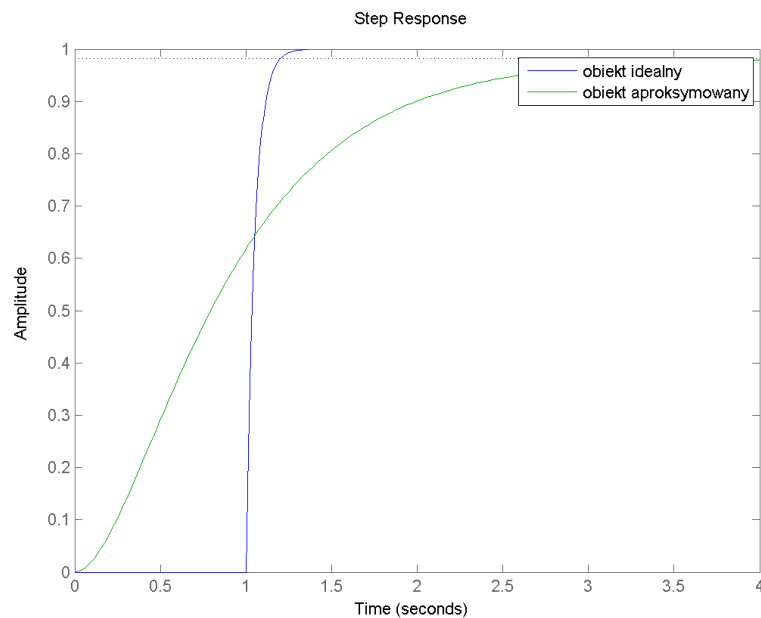
$$P_1(s) = \frac{e^{-s}}{1 + 0.05s}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

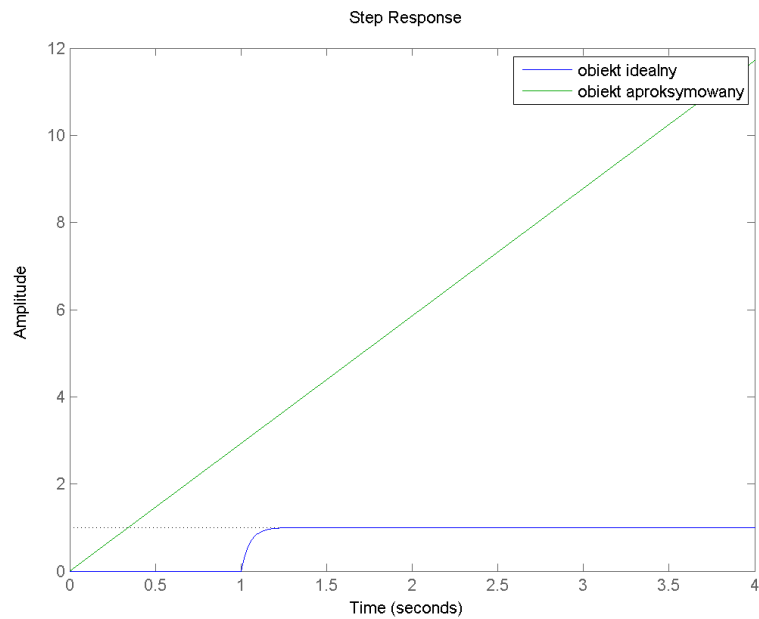
$$\widetilde{P}_1(s) = \frac{0.9824}{(1 + 0.3213s)(1 + 0.6299s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

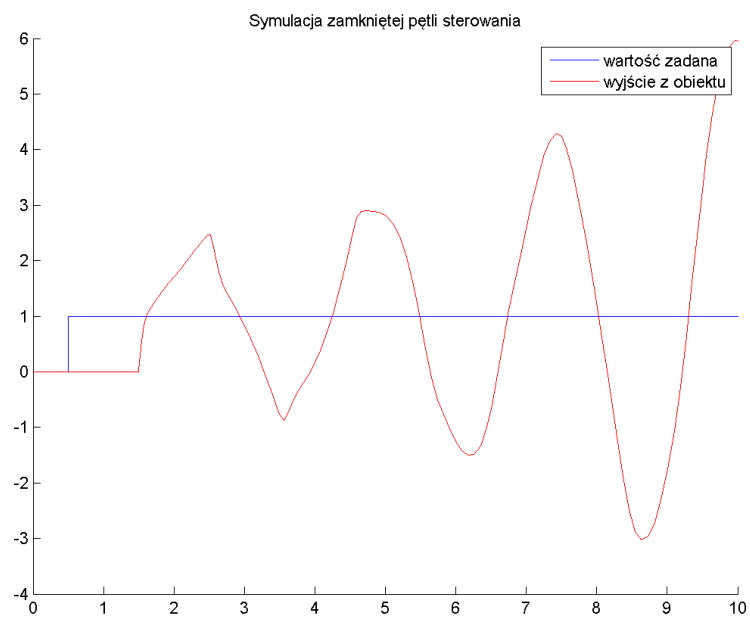
$$\widetilde{P}_1(s) = \frac{2.928}{s(1 + 0.0016s)}$$



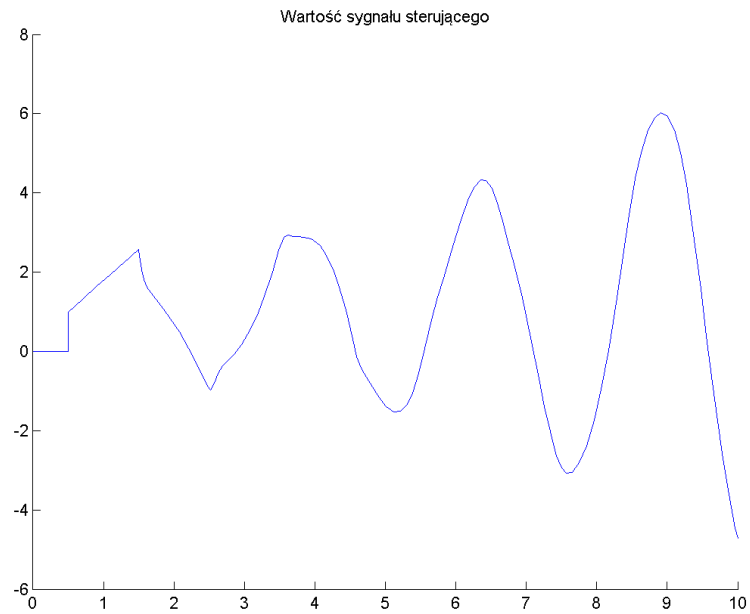
Rysunek 21 Odpowiedź skokowa obiektu $P_1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda MO.



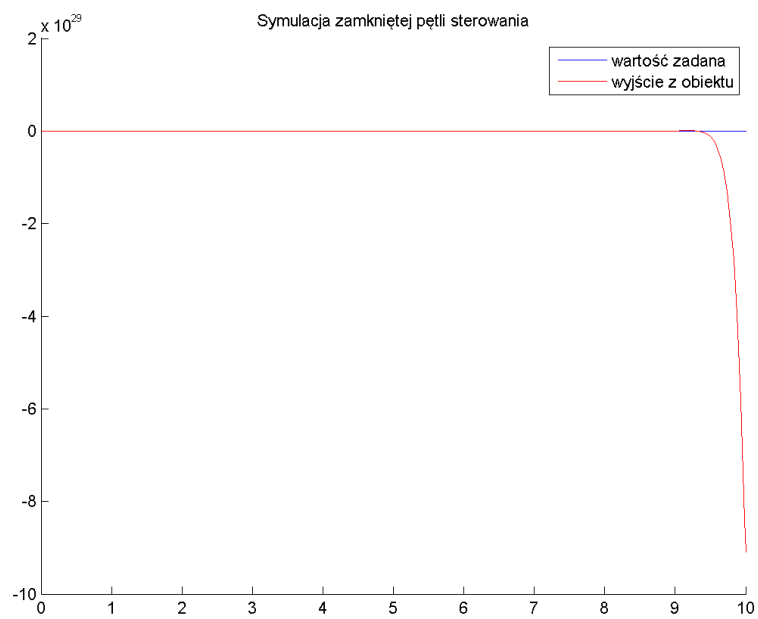
Rysunek 22 Odpowiedź skokowa obiektu $P1(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda SO.



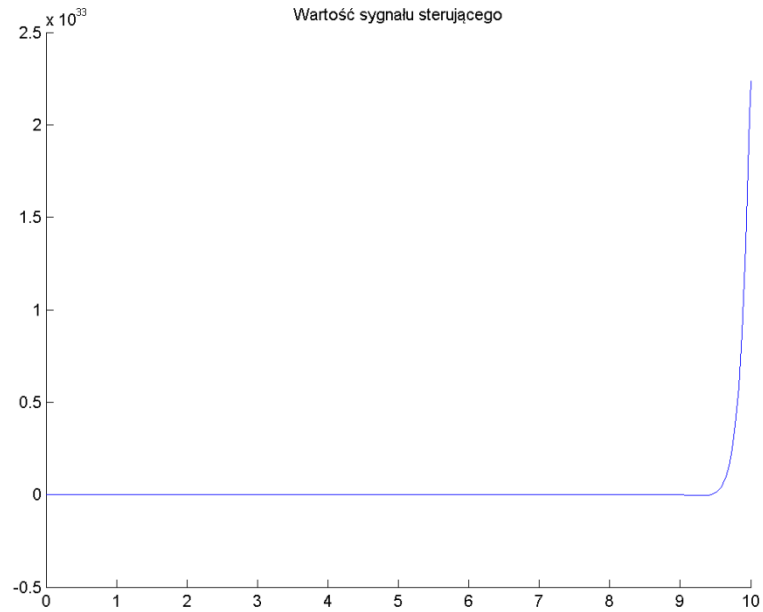
Rysunek 23 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO.



