

Akademia Górnictwo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Komputerowe Systemy Sterowania

Rok akademicki: 2015/2016

Projektowanie Układów Automatyki Przemysłowej Ćwiczenia



A G H

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**Temat projektu: Regulacja PID - Analiza regulatorów
strojonych metodą Internal Model Control**

Prowadzący: dr inż. Jerzy Baranowski

Autor: Adrian Bogunia

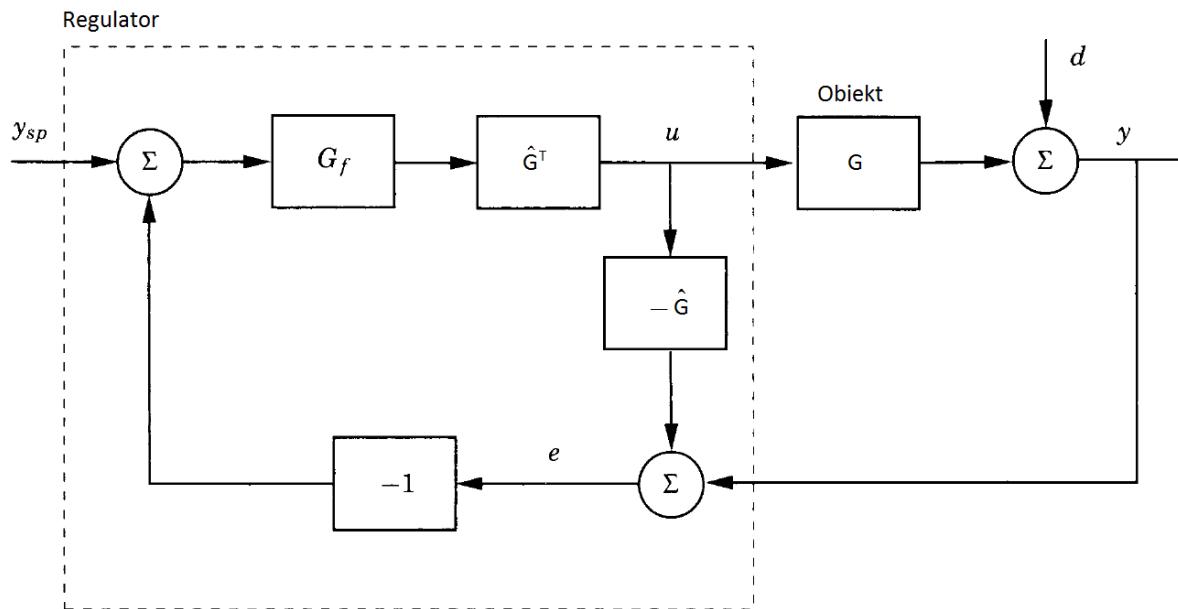
Kraków, styczeń 2015

Spis treści

1.	Wstęp teoretyczny.	3
2.	Zestaw badanych obiektów.	5
3.	Opis działania.	6
4.	Symulacje dla obiektu G₁.	7
5.	Symulacje dla obiektu G₂.	28
6.	Symulacje dla obiektu G₃.	49
7.	Symulacje dla obiektu G₄.	59
8.	Symulacje dla obiektu G₅.	65
9.	Symulacje dla obiektu G₆.	74
10.	Symulacje dla obiektu G₇.	76
11.	Symulacje dla obiektu G₈.	112
12.	Symulacja dla obiektu G₉.	123
13.	Wnioski.	133

1. Wstęp teoretyczny.

Internal Model Control (IMC) jest to metoda sterowania układami regulacji, która polega na generowaniu sygnałów sterujących na podstawie porównania wyjścia z modelem odniesienia oraz z samego badanego obiektu. Metoda ta bazuje na idei mówiącej, iż jeżeli mamy informacje o modelu badanego obiektu, to w celu dobrego sterowania obiektem, ten model powinien być częścią regulatora. Schemat blokowy takiego systemu wygląda następująco:



Rys. 1 Schemat blokowy systemu zamkniętego z regulatorem opartym na zasadzie IMC

Na rysunku przedstawionym powyżej, d stanowi zakłócenia obiektu, G oznacza badany obiekt, \hat{G} to model po aproksymacji obiektu, \hat{G}^T jest odwrotnością modelu uzyskanego aproksymacją obiektu oraz G_f reprezentuje tutaj filtr dolnoprzepustowy.

Model obiektu \hat{G} otrzymano za pomocą aproksymacji obiektem pierwszego rzędu i jego transmitancja to:

$$\hat{G}(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}$$

Na regulator składa się filtr dolnoprzepustowy, którego celem jest zapewnić odpowiednio wysoki rząd oraz zminimalizować zakłócenia. Transmitancja owego filtra ma postać:

$$G_f(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}$$

Drugim elementem składającym się na regulator jest model odwrotny aproksymacji badanego obiektu \hat{G}^T o następującej transmitancji:

$$\hat{G}^T(s) = \frac{T_m s + 1}{K_m}$$

Co w efekcie daje nam regulator o transmitancji:

$$C(s) = \frac{T_m s + 1}{K_m} * \frac{1}{\lambda s + 1} = \frac{T_m s + 1}{K_m \lambda s + K_m}$$

gdzie

T_m – stała czasowa modelu

K_m – wzmacnienie dla modelu

λ – współczynnik filtra stanowiący opóźnienie

2. Zestaw badanych obiektów.

Poniżej przedstawione są obiekty, które zostały wykorzystane do analizy regulatora metoda Internal Model Control.

$$G_1 = \frac{e^{-s}}{1 + sT}$$

$$G_2 = \frac{e^{-s}}{(1 + sT)^2}$$

$$G_3 = \frac{e^{-s}}{(s + 1)(1 + sT)^2}$$

$$G_4 = \frac{1}{(s + 1)^n}$$

$$G_5 = \frac{1}{(1 + s)(1 + \alpha s)(1 + \alpha^2 s)(1 + \alpha^3 s)}$$

$$G_6 = \frac{e^{-sL_1}}{s(1 + sT_1)}$$

$$G_7 = \frac{Te^{-sL_1}}{(1 + sT)(1 + sT_1)}$$

$$G_8 = \frac{1 - \alpha s}{(s + 1)^3}$$

$$G_9 = \frac{1}{(s + 1)((sT)^2 + 1.4sT + 1)}$$

3. Opis działania.

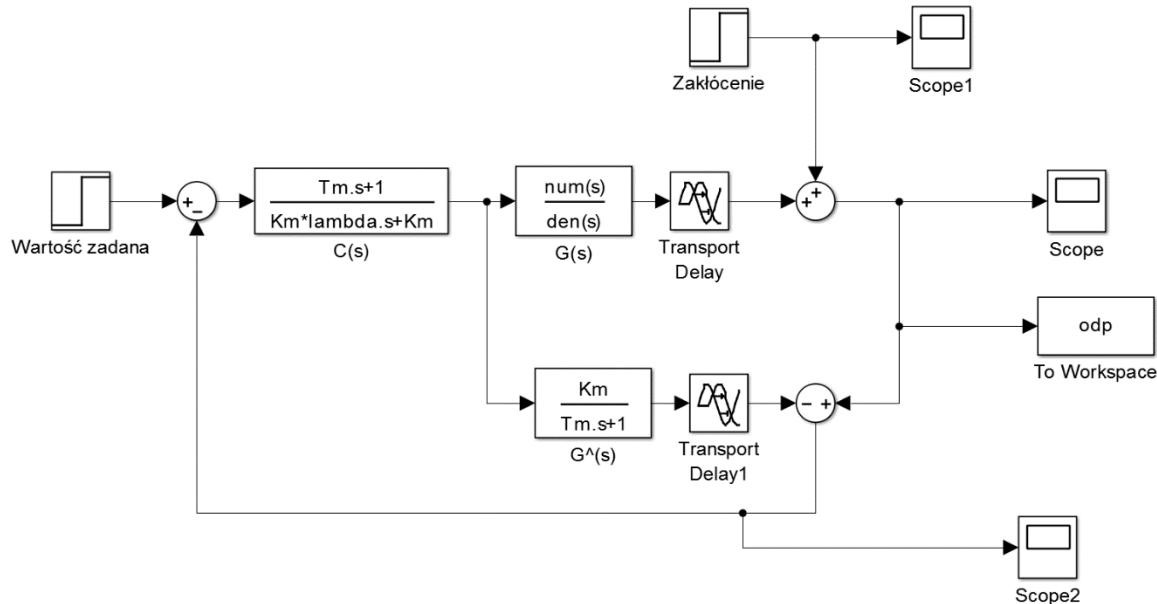
Aproksymacja badanego obiektu $G(s)$ pozwoliła otrzymać model I rzędu $\hat{G}(s)$. Aproksymacja obiektu została wykonana za pomocą funkcji `lsqnonlin`. Otrzymany model został wykorzystany do stworzenia regulatora PI o transmitancji:

$$C(s) = \frac{T_m s + 1}{K_m} * \frac{1}{\lambda s + 1} = \frac{T_m s + 1}{K_m \lambda s + K_m}$$

W obiektach, który należało przeanalizować wzmacnienie $K = 1$, dlatego też wzmacnienie K_m dla modelu przyjęto również równe 1.

Wartością zadaną w modelu symulacyjnym jest skok jednostkowy. Zakłócenie wprowadzone na wyjście układu to również skok jednostkowy, lecz w 3 sekundzie symulacji.

Badanie polegało także na zbudowaniu modelu symulacyjnego obiektu z regulatorem, który został zaprojektowany w oparciu o metodę IMC oraz jego symulacji. Do badań wykorzystano środowisko Matlab. Model symulacyjny opracowano w Simulinku i wygląda następująco:



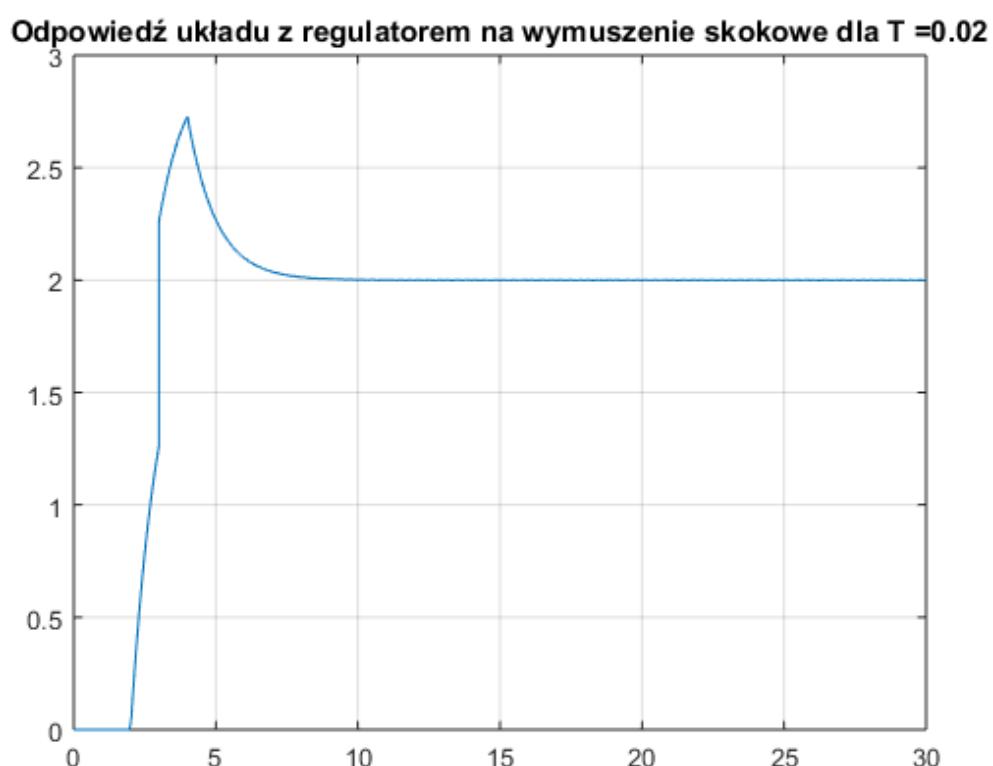
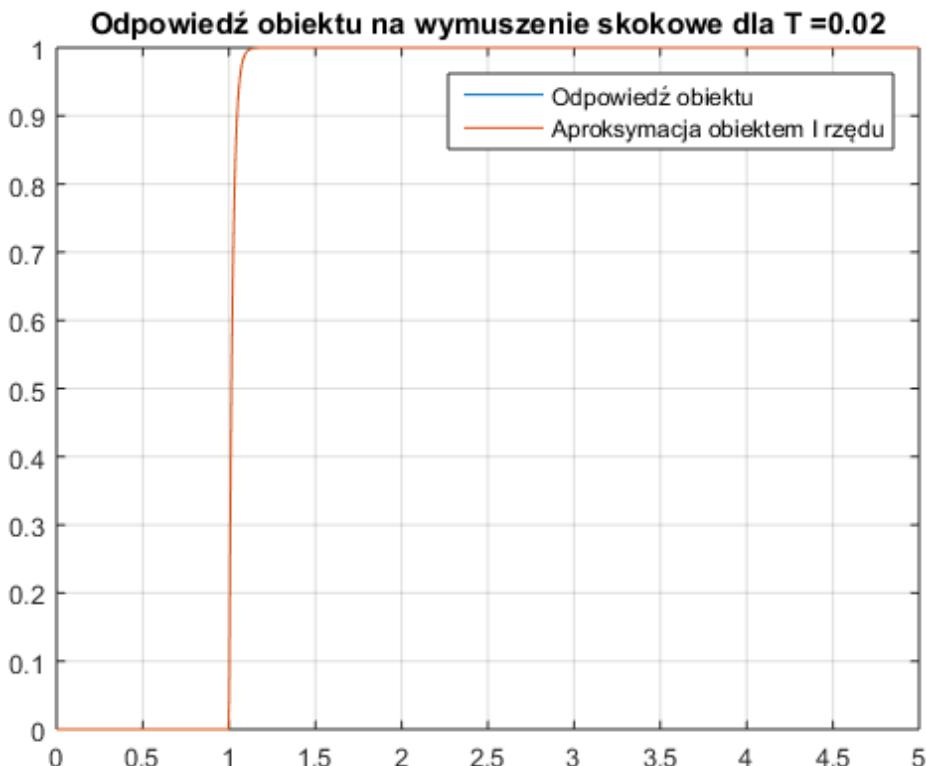
Rys. 2 Model symulacyjny.

4. Symulacje dla obiektu G_1 .

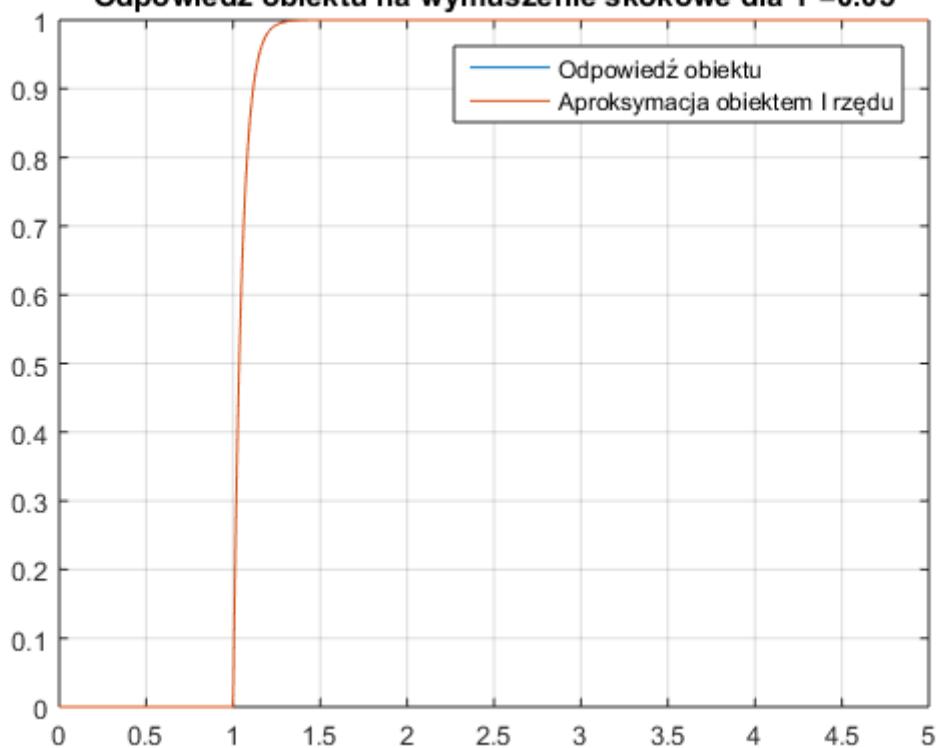
$$G_1 = \frac{e^{-s}}{1 + sT}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając stałą czasową w następujący sposób:

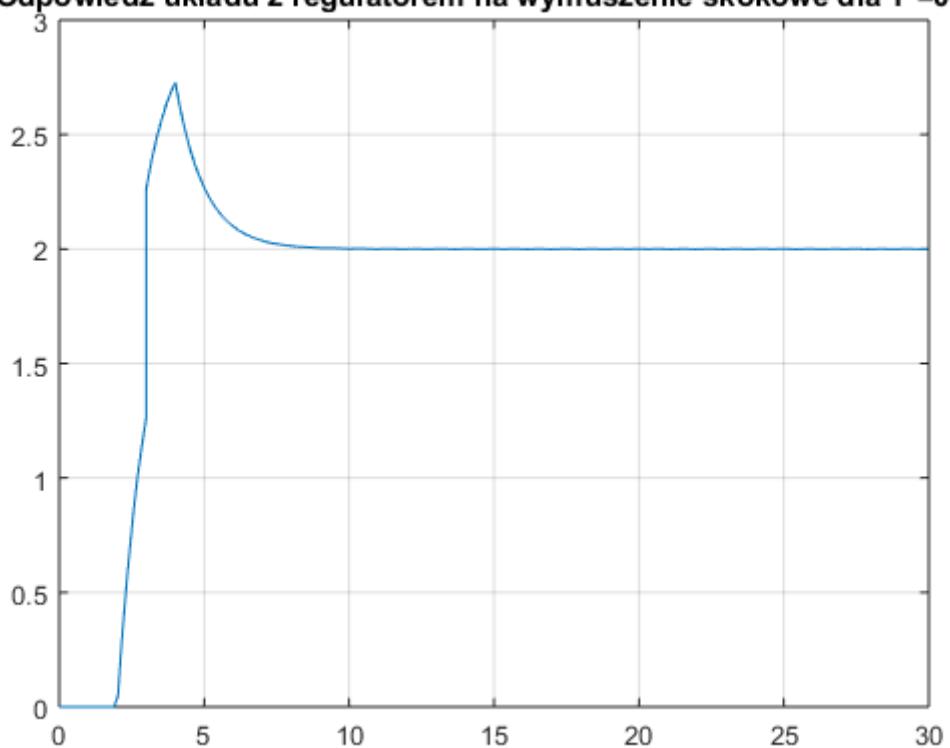
$T = 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.5, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000$



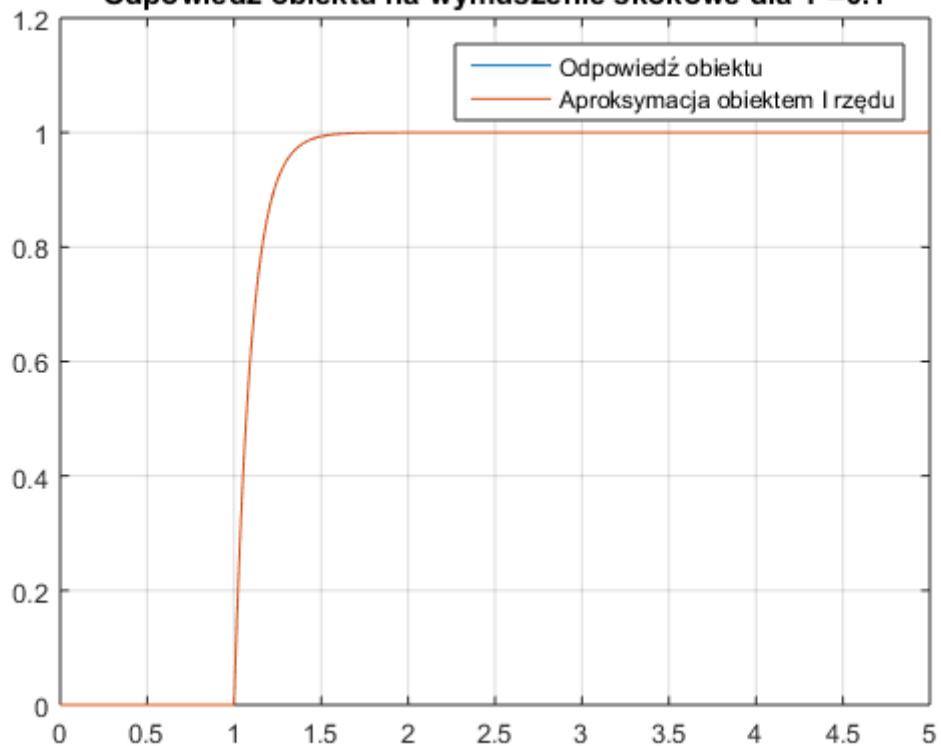
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.05$



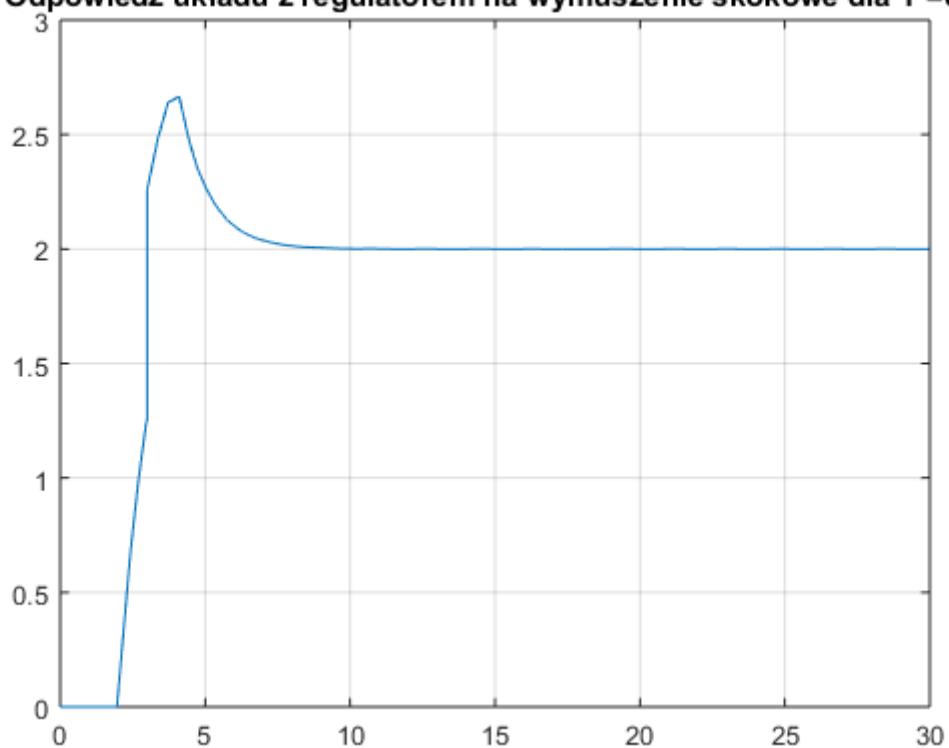
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.05$



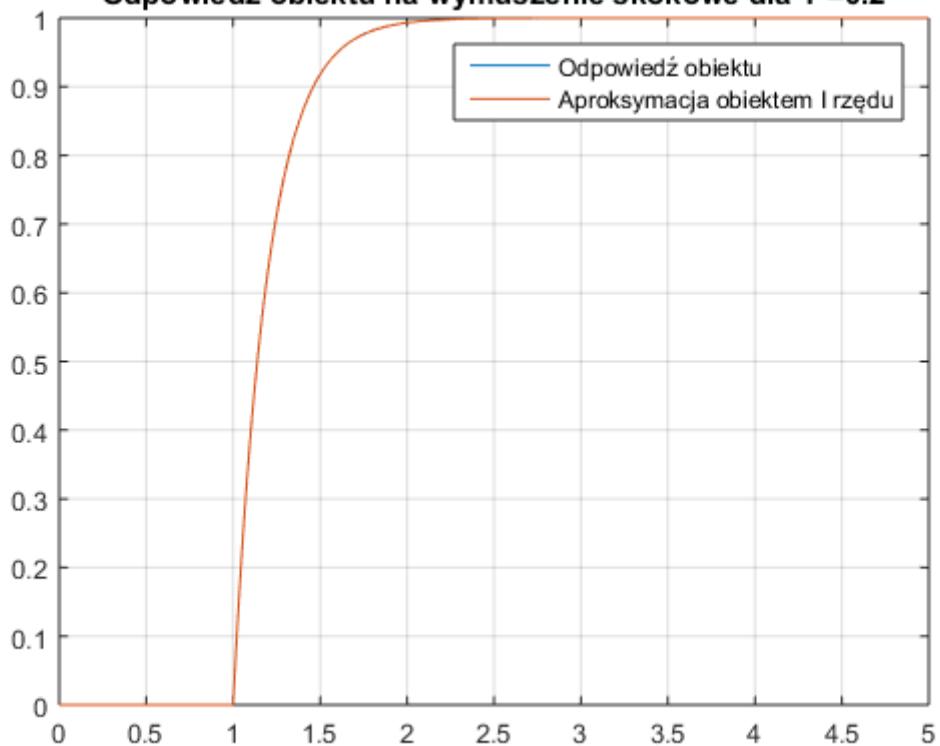
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.1$



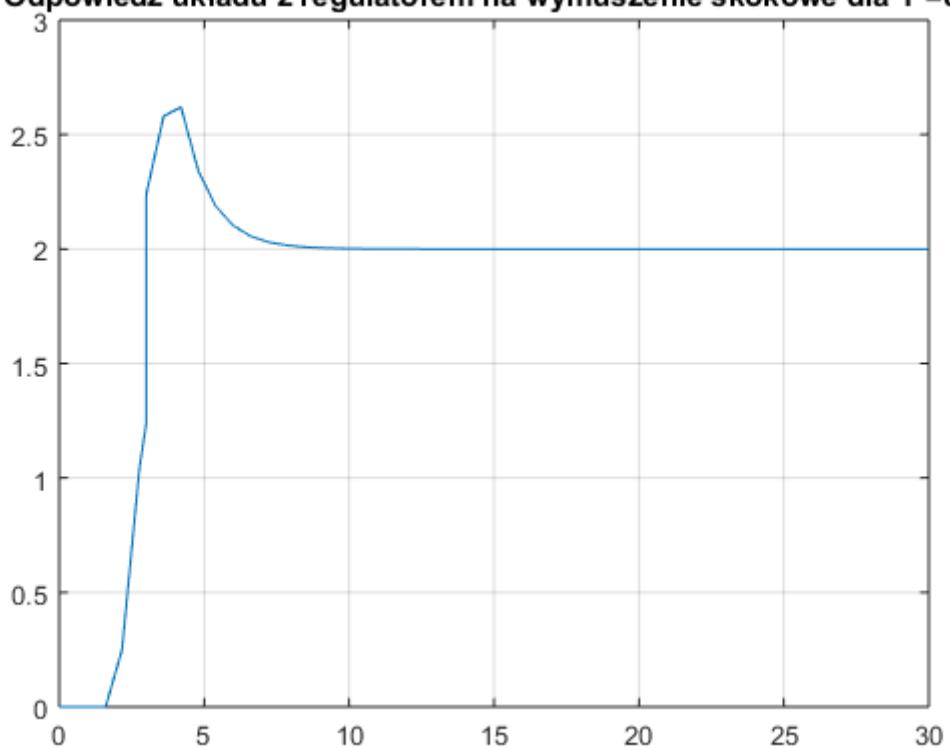
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.1$



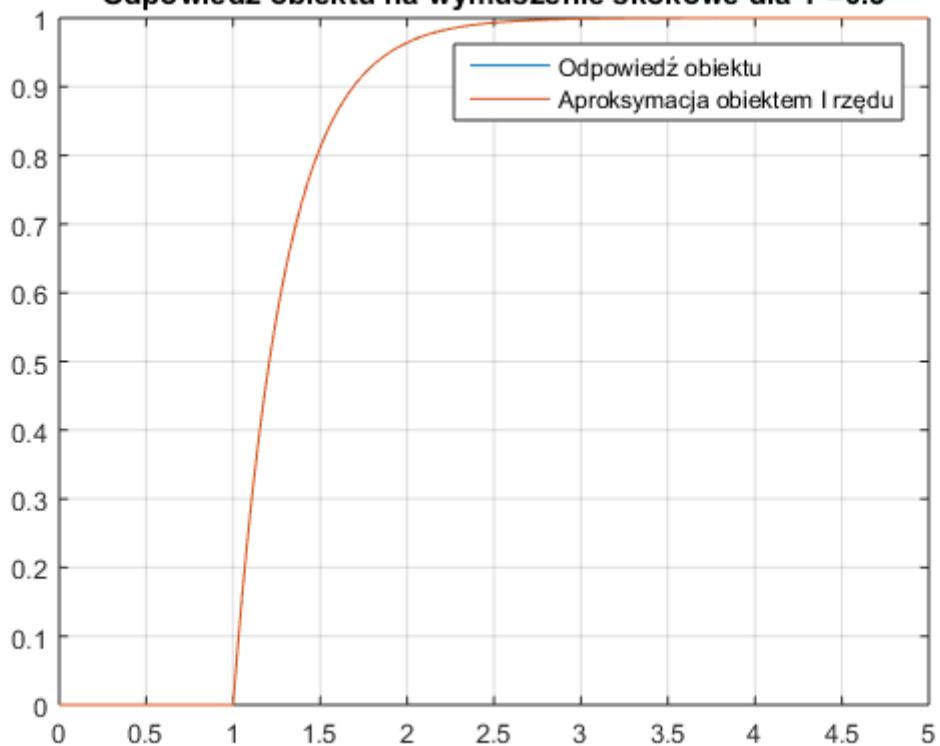
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



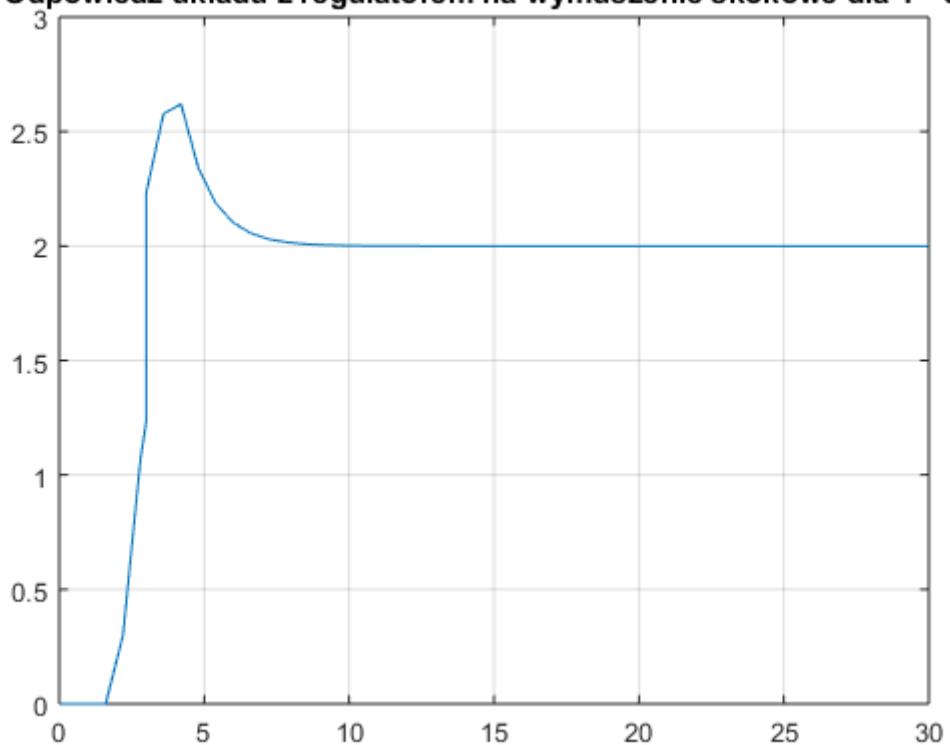
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



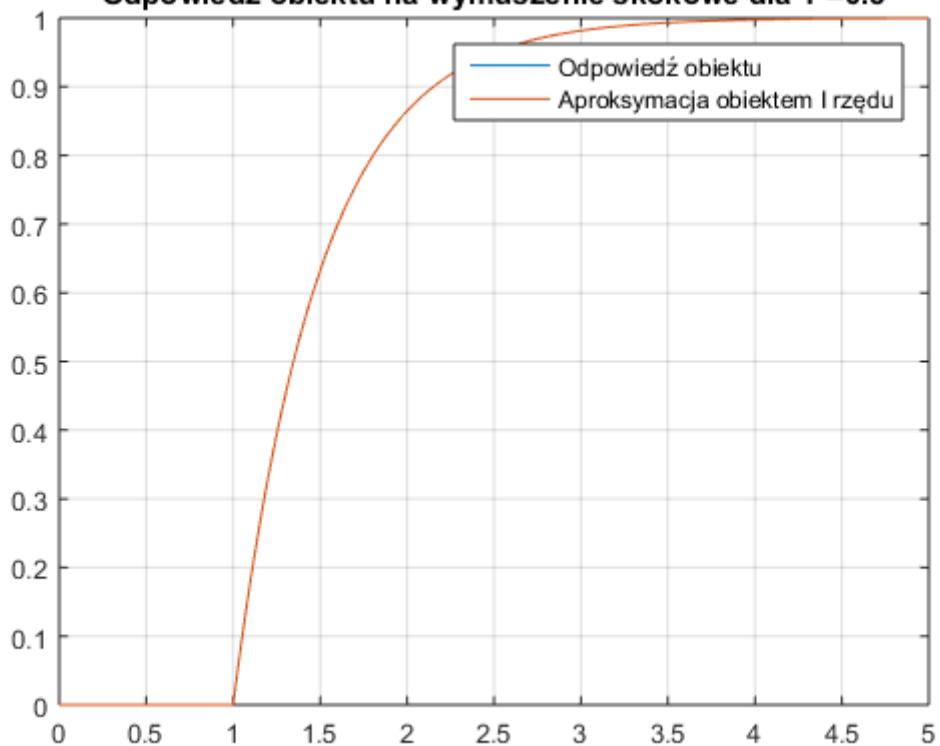
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.3$