Rysunek 24 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO.



Rysunek 25 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.



Rysunek 26 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P_1(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.

3.5. Obiekt $P_2(s)$ dla parametru $T = 1.5$.

Obiekt dokładny:

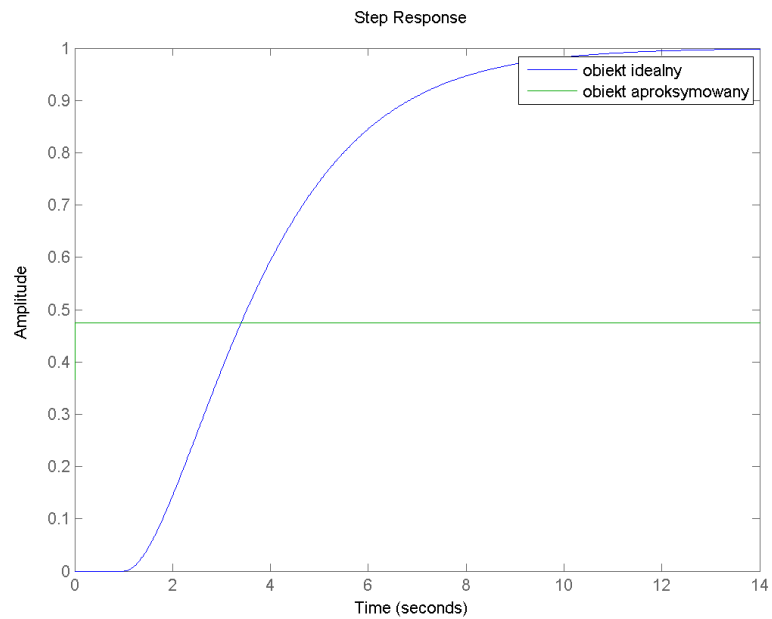
$$P_2(s) = \frac{e^{-s}}{(1 + sT)^2}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

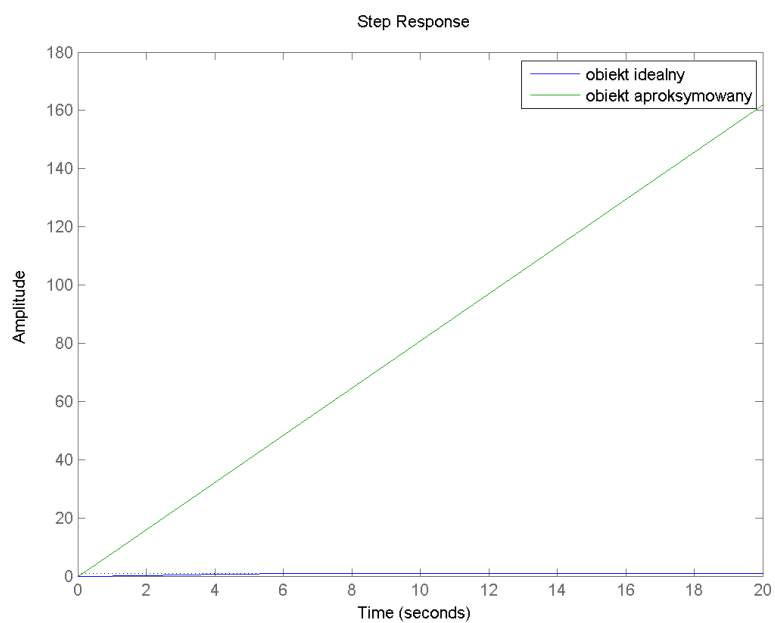
$$\widetilde{P}_2(s) = \frac{0.4745}{(1 + 0.000001s)(1 + 0.000001s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

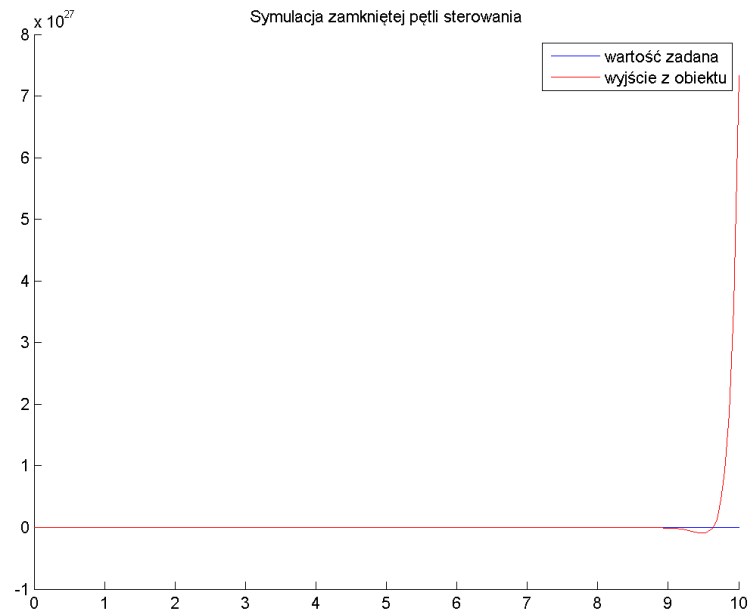
$$\widetilde{P}_2(s) = \frac{8.1073}{s(1 + 0.049s)}$$



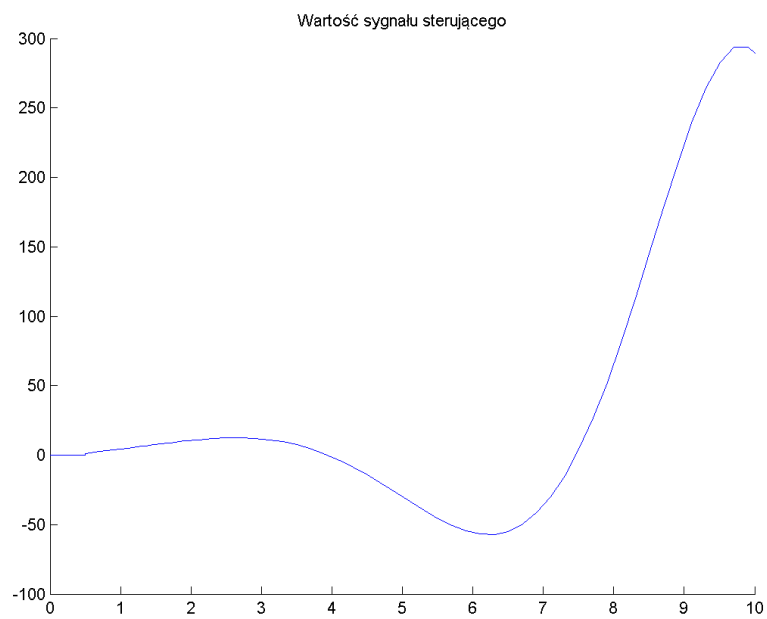
Rysunek 27 Odpowiedź skokowa obiektu $P2(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 1.5$, metoda MO.



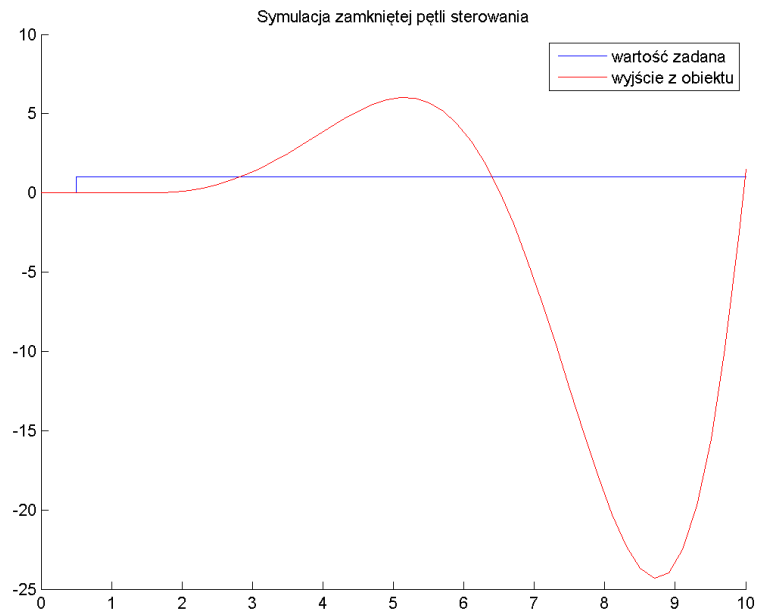
Rysunek 28 Odpowiedź skokowa obiektu $P2(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 1.5$, metoda SO.



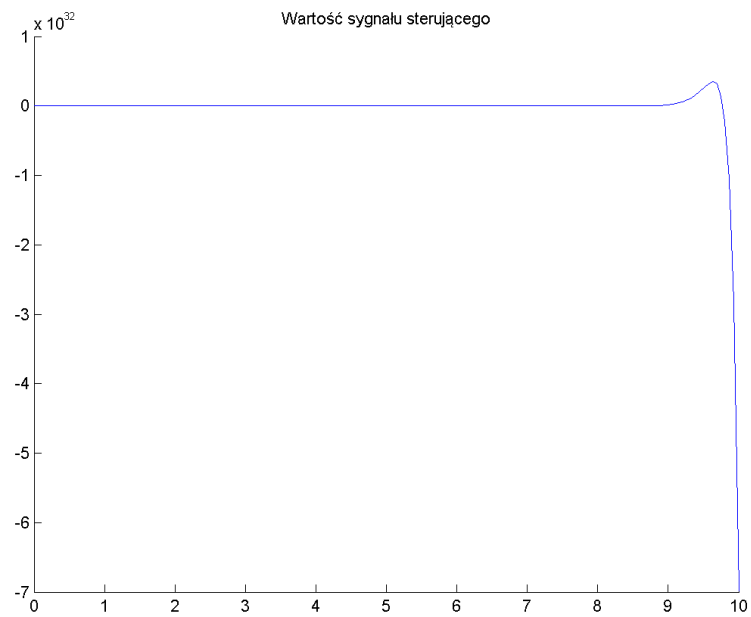
Rysunek 29 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu P2(s) dla $T = 1.5$, metoda MO.



Rysunek 30 Wykres wartości sterowania dla obiektu P2(s) dla $T = 1.5$, metoda MO.



Rysunek 31 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P2(s)$ dla $T = 1.5$, metoda SO.



Rysunek 32 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P2(s)$ dla $T = 1.5$, metoda SO.

3.6. Obiekt $P_3(s)$ dla parametru $T = 0.05$.

Obiekt oryginalny:

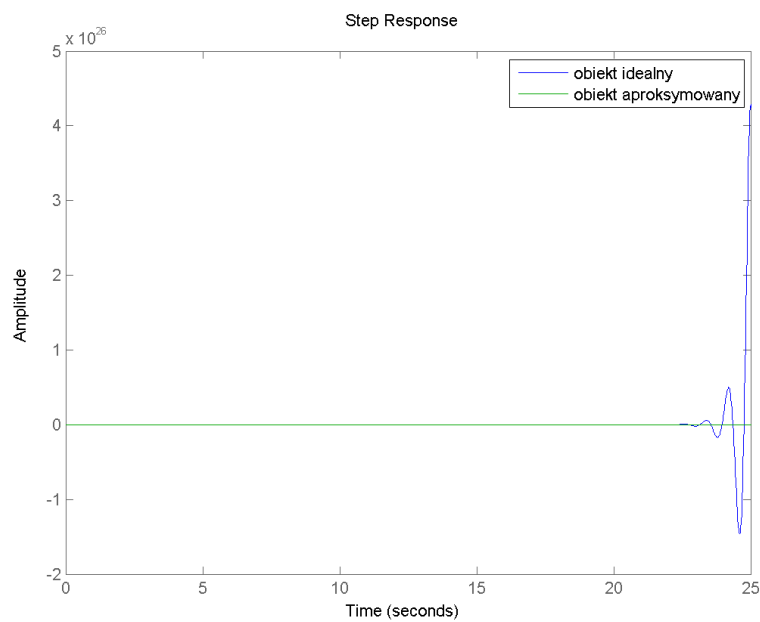
$$P_3(s) = \frac{e^{-s}}{(1 + 0.05s)(1 + 0.05s)^2}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

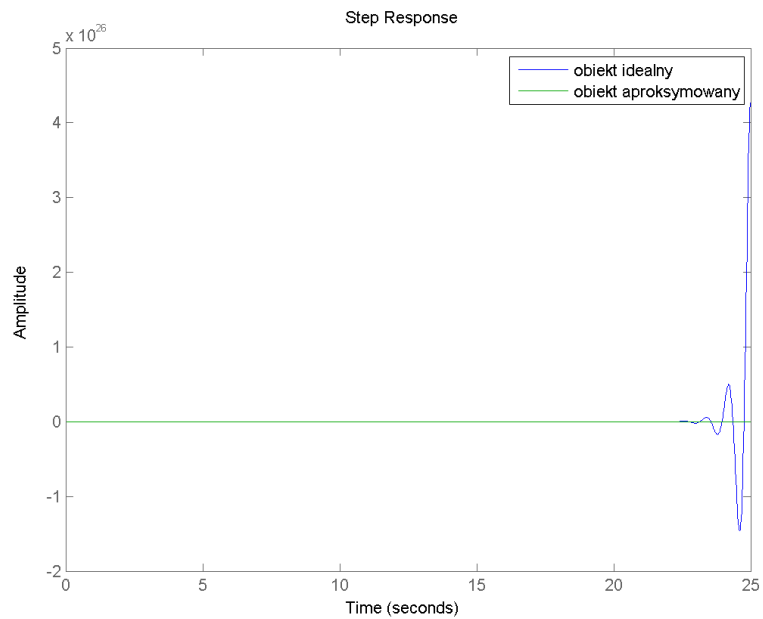
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{2.89e10}{(1 + 5.26e3s)(1 + 2.2e - 9s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

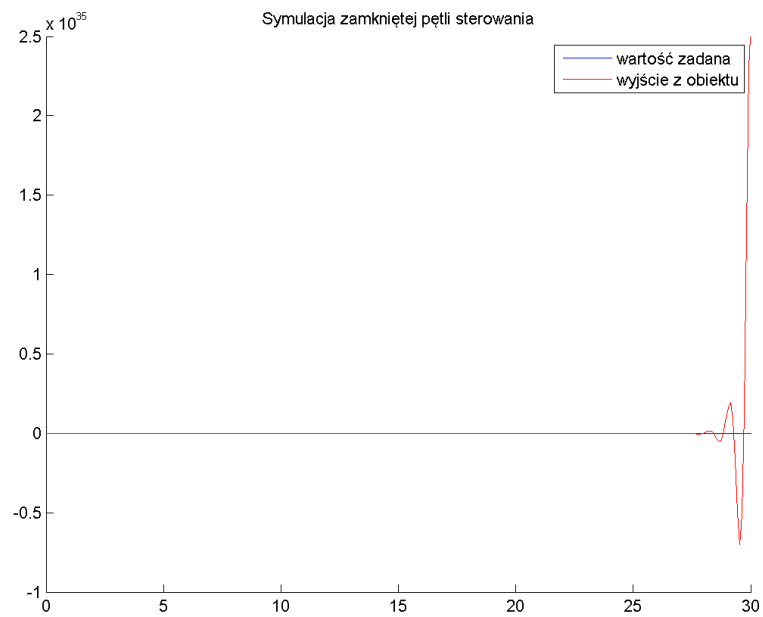
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{-3.23e23}{s(1 + 0.000001s)}$$



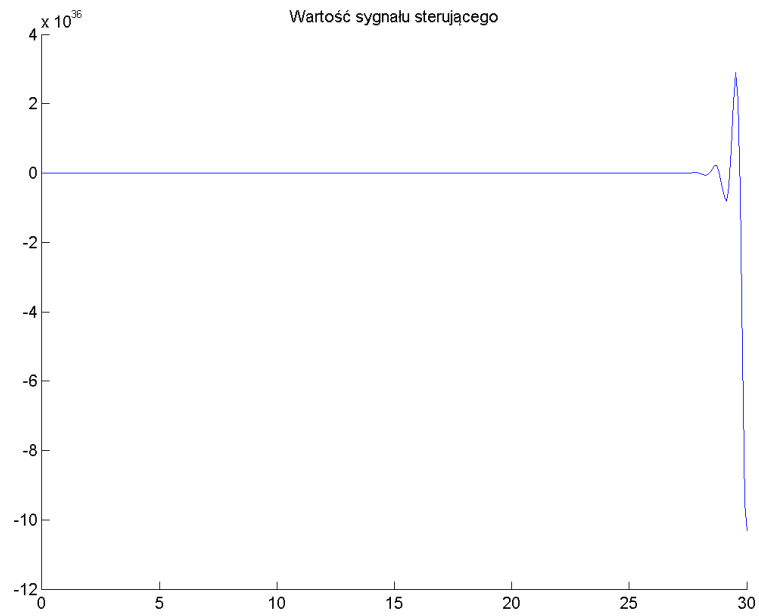
Rysunek 33 Odpowiedź skokowa obiektu $P_3(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda MO.