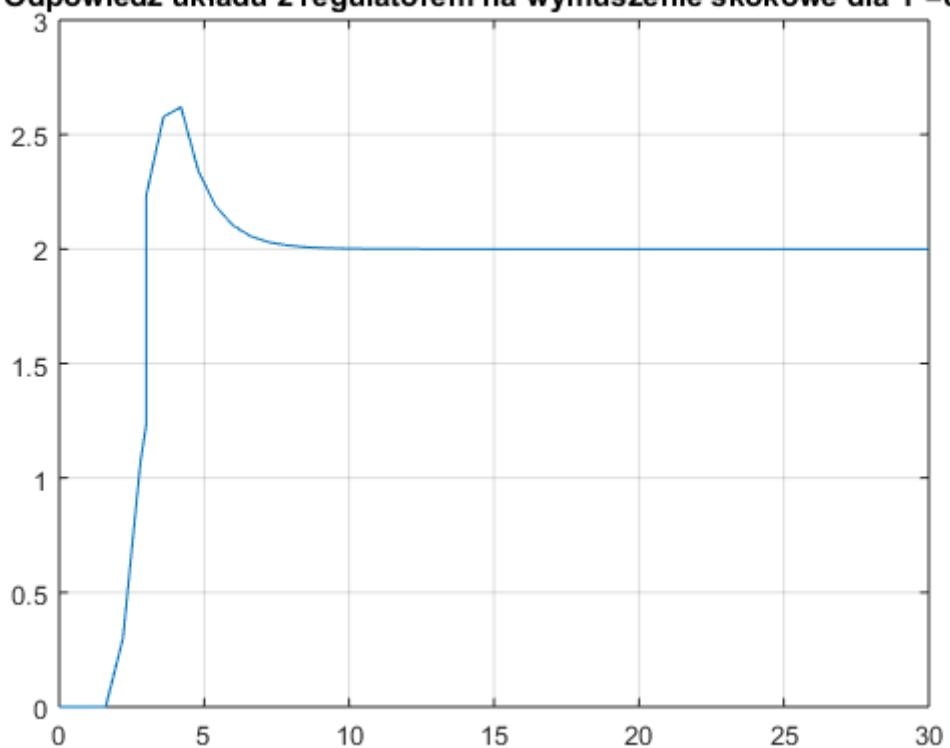
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.3$



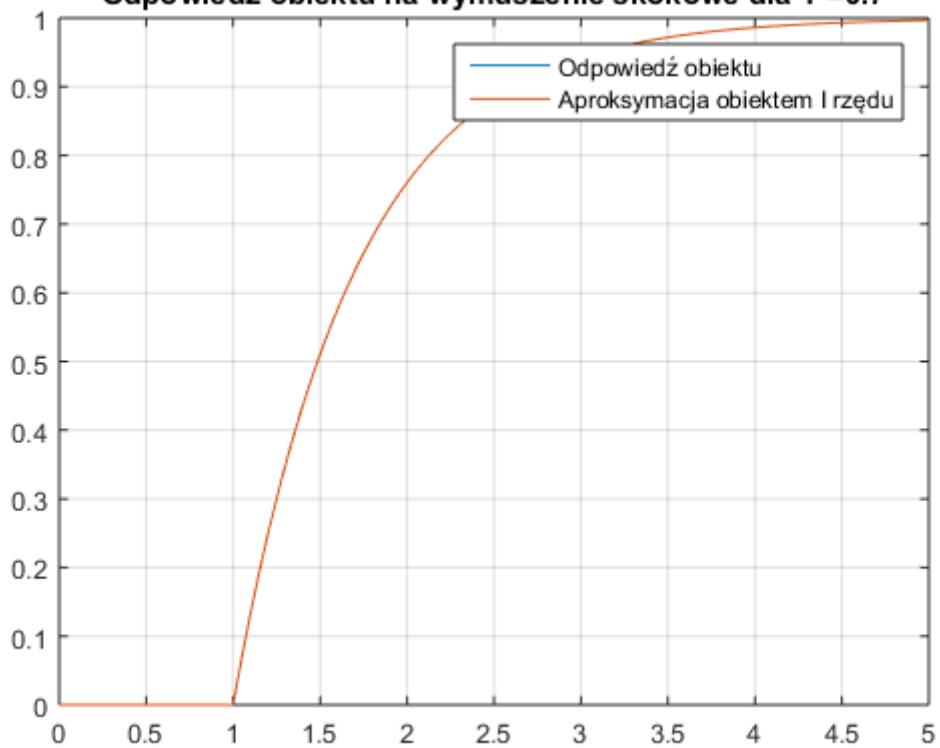
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



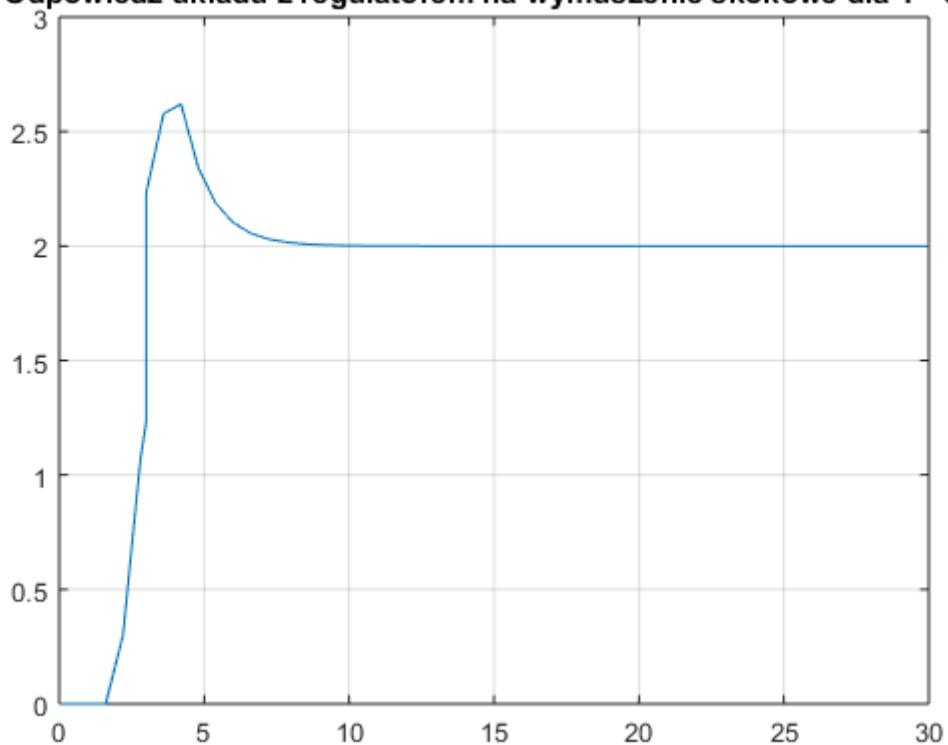
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



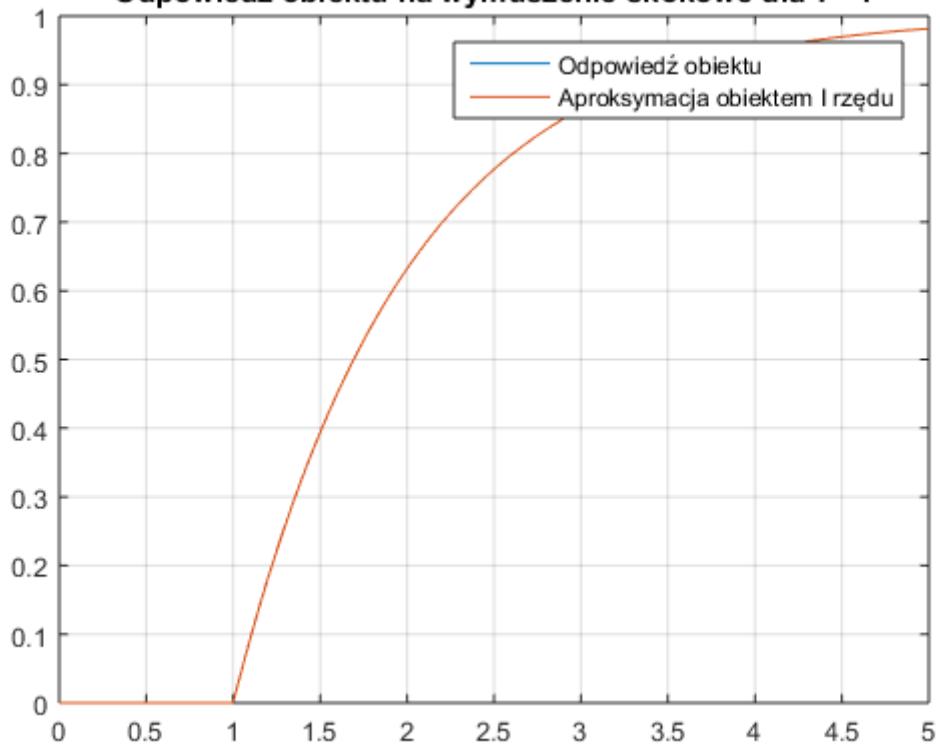
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.7$



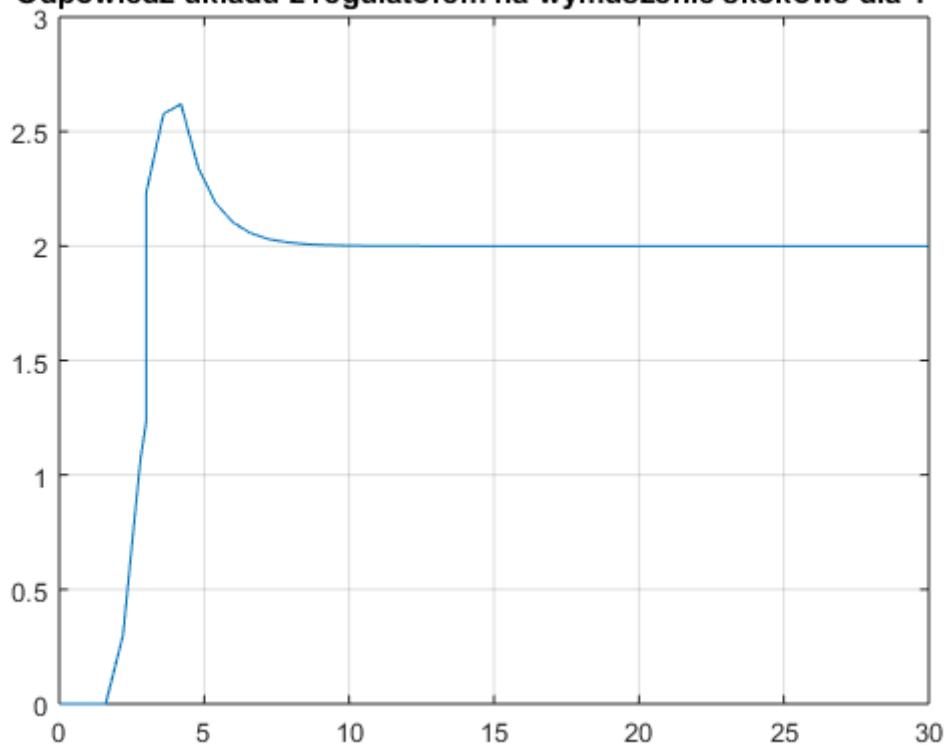
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.7$



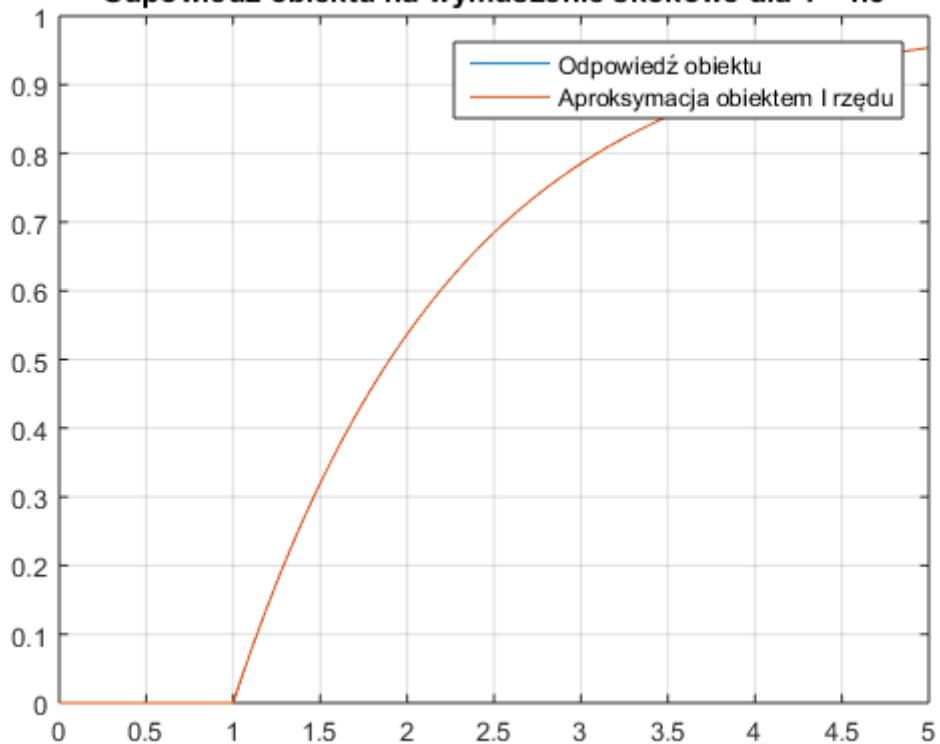
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1$



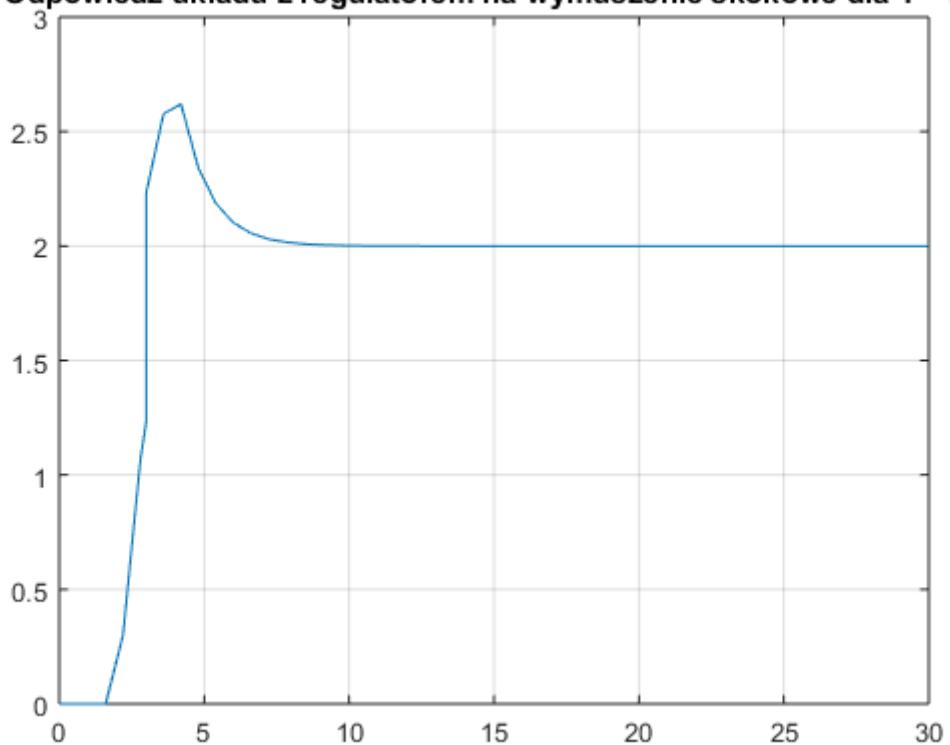
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1$



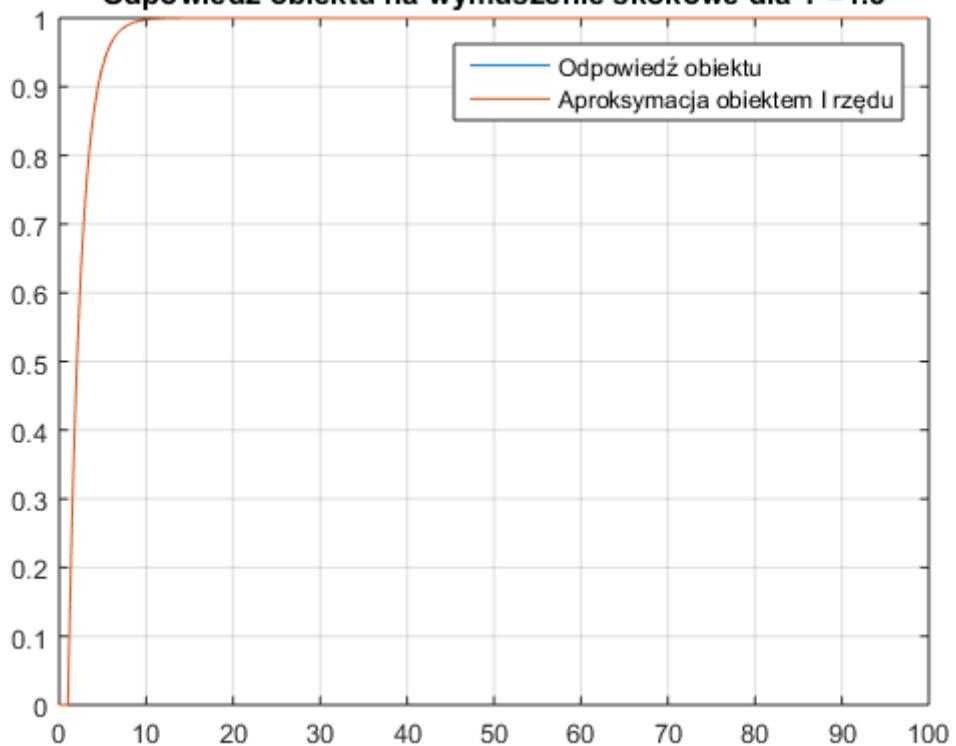
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1.3$