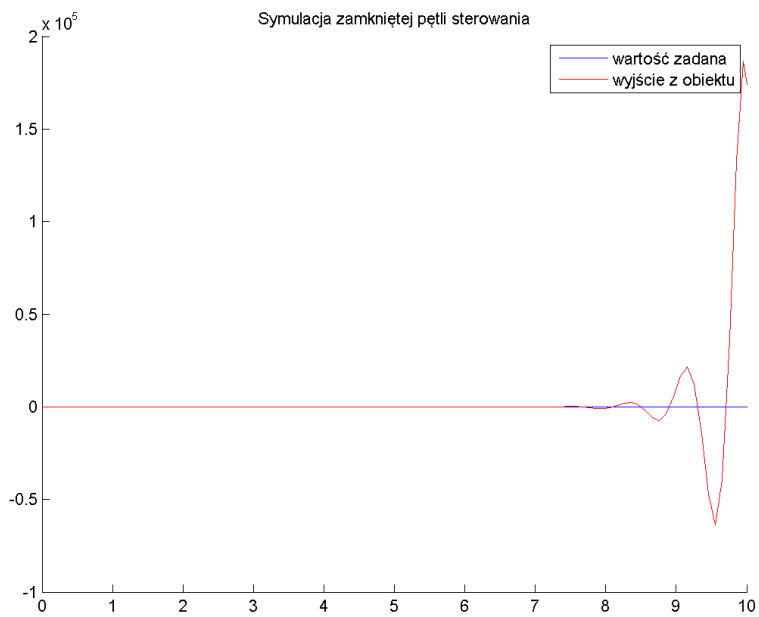
Rysunek 34 Odpowiedź skokowa obiektu $P3(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 0.05$, metoda SO.



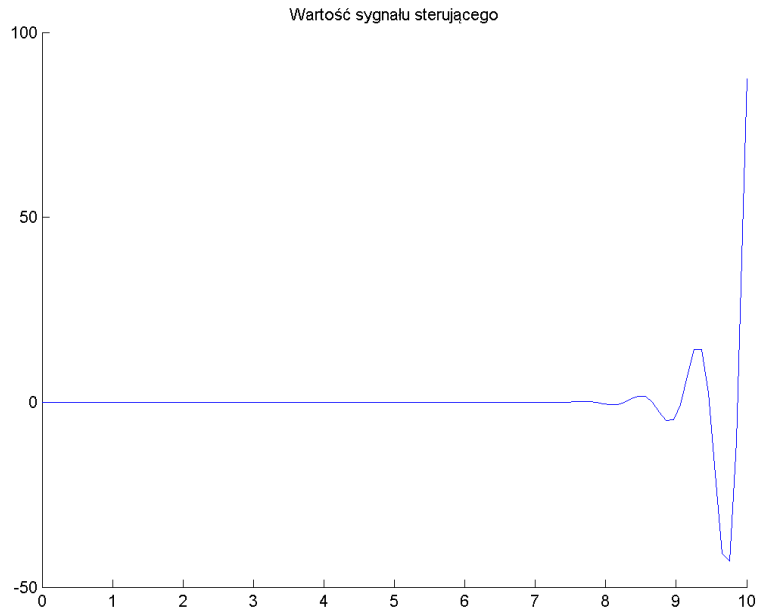
Rysunek 35 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO.



Rysunek 36 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda MO.



Rysunek 37 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.



Rysunek 38 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P_3(s)$ dla $T = 0.05$, metoda SO.

3.7. Obiekt $P_4(s)$ dla parametru $n=3$.

Obiekt oryginalny:

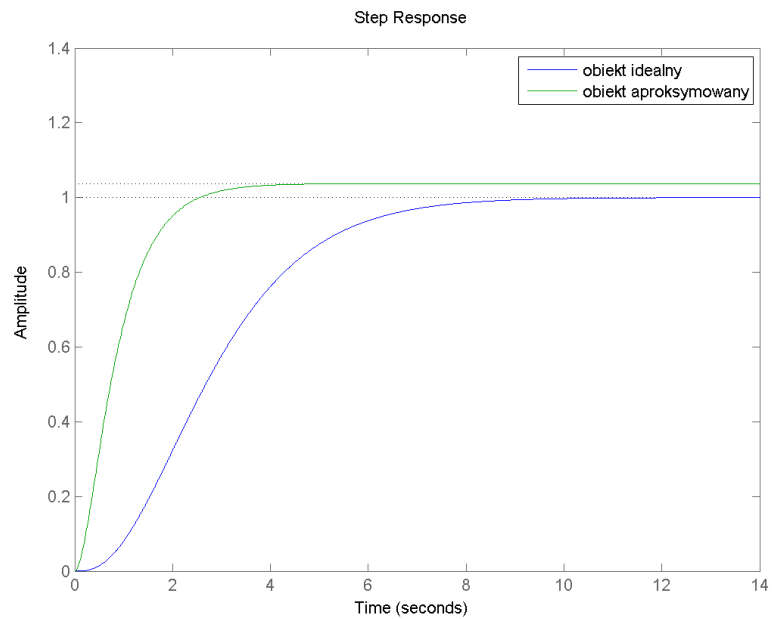
$$P_4(s) = \frac{1}{(1 + sT)^3}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

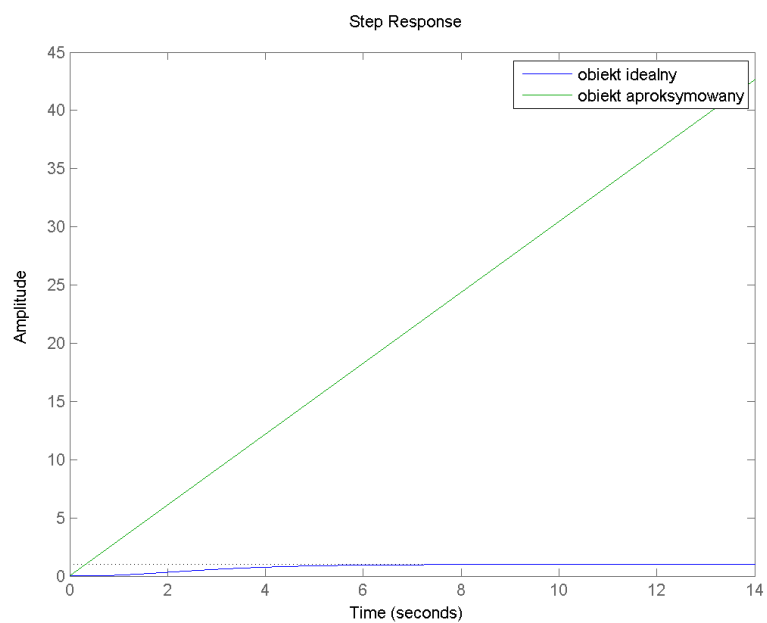
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{1.0373}{(1 + 0.2774s)(1 + 0.6629s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

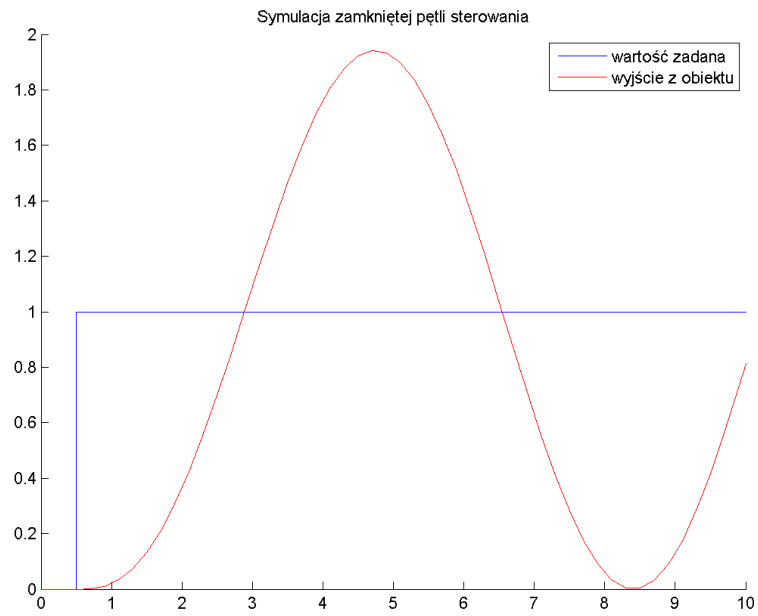
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{3.0441}{s(1 + 0.00044s)}$$



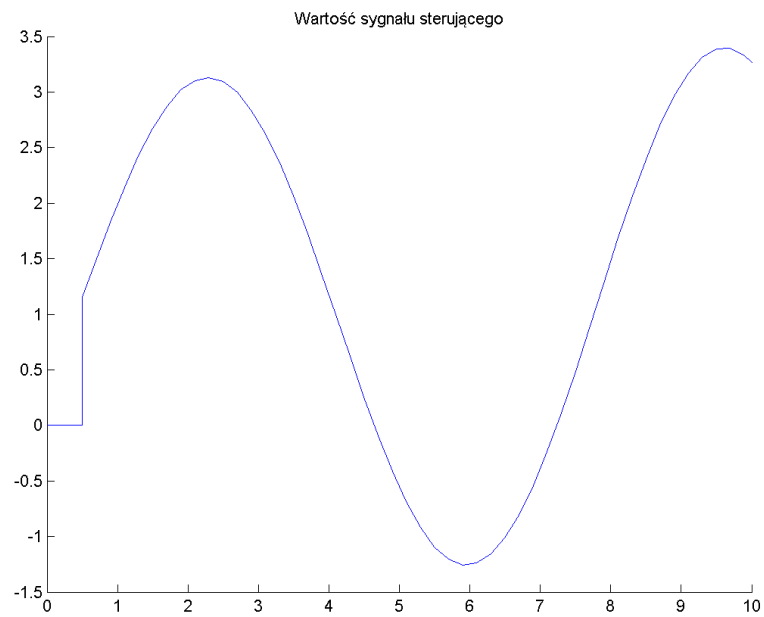
Rysunek 39 Odpowiedź skokowa obiektu $P4(s)$ i jego aproksymacji dla $n=3$, metoda MO.