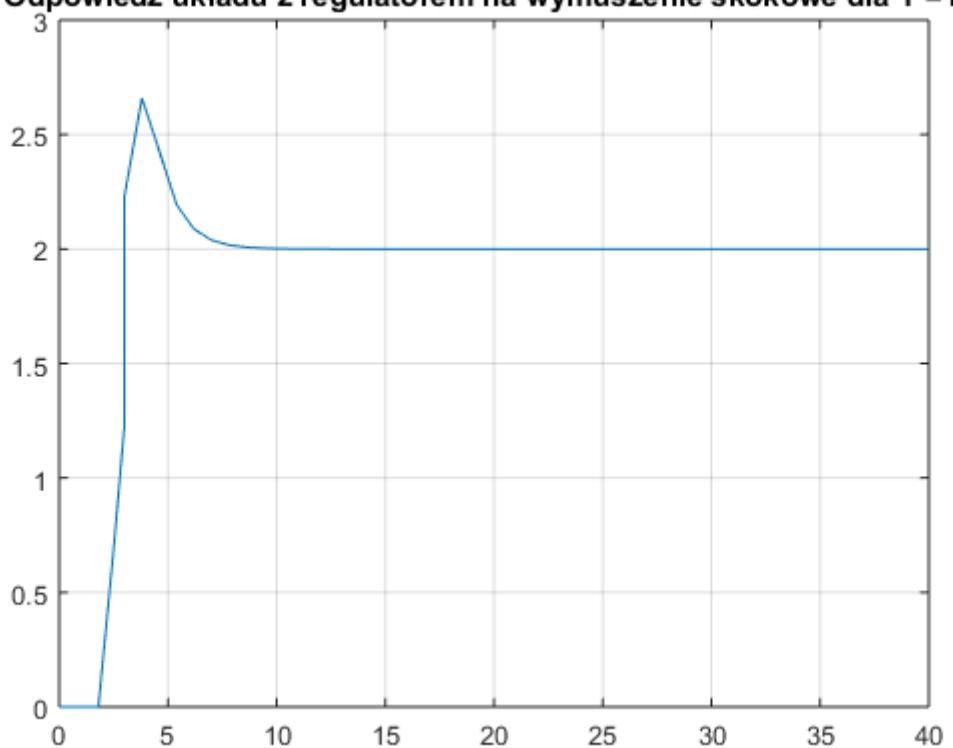
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1.3$



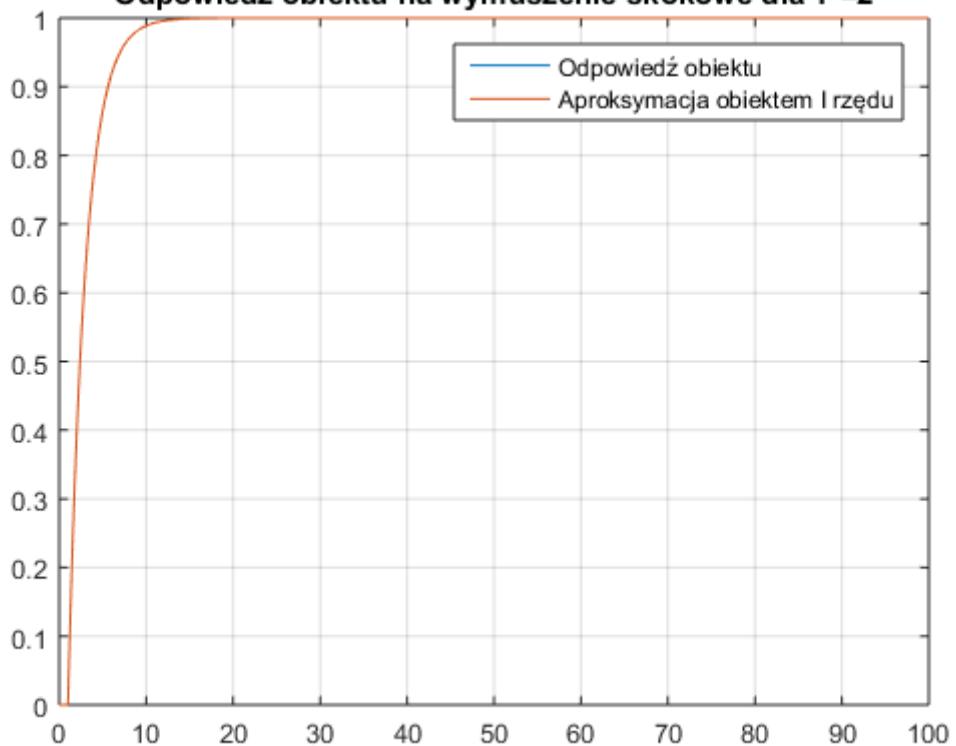
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1.5$



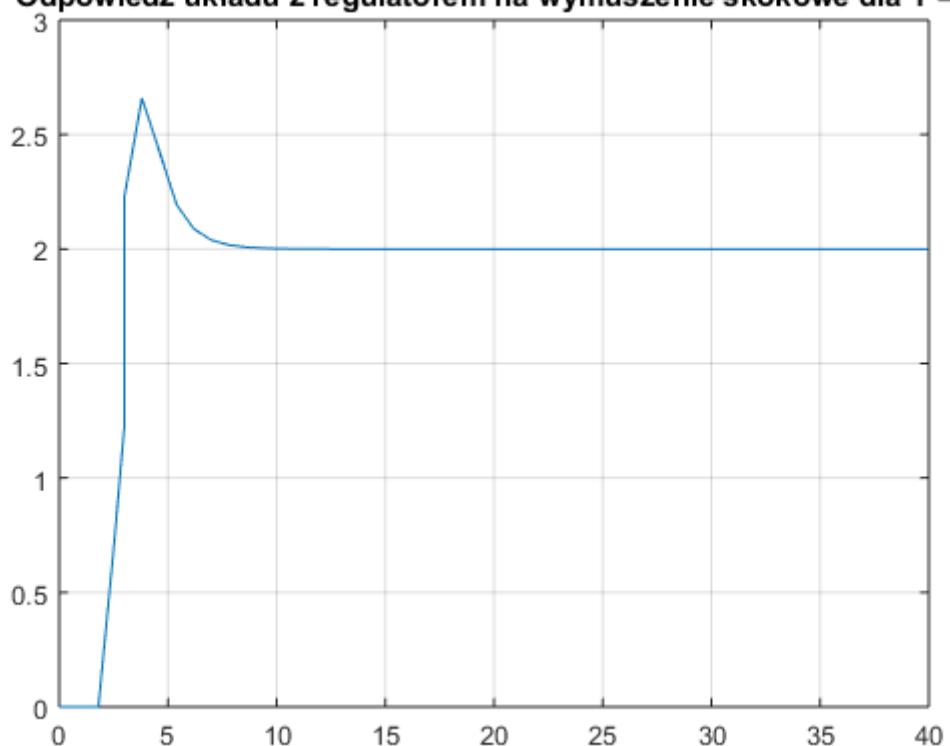
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1.5$



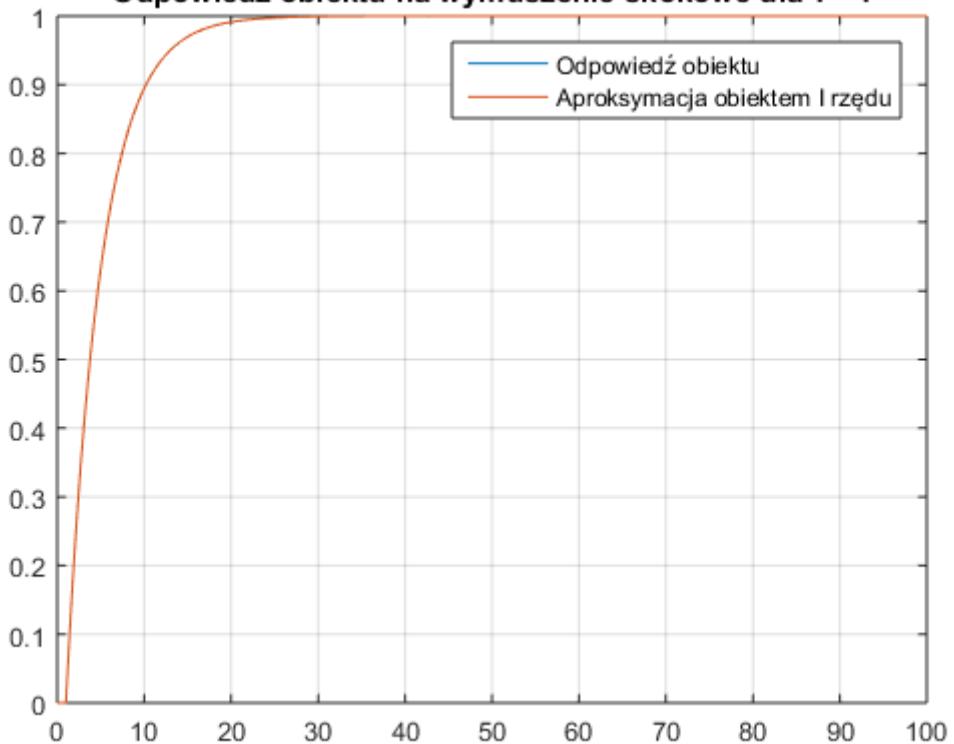
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 2$



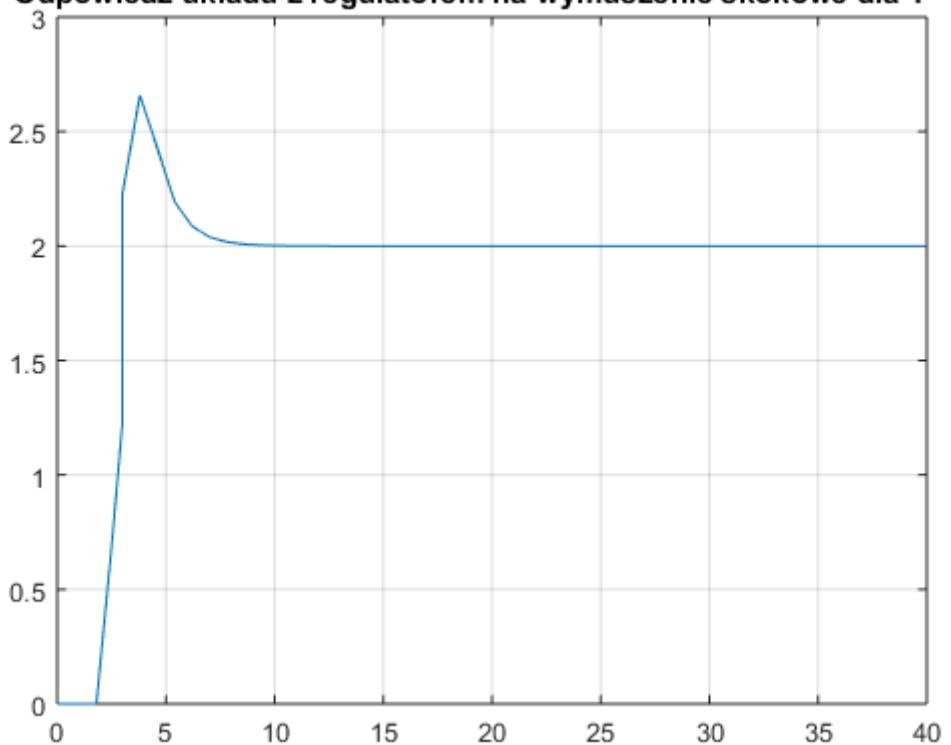
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 2$



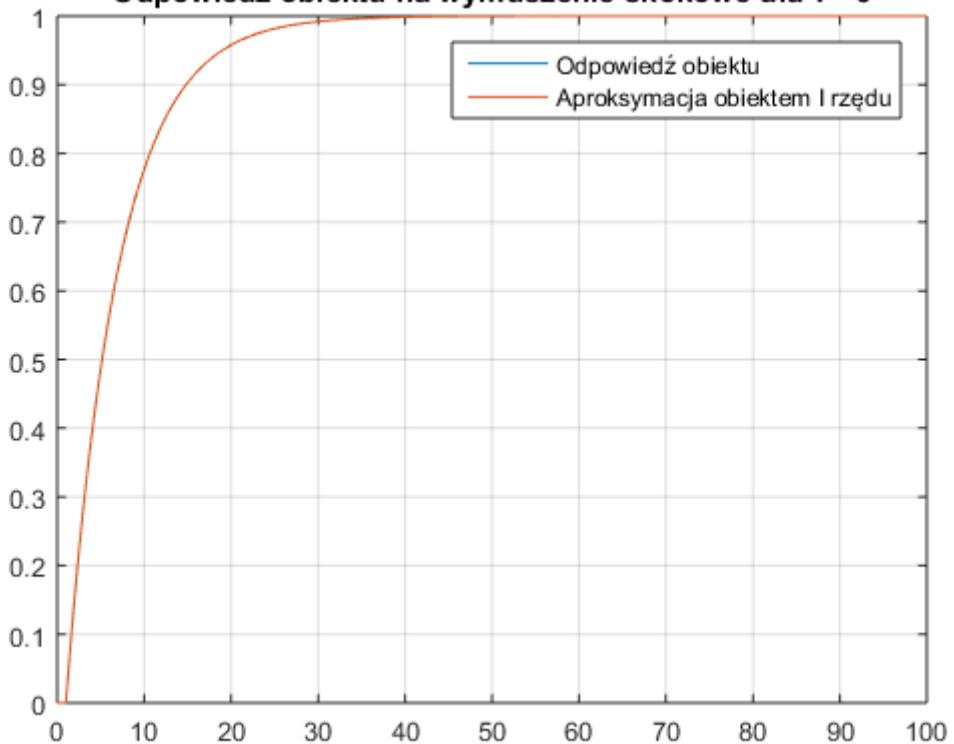
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla T =4



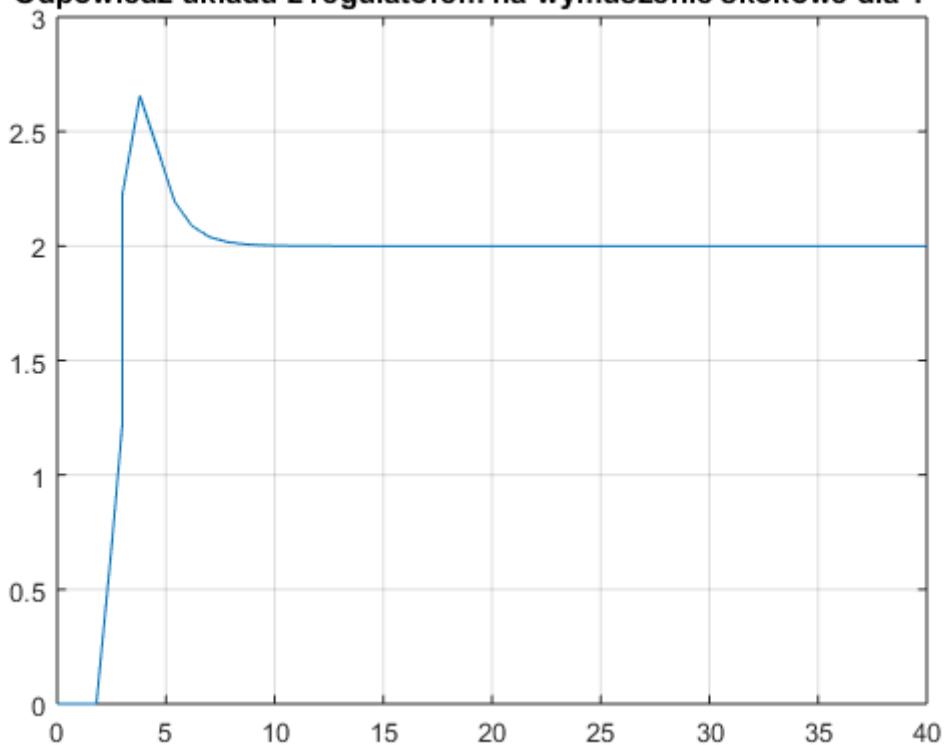
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla T =4



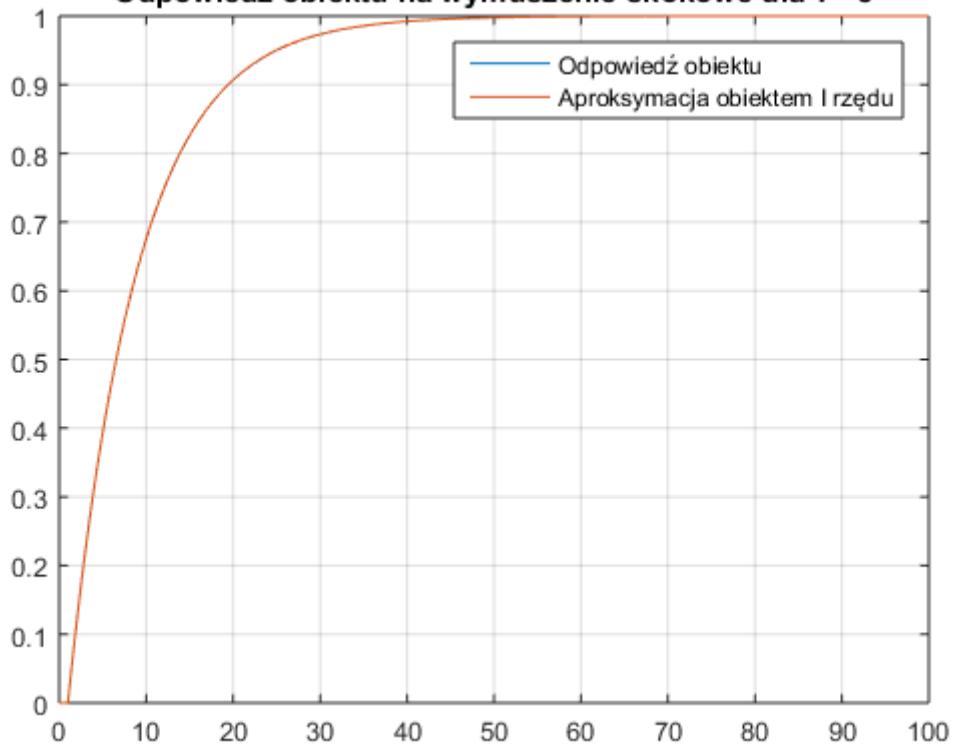
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 6$