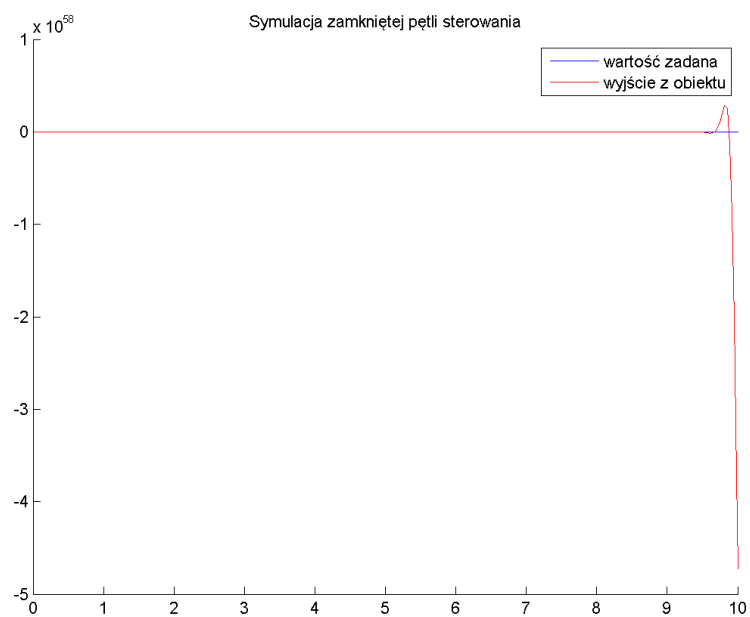
Rysunek 40 Odpowiedź skokowa obiektu $P4(s)$ i jego aproksymacji dla $n=3$, metoda SO.



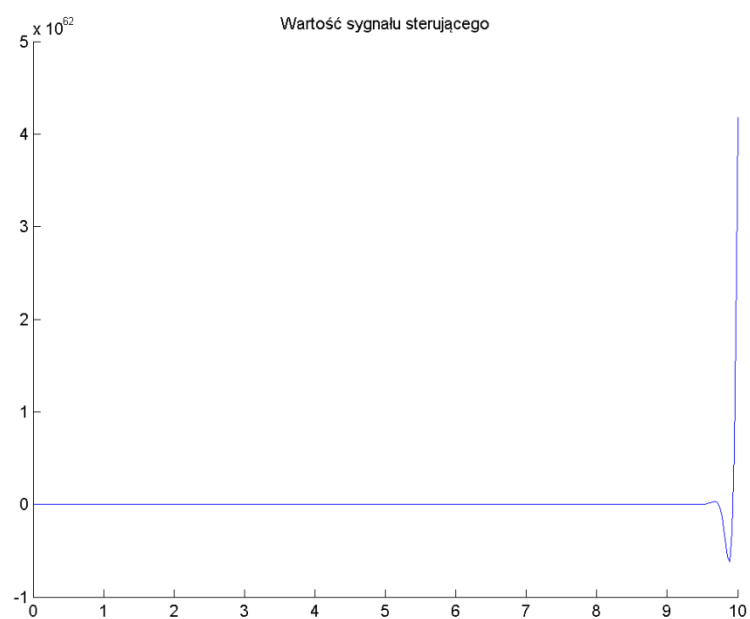
Rysunek 41 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda MO.



Rysunek 42 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda MO.



Rysunek 43 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda SO.



Rysunek 44 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P4(s)$ dla $n=3$, metoda SO.

3.8. Obiekt $P_6(s)$ dla parametru $L_1 = 0.01$.

Obiekt oryginalny:

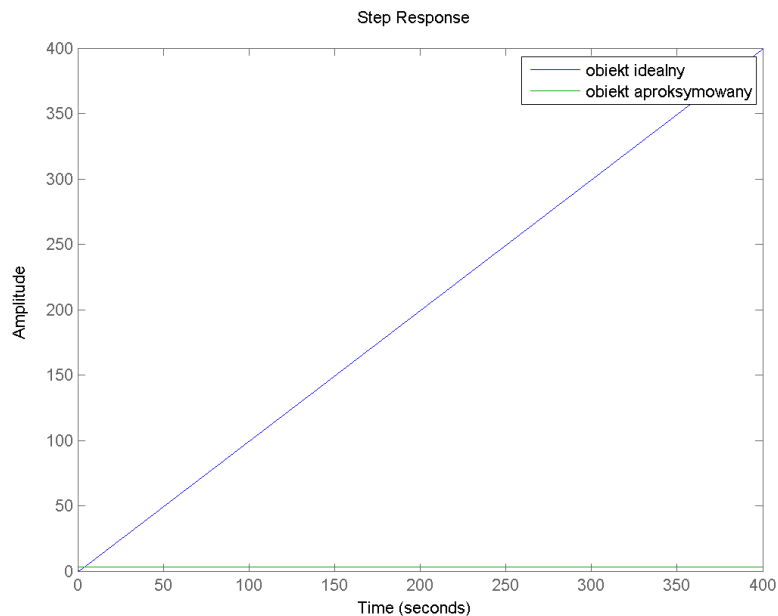
$$P_6(s) = \frac{e^{-0.01s}}{s(1 + 0.99s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

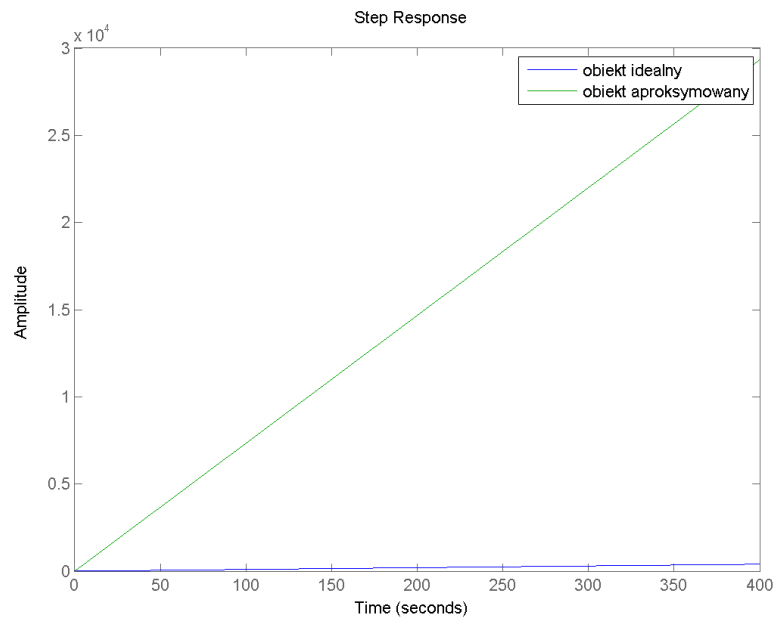
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{3.03}{(1 + 0.000001s)(1 + 0.000001s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

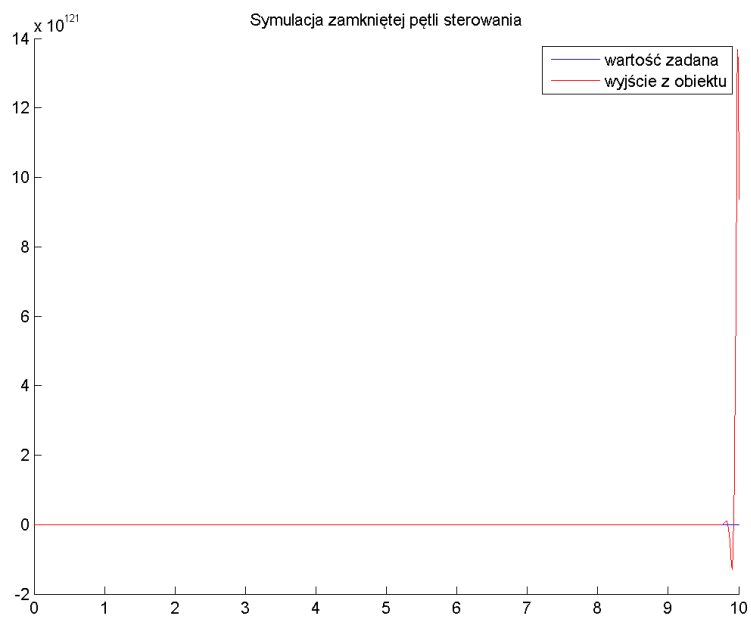
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{73.3094}{s(1 + 0.1249s)}$$



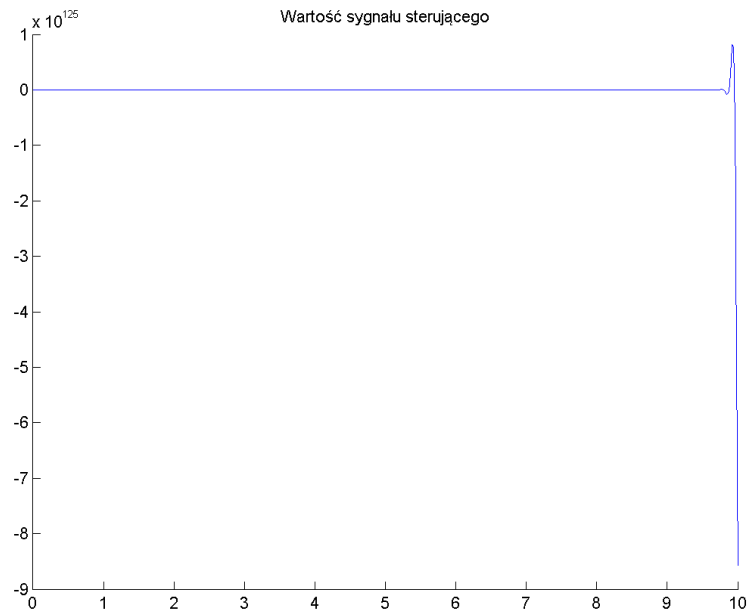
Rysunek 45 Odpowiedź skokowa obiektu $P_6(s)$ i jego aproksymacji dla $L_1 = 0.01$, metoda MO.