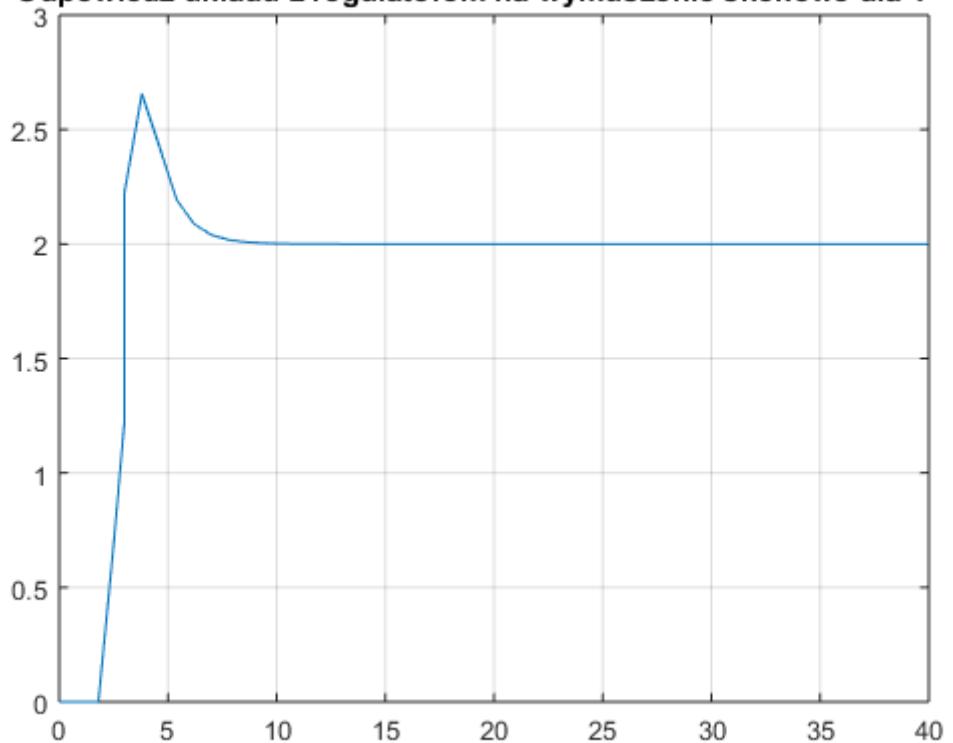
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 6$



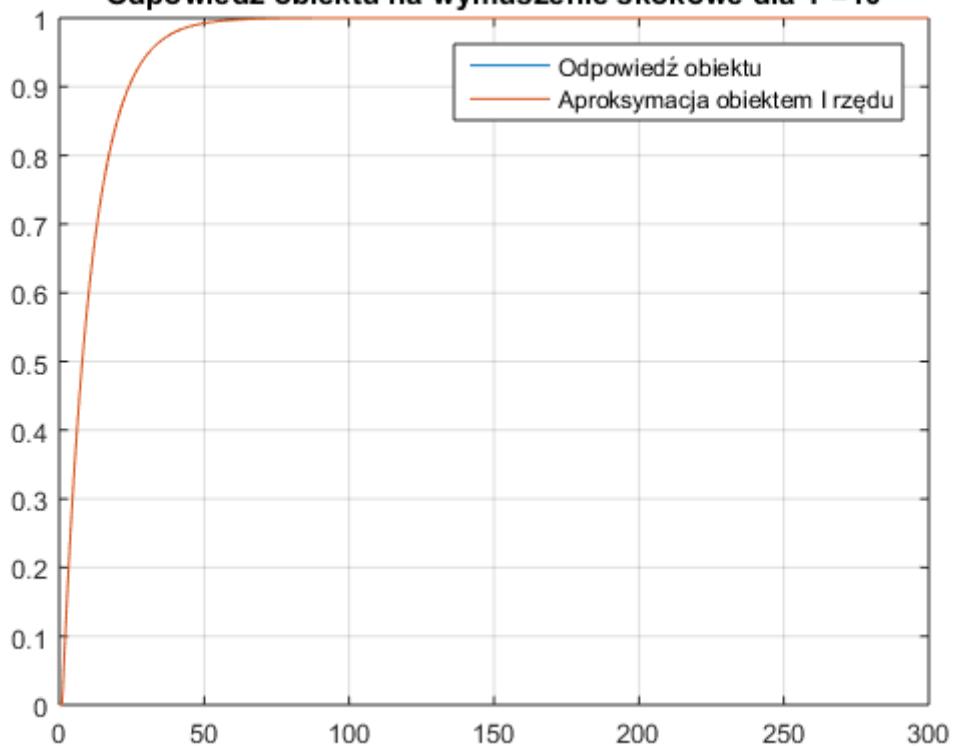
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 8$



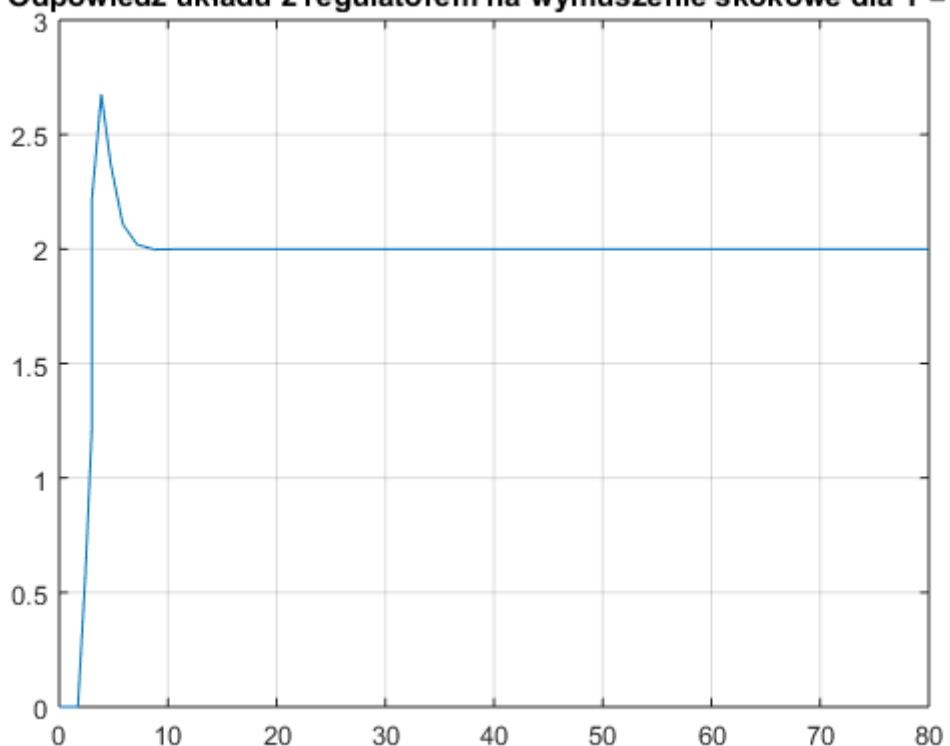
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 8$



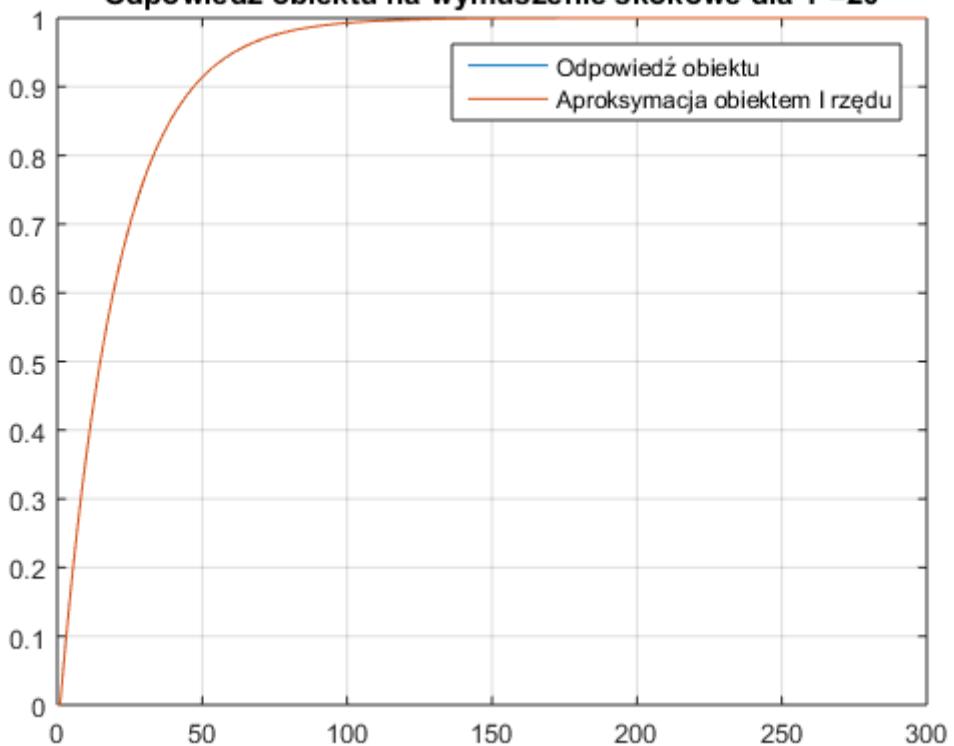
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 10$



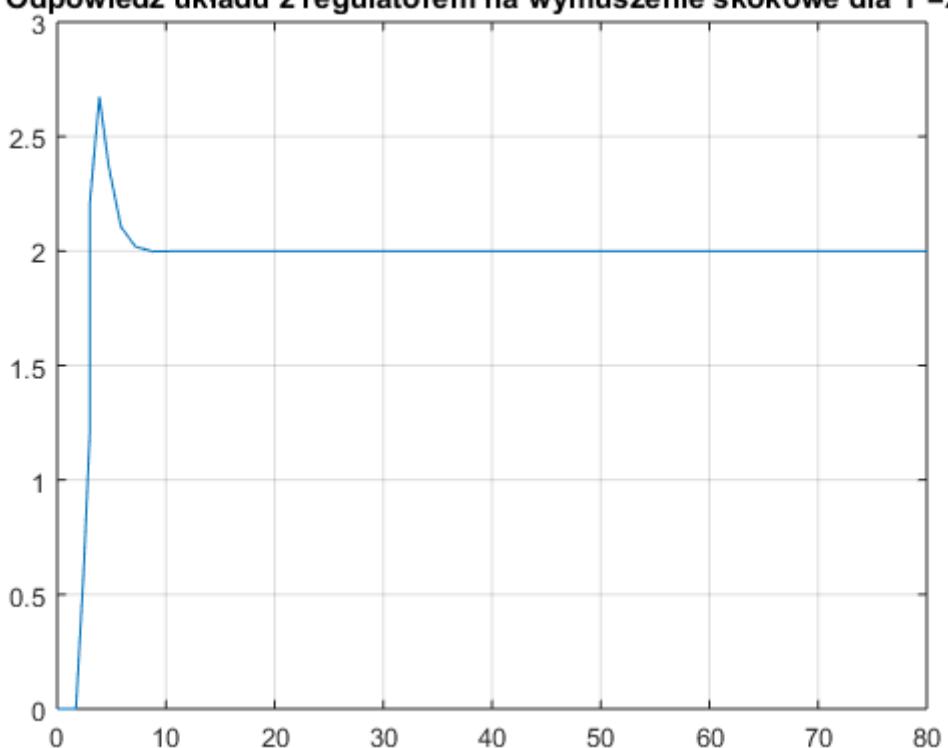
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 10$



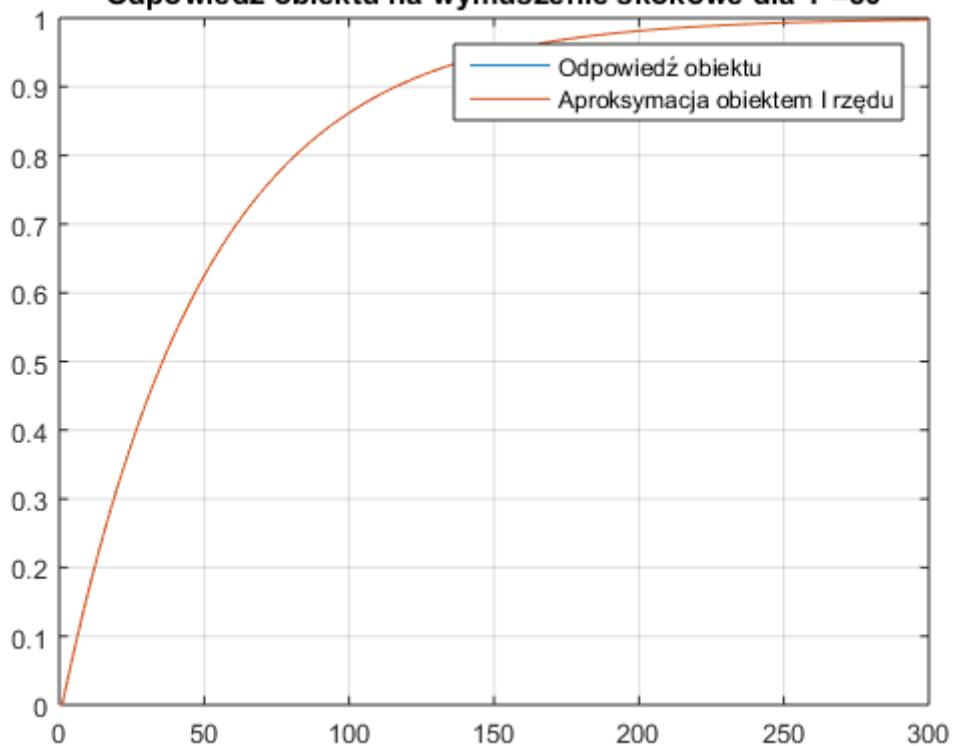
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla T =20



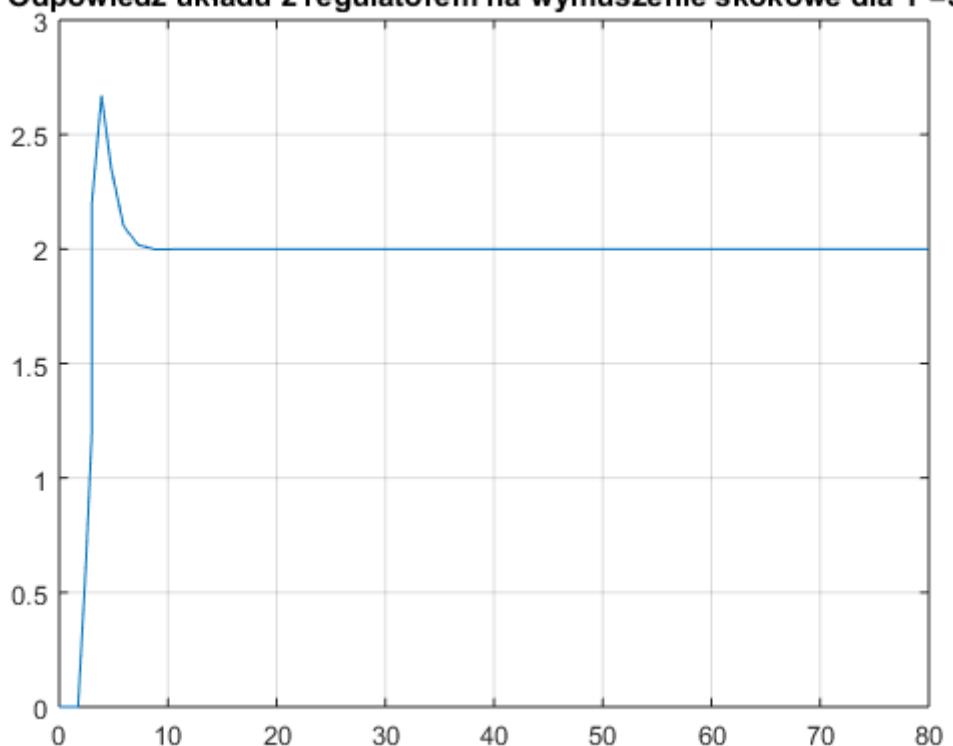
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla T =20



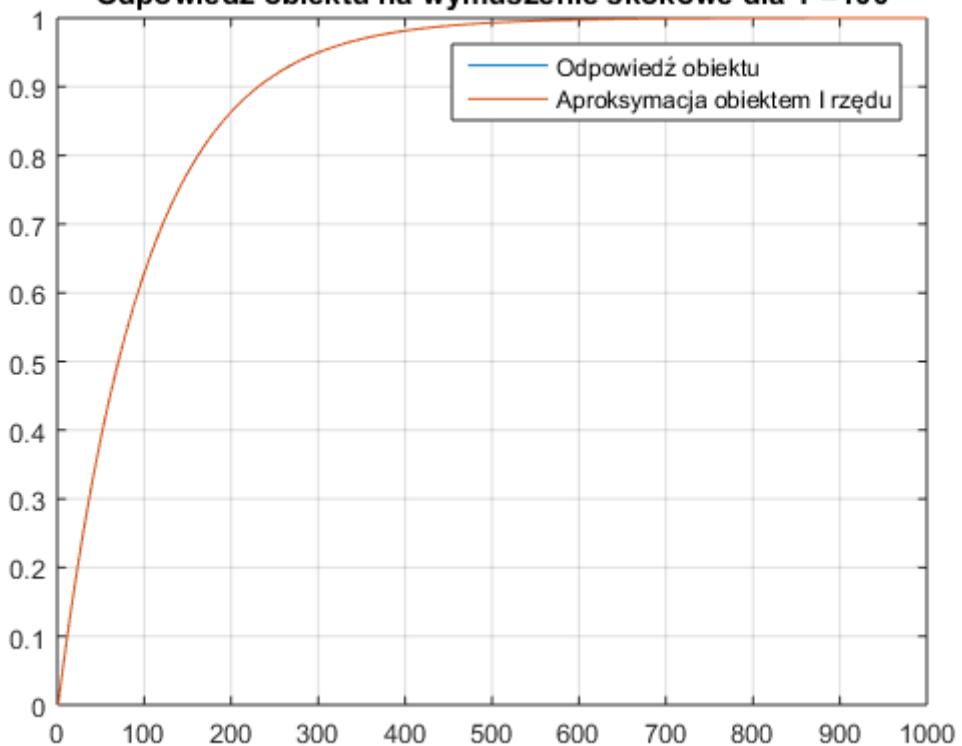
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 50$



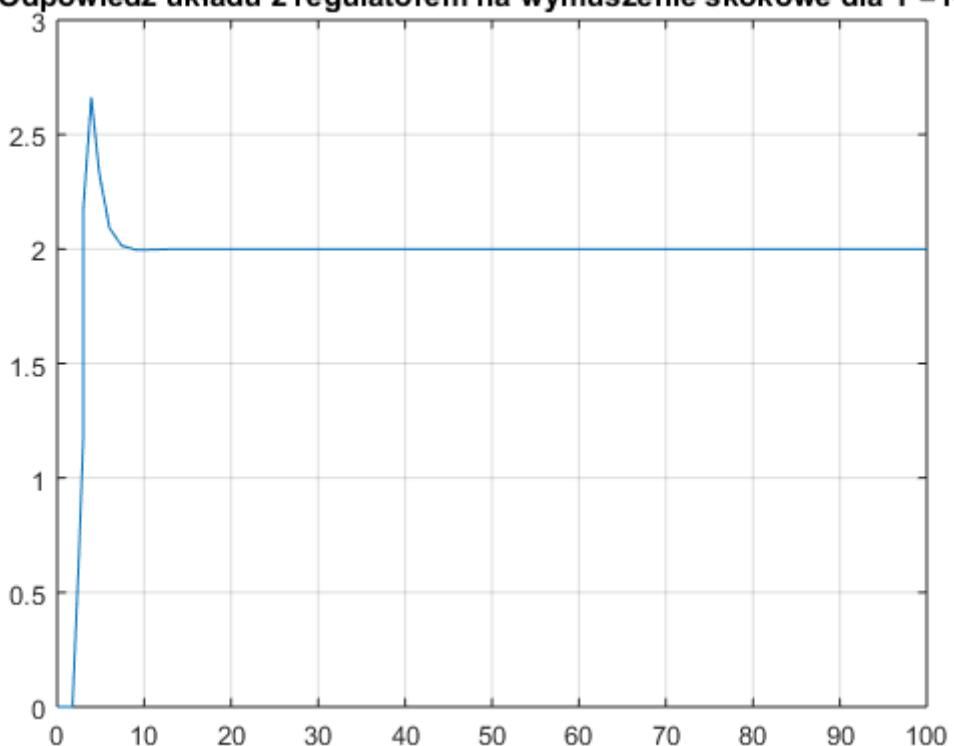
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 50$



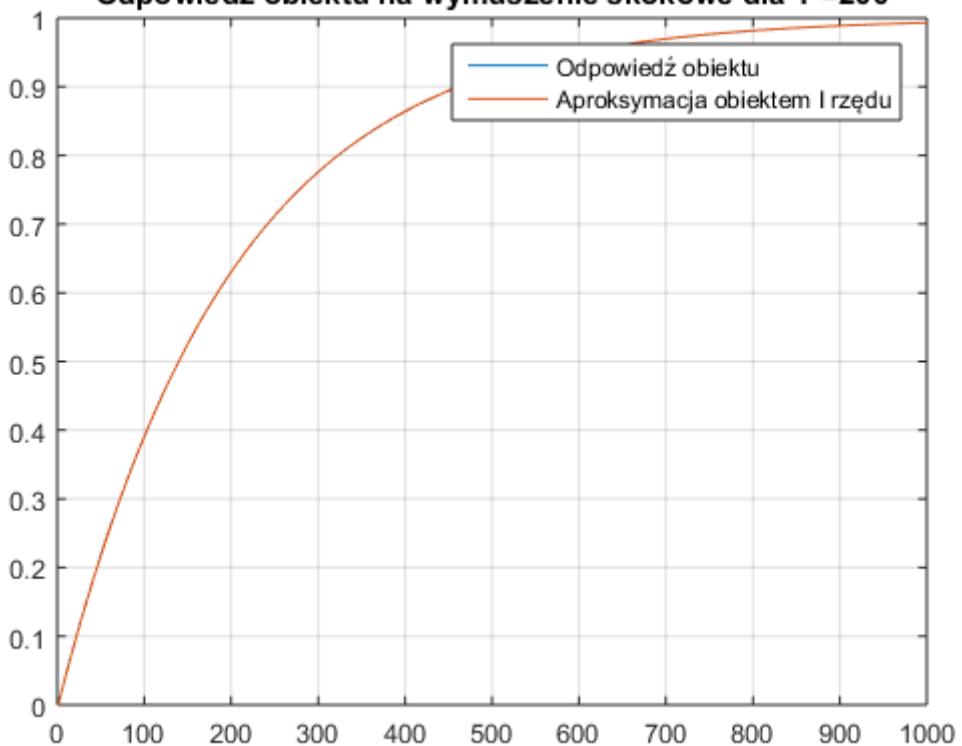
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 100$



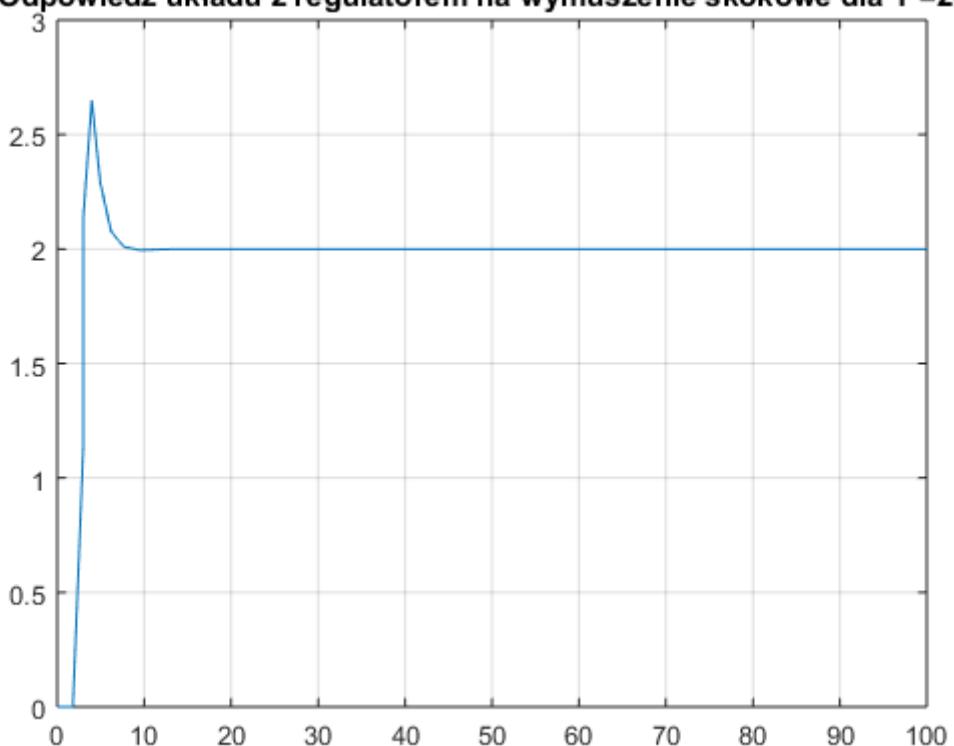
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 100$



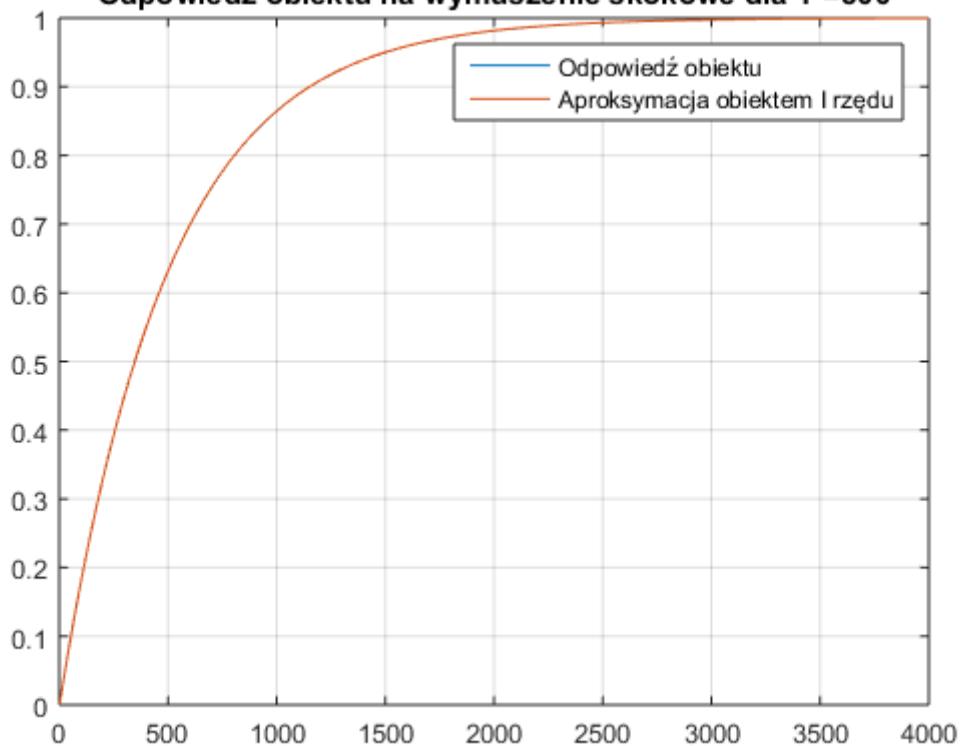
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 200$



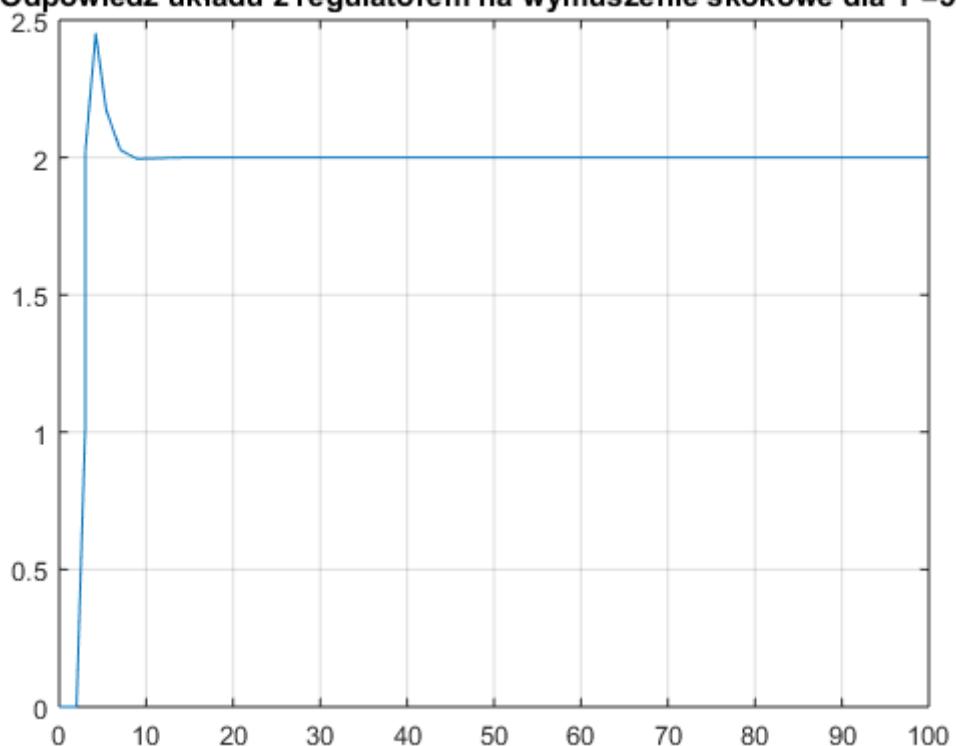
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 200$



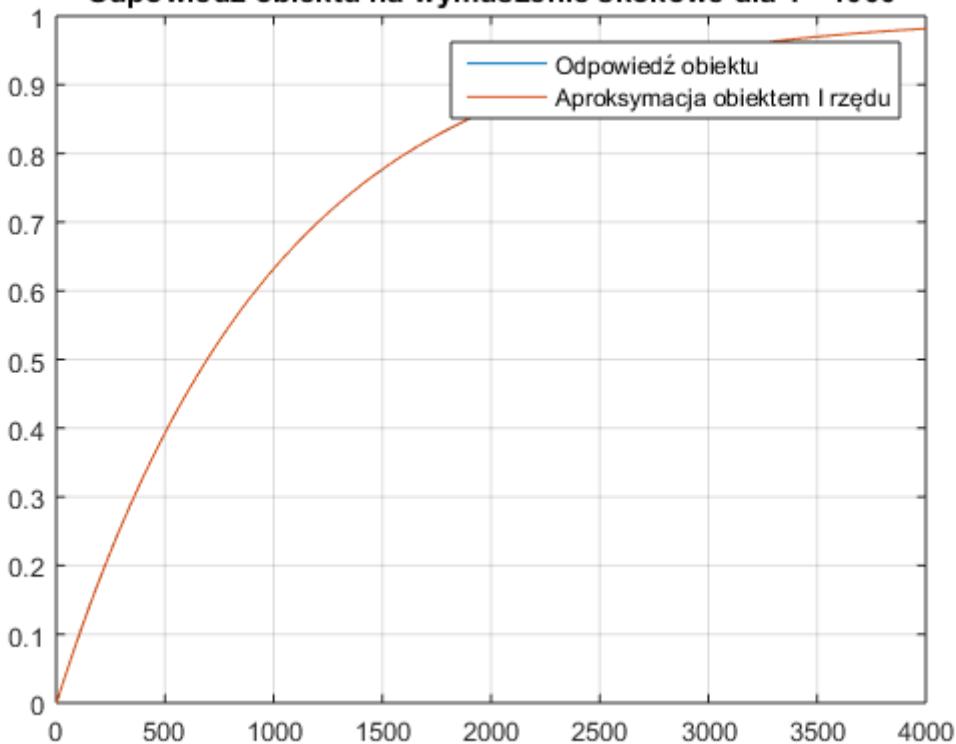
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla T =500



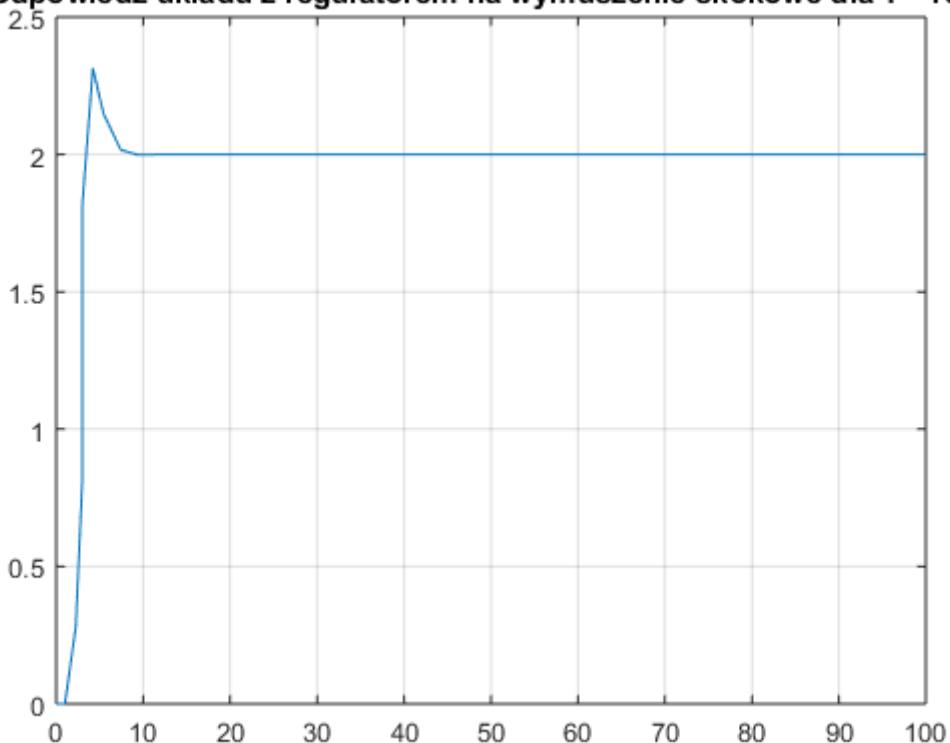
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla T =500