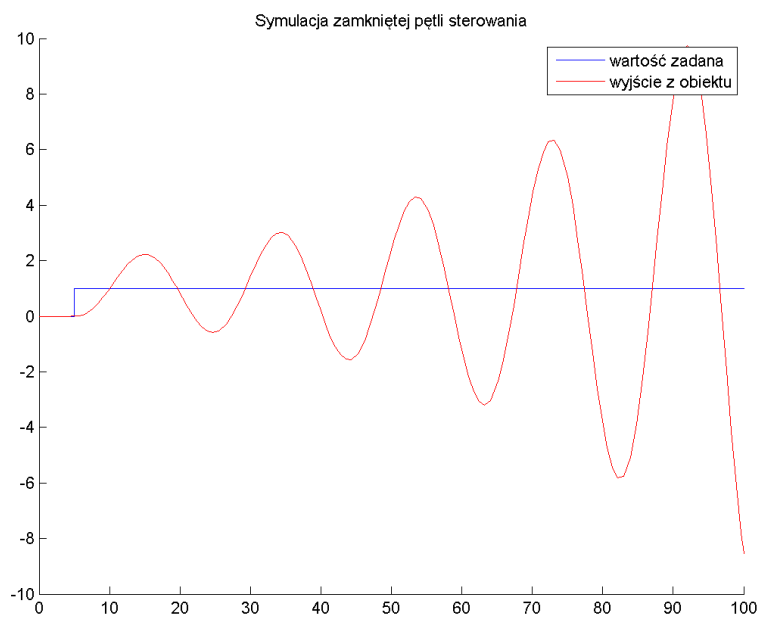
Rysunek 46 Odpowiedź skokowa obiektu $P6(s)$ i jego aproksymacji dla $L1 = 0.01$, metoda SO.



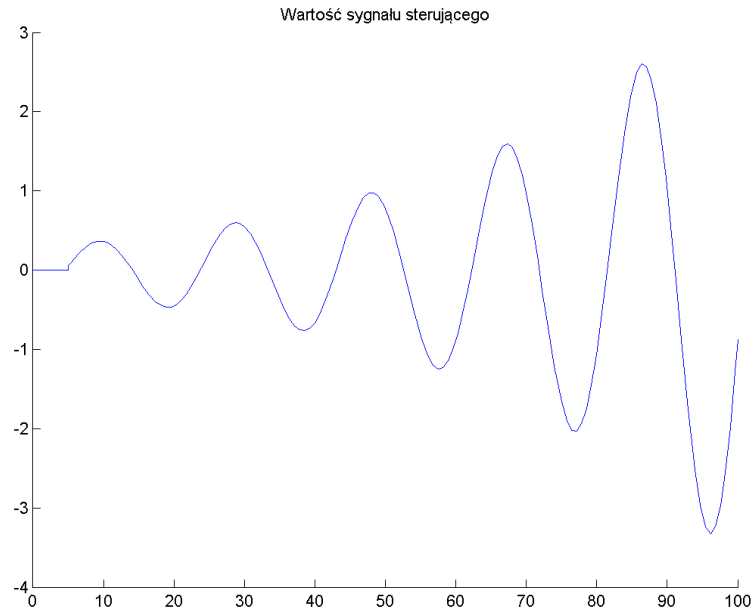
Rysunek 47 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P6(s)$ dla $L1 = 0.01$, metoda MO.



Rysunek 48 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P6(s)$ dla $L1 = 0.01$, metoda MO.



Rysunek 49 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P6(s)$ dla $L1 = 0.01$, metoda SO.



Rysunek 50 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P_6(s)$ dla $L_1 = 0.01$, metoda SO.

3.9. Obiekt $P_7(s)$ dla parametru $T = 5$ i $L_1 = 0.5$.

Obiekt oryginalny:

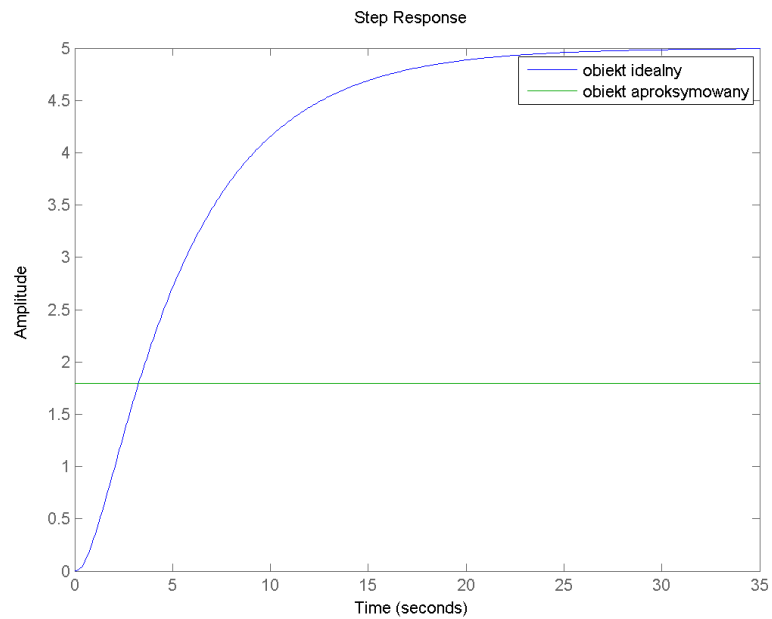
$$P_7(s) = \frac{T e^{-0.5s}}{(1 + 5s)(1 + 0.95s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

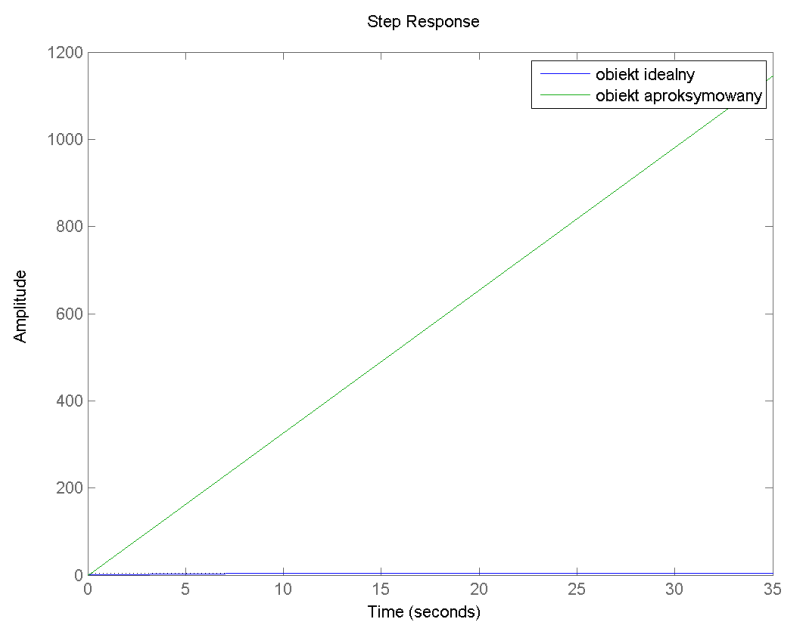
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{1.7933}{(1 + 0.000001s)(1 + 0.000001s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

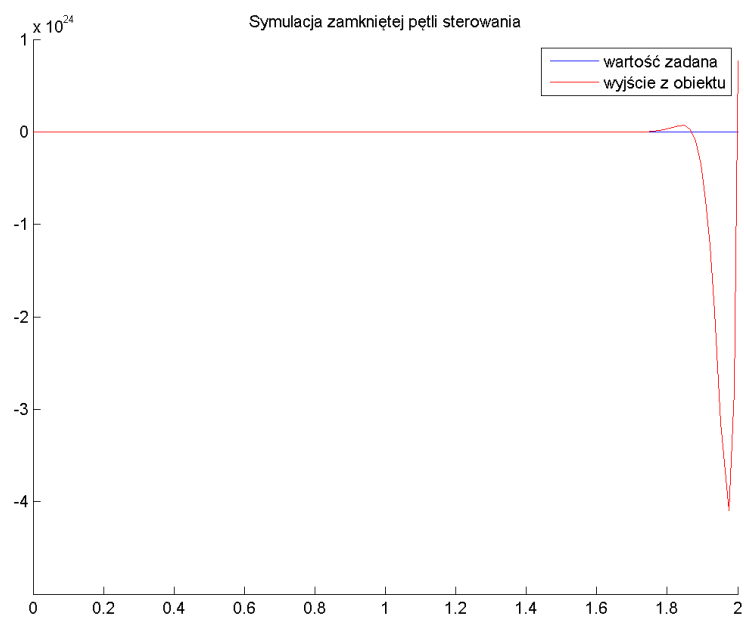
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{35.7551}{s(1 + 0.0606s)}$$