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1000$



Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1000$



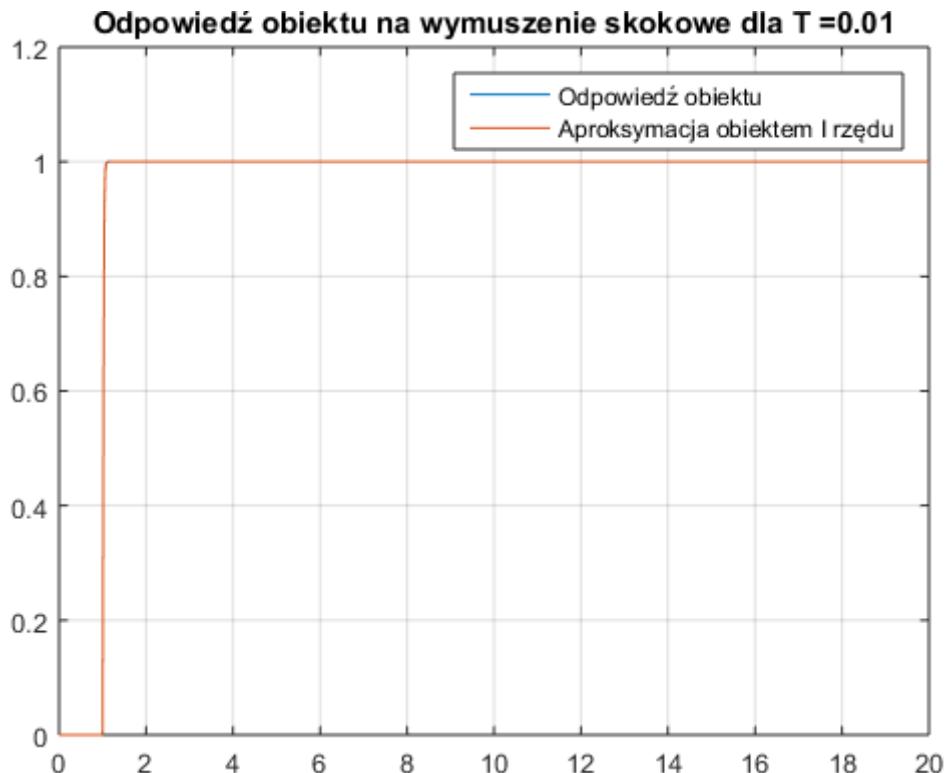
Obiektem badanym był obiekt inercyjny I rzędu. Aproksymacje i odpowiedzi skokowe pokrywają się bardzo dokładnie. Odpowiedzi układu z regulatorem PI są znakomite, ponieważ układ osiąga wartość zadawaną w krótkim czasie i jest stabilny. Zmiana stałej czasowej obiektu bardzo słabo wpływa na działanie układu. Dobór regulatora w oparciu o metodę IMC dla obiektów tego typu spisuje się dobrze.

5. Symulacje dla obiektu G_2 .

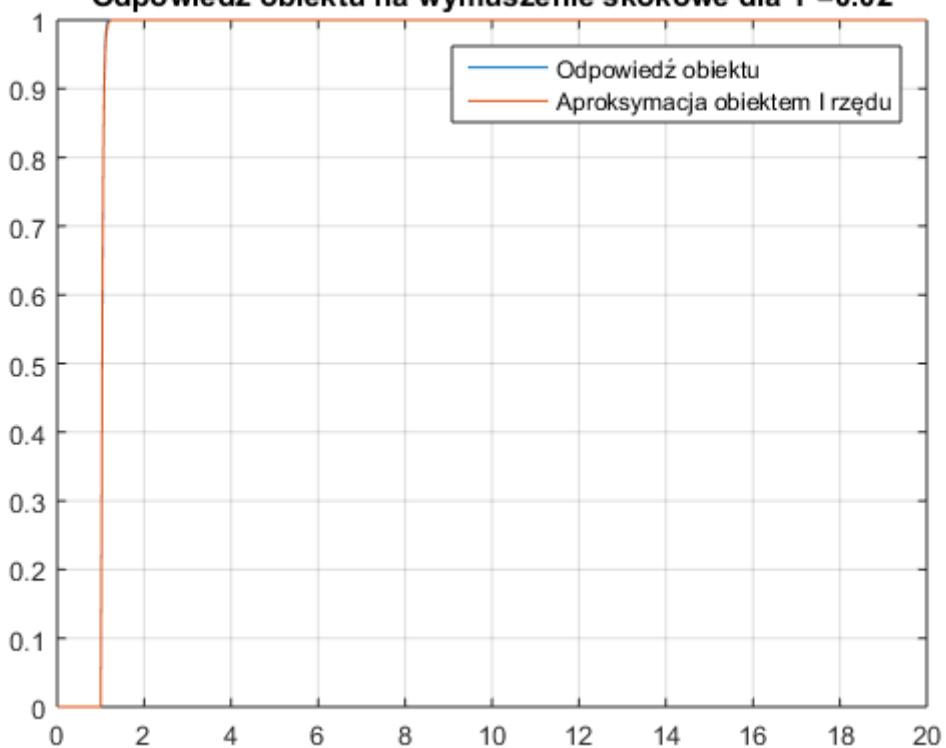
$$G_2 = \frac{e^{-s}}{(1 + sT)^2}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając stałą czasową w następujący sposób:

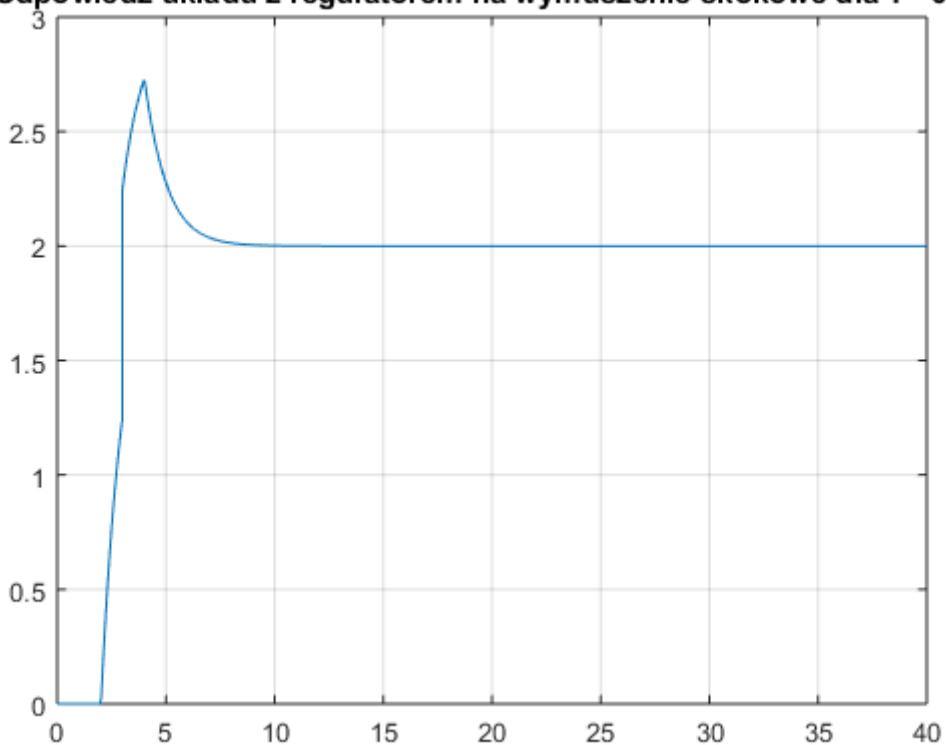
$T = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.5, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 50, 100, 200, 500$



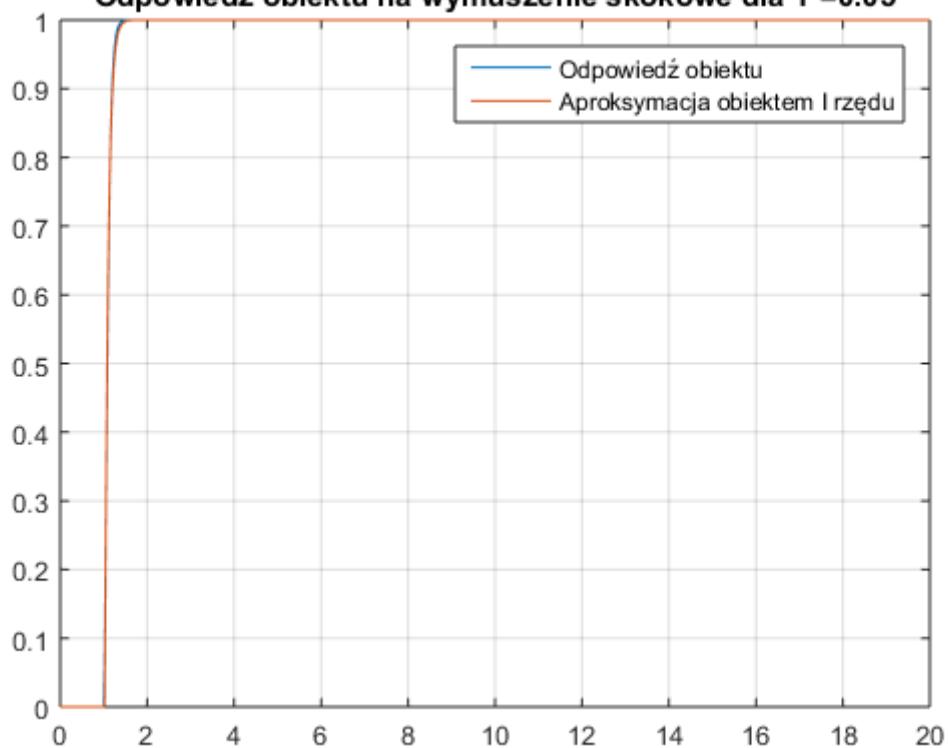
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.02$



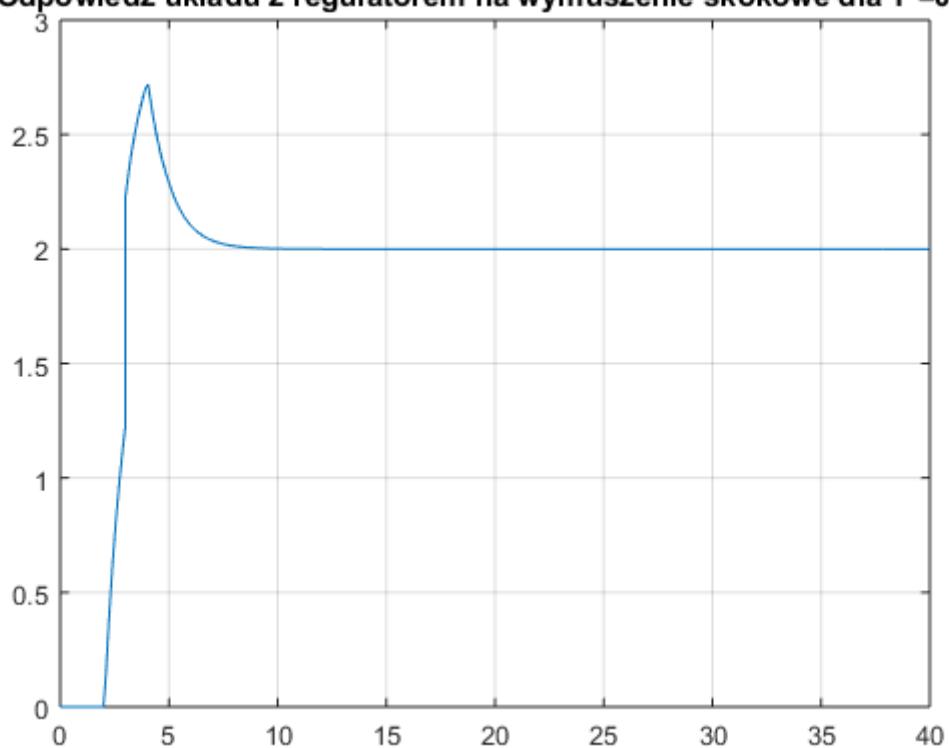
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.02$



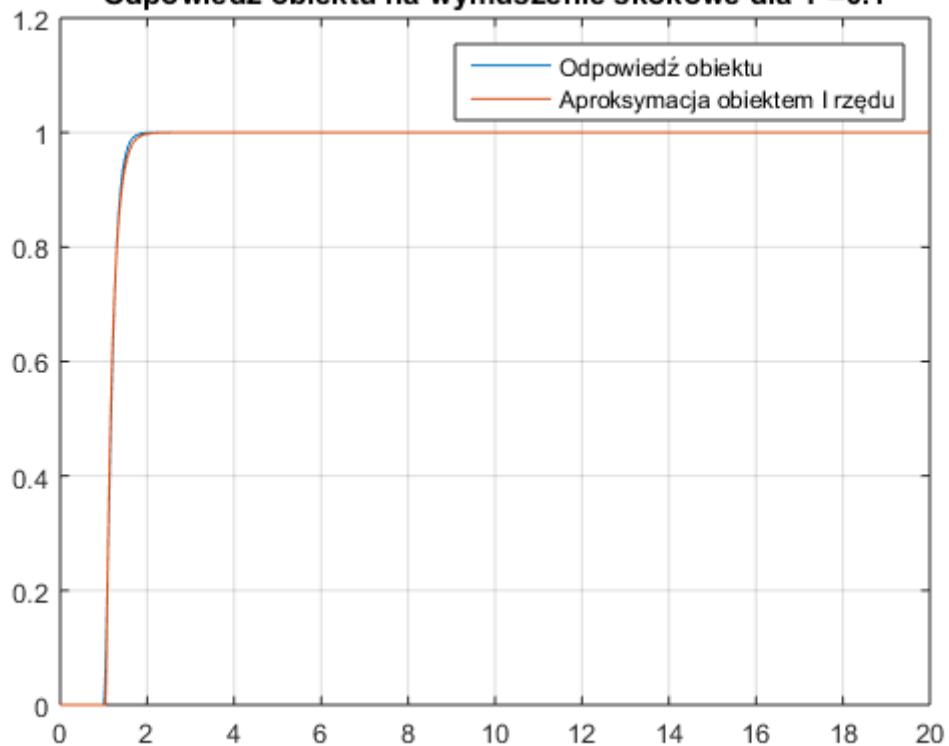
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.05$



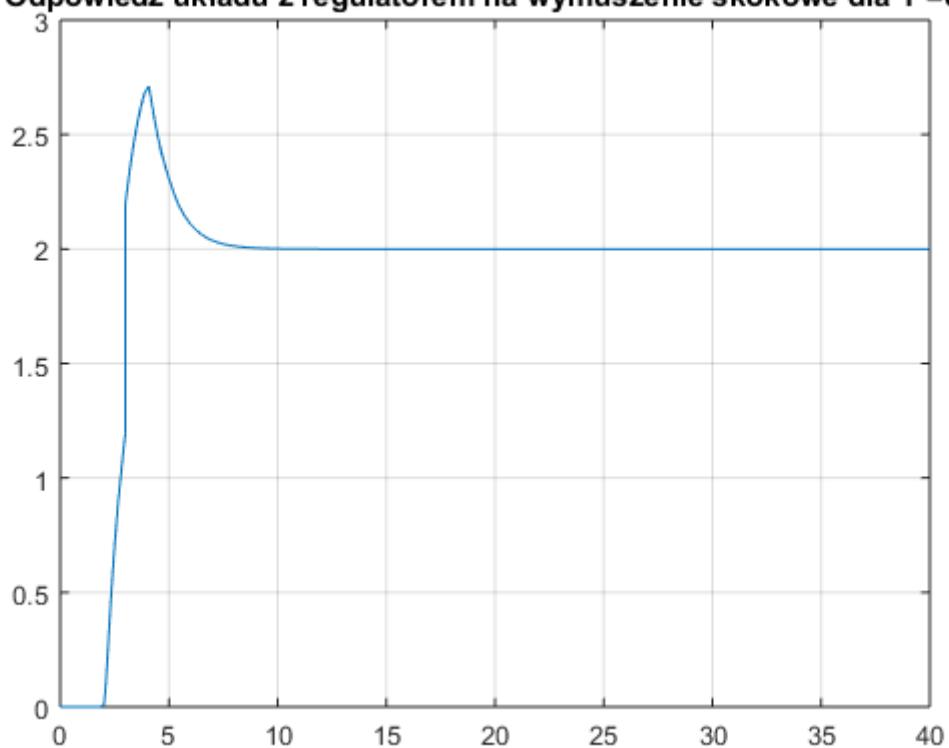
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.05$