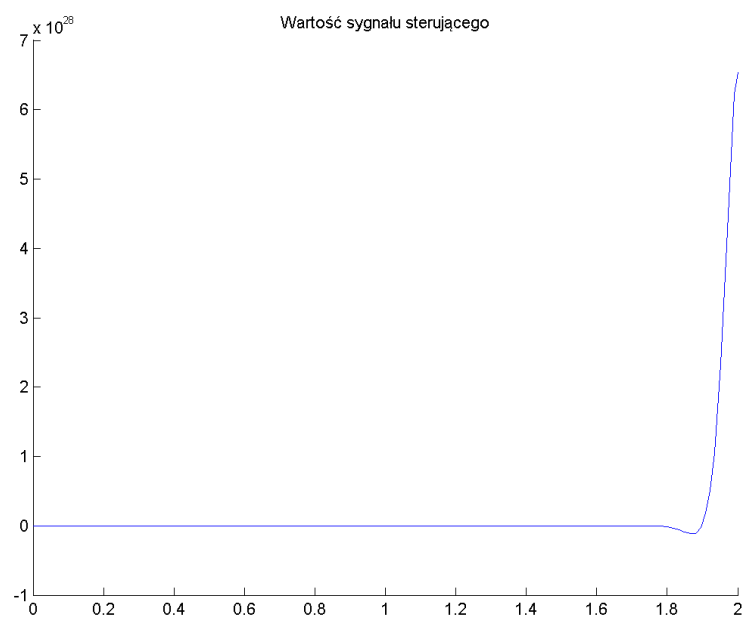
Rysunek 51 Odpowiedź skokowa obiektu $P7(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 5$ i $L_1 = 0.5$, metoda MO.



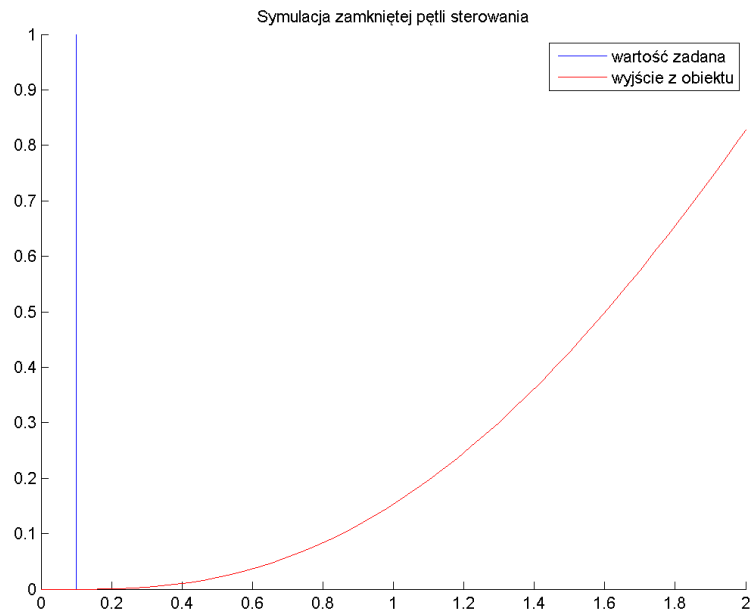
Rysunek 52 Odpowiedź skokowa obiektu $P7(s)$ i jego aproksymacji dla $T = 5$ i $L_1 = 0.5$, metoda SO.



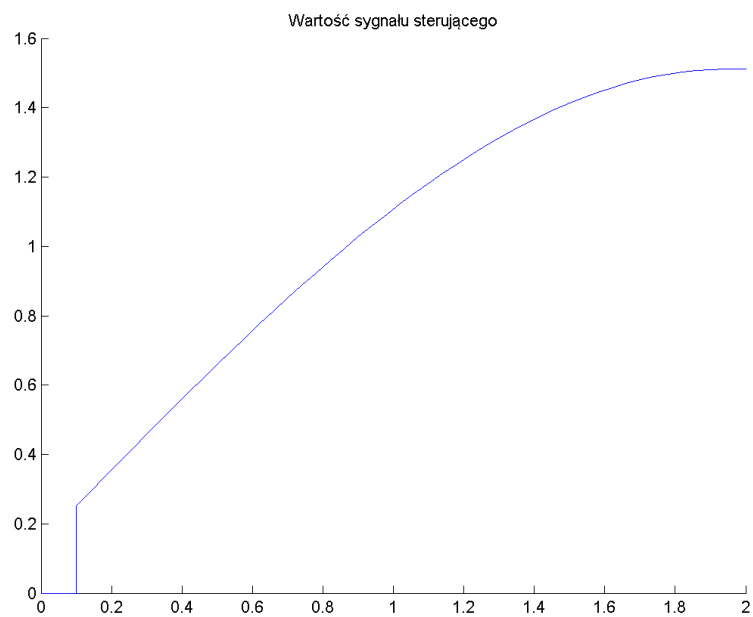
Rysunek 53 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L_1 = 0.5$, metoda MO.



Rysunek 54 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L_1 = 0.5$, metoda MO.



Rysunek 55 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L_1 = 0.5$, metoda SO.



Rysunek 56 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P7(s)$ dla $T = 5$ i $L_1 = 0.5$, metoda SO.

3.10. Obiekt $P_8(s)$ dla parametru $\alpha = 0.6$

Obiekt oryginalny:

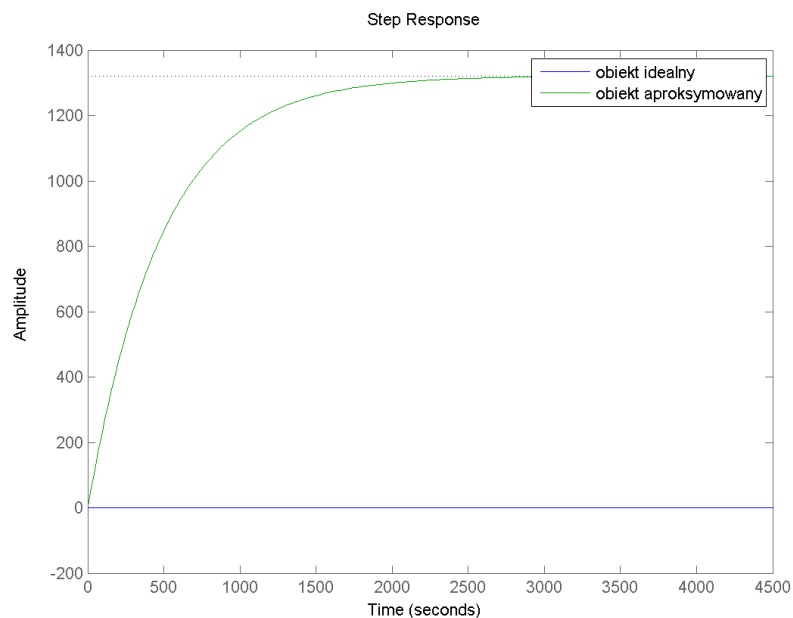
$$P_8(s) = \frac{1 - 0.6s}{(s + 1)^3}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym drugiego rzędu:

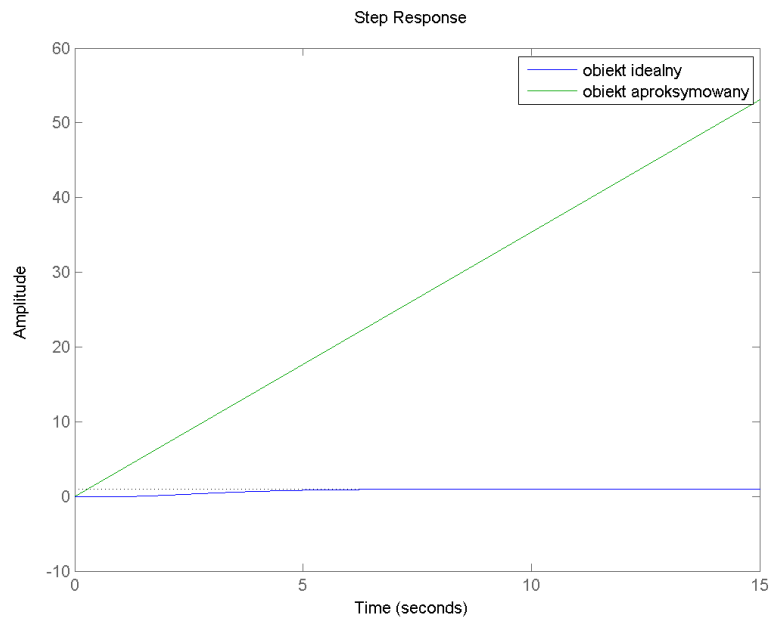
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{1321}{(1 + 0.013s)(1 + 486.67s)}$$

Obiekt aproksymowany obiektem inercyjnym z całkowaniem:

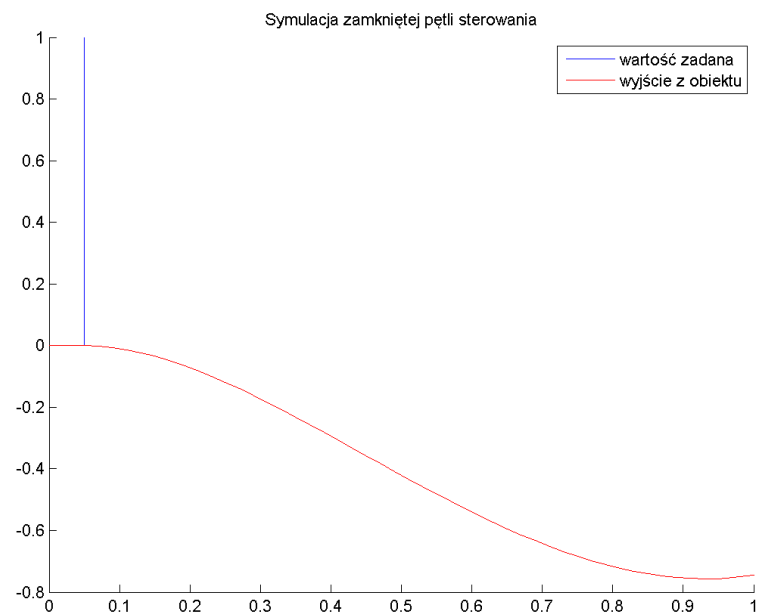
$$\widetilde{P}_3(s) = \frac{3.5359}{s(1 + 0.0121s)}$$



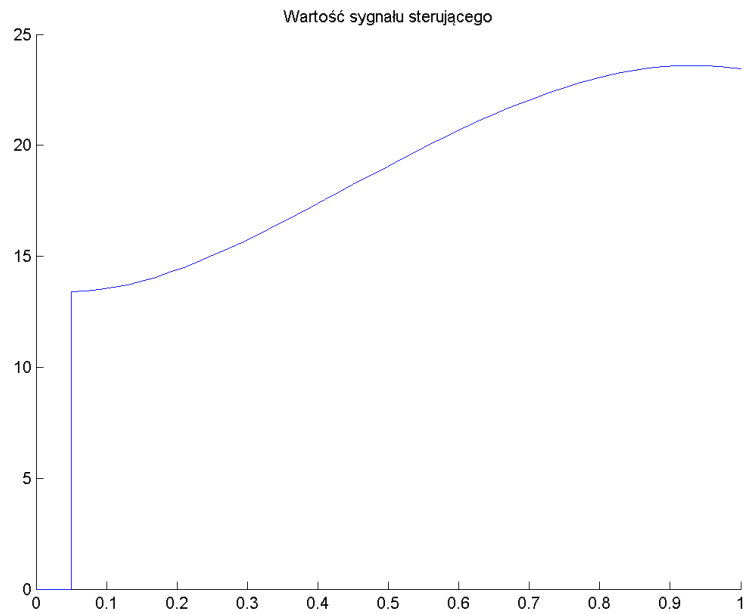
Rysunek 57 Odpowiedź skokowa obiektu $P_8(s)$ i jego aproksymacji dla $\alpha = 0.6$, metoda MO.



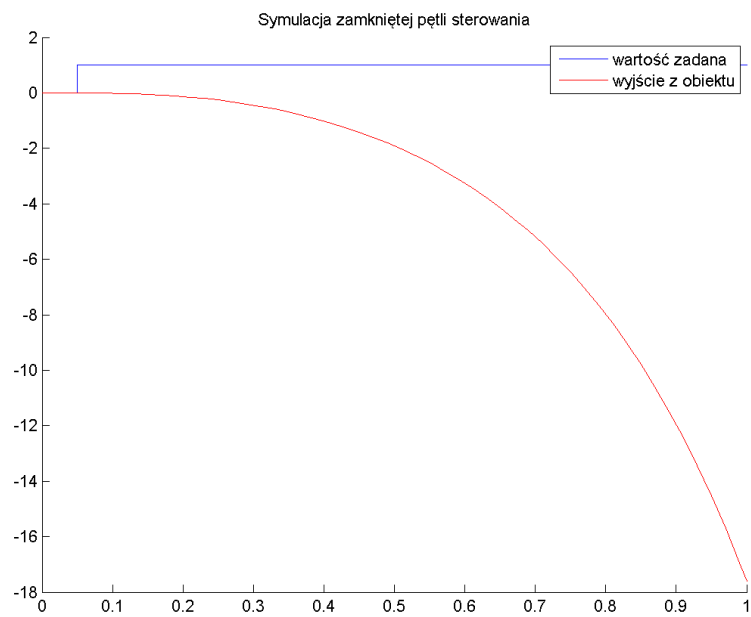
Rysunek 58 Odpowiedź skokowa obiektu $P8(s)$ i jego aproksymacji dla $\alpha = 0.6$, metoda SO.



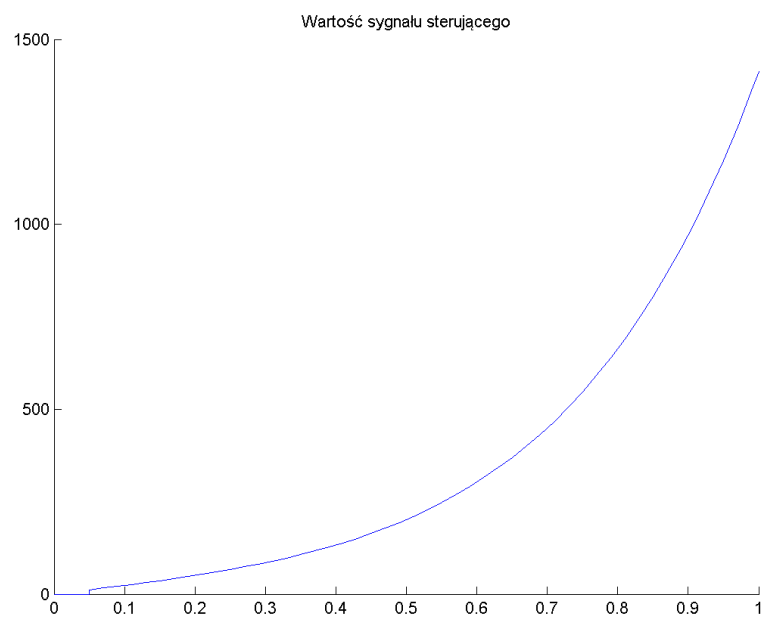
Rysunek 59 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu $P8(s)$ dla $\alpha = 0.6$, metoda MO.



Rysunek 60 Wykres wartości sterowania dla obiektu P8(s) dla $\alpha = 0.6$, metoda MO.



Rysunek 61 Wykres wartości zadanej i wyjścia z obiektu P8(s) dla $\alpha = 0.6$, metoda SO.



Rysunek 62 Wykres wartości sterowania dla obiektu $P8(s)$ dla $\alpha = 0.6$, metoda SO.

4. Wnioski.

Zastosowane metody wyznaczania regulatorów stosuje się dla obiektów o innej charakterystyce, niż te użyte w projekcie. Mimo wykorzystania metod aproksymacji obiektami odpowiednimi dla danej metody (w przypadku metody Modulus Optimum był to obiekt inercyjny drugiego rzędu, natomiast w przypadku metody Symmetrical Optimum wykorzystany obiekt był obiektem inercyjnym z całkowaniem) wiele z tym aproksymacji było na tyle niedokładnych, że wyznaczone regulatory na podstawie właściwych dla danej metody wzorów nie gwarantowało odpowiedniego sygnału sterującego, oraz dojścia do stabilizacji obiektu. Wiele takich symulacji należało przerwać po krótszym czasie, gdyż obiekty szybko osiągały wartość *inf*, co w Matlabie oznacza zmierzanie do nieskończoności.

Dla tych obiektów, które dały się aproksymować obiektem inercyjnym drugiego rzędu, bądź inercyjnym z całką, wyznaczenie regulatorów na podstawie wzorów opisanych w wykorzystanych metodach pozwoliło wygenerować sygnał sterujący wystarczający do wyregulowania obiektu. Nie mniej jednak można by spekulować na temat optymalności tak wyznaczonego regulatora, jednak nie było to częścią realizowanego projektu.

Zaletą metody Modulus Optimum oraz Symmetrical Optimum jest prostota ich zastosowania, oraz stosunkowo szybki czas uzyskania regulatora. W celu poprawy wyników można odnieść się do uogólnień wyżej wymienionych metod, jednak związane jest to z większym nakładem obliczeniowym. Jeżeli zależy nam na szybkości wyznaczenia regulatora dla danego obiektu i posiadamy jego dobrą aproksymację założonymi obiektami, lub w idealnym przypadku sterowany obiekt jest w postaci obiektu inercyjnego drugiego rzędu (metoda MO) lub inercyjnego z całkowaniem (metoda SO) jesteśmy w stanie uzyskać dobre wyniki regulacji. Jeżeli pod rozważania wzięto by optymalność sterowania takimi obiektami, należałoby użyć innych metod do tego stosowanych.

Źródła

1. <http://www.ztmapc.el.pcz.pl/stud/ais/aislab-dn.pdf>

Zawartość projektu

<https://github.com/Gracex92/PUAP-Projekt>