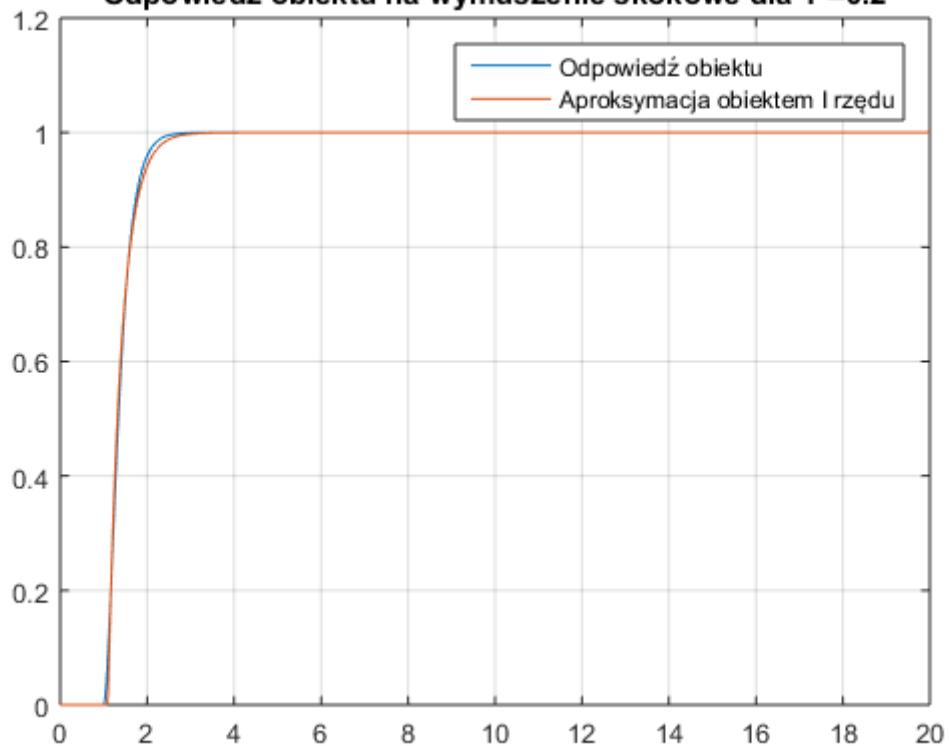
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.1$



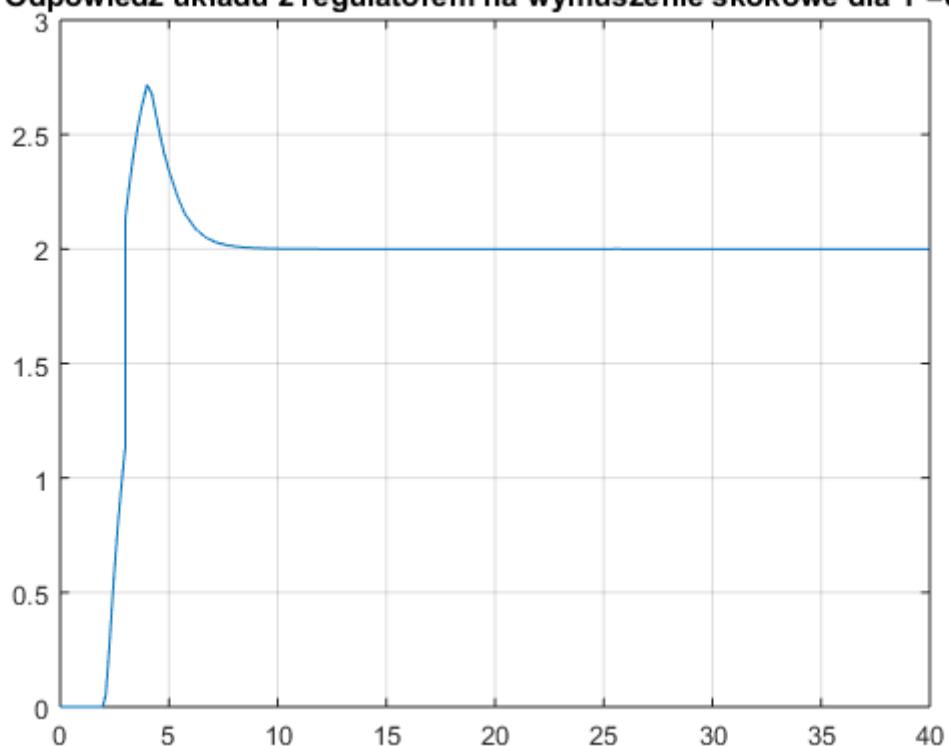
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.1$



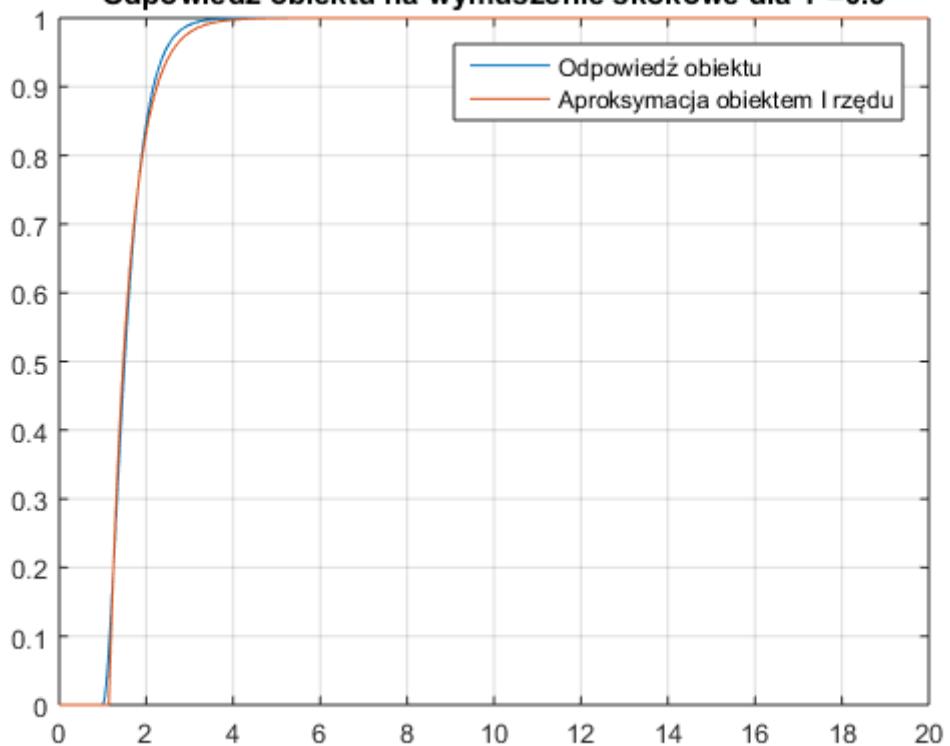
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



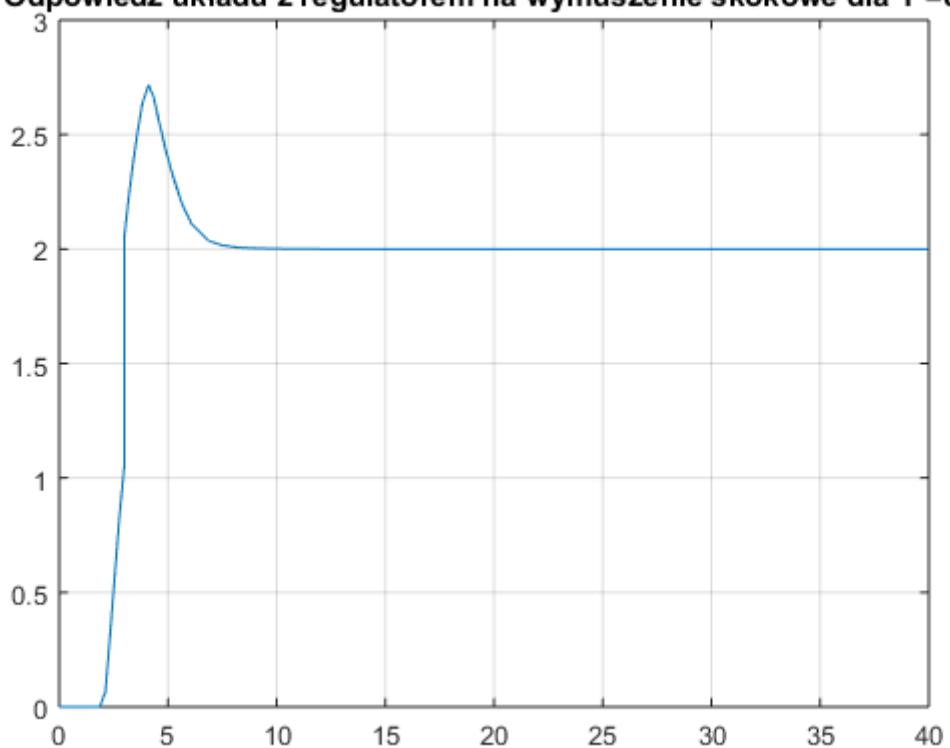
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



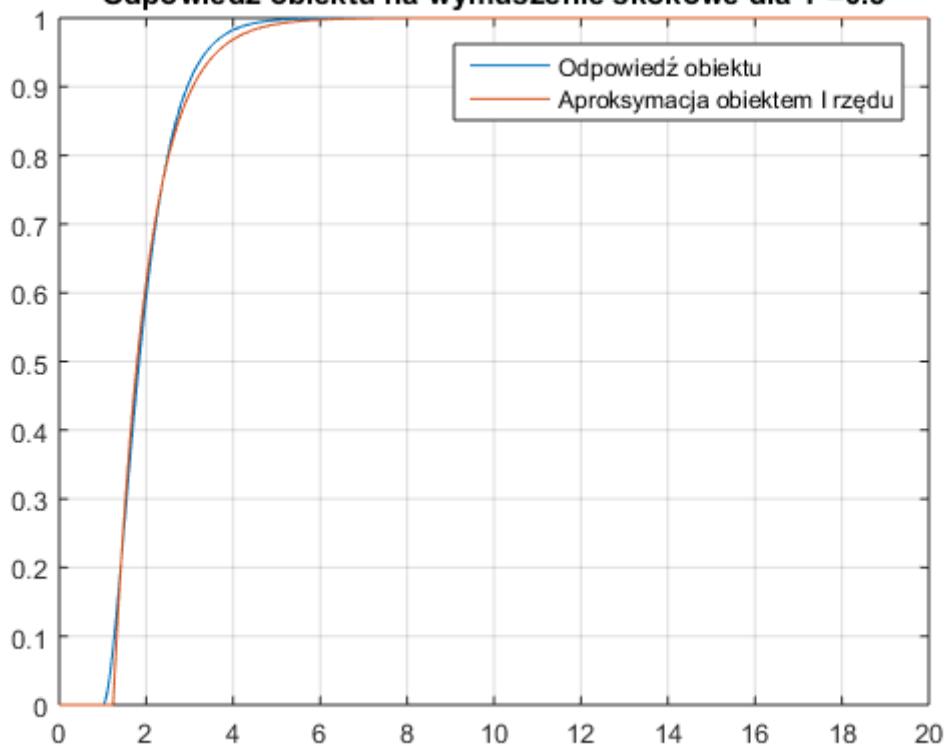
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.3$



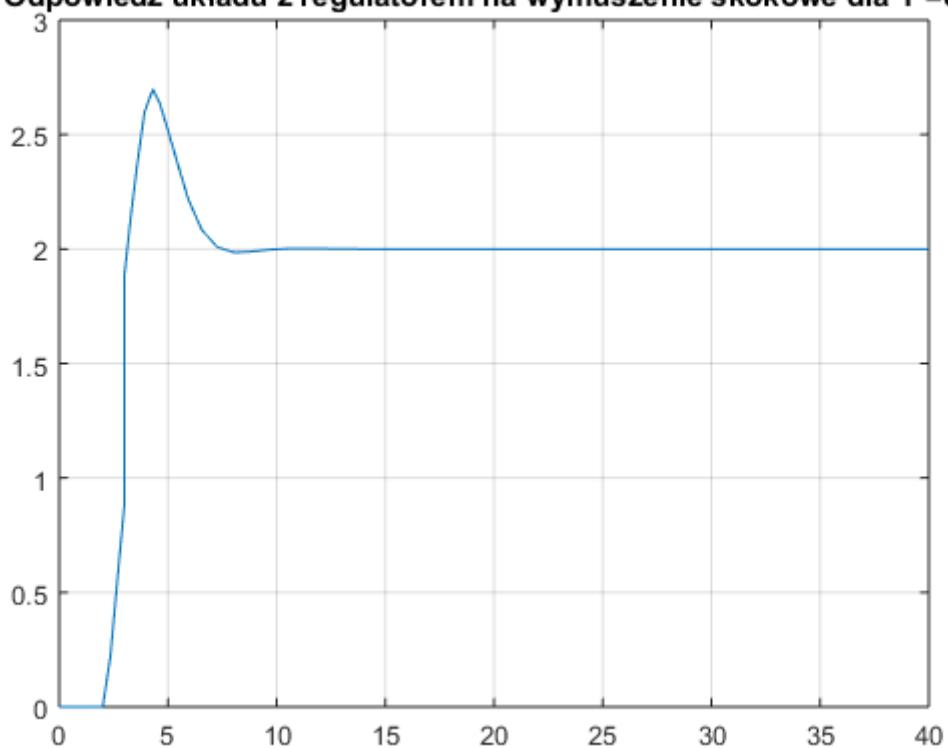
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.3$



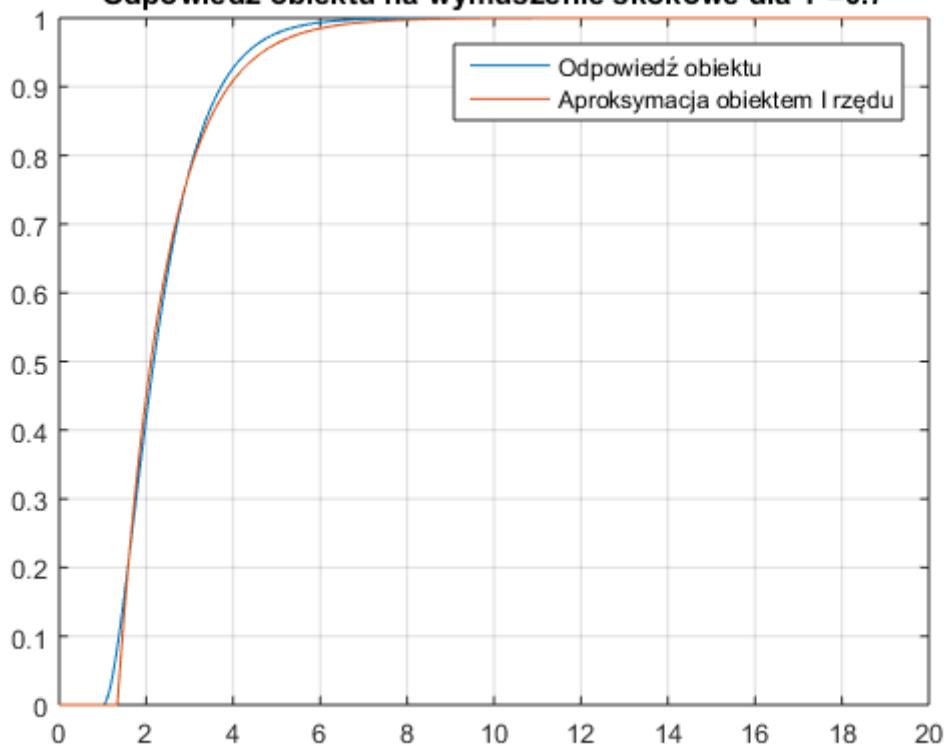
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



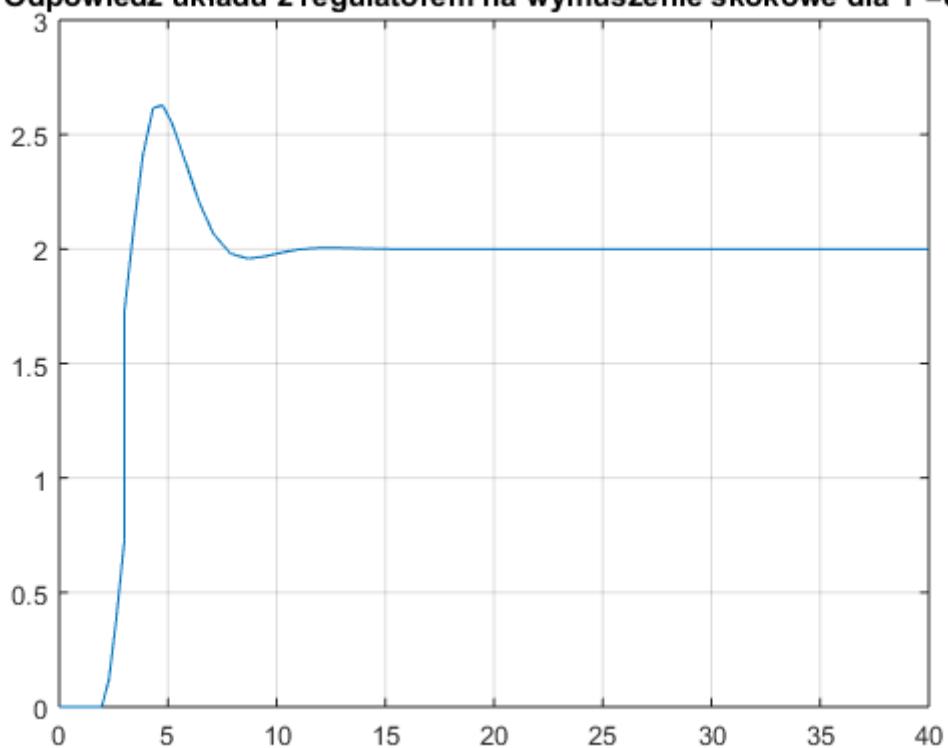
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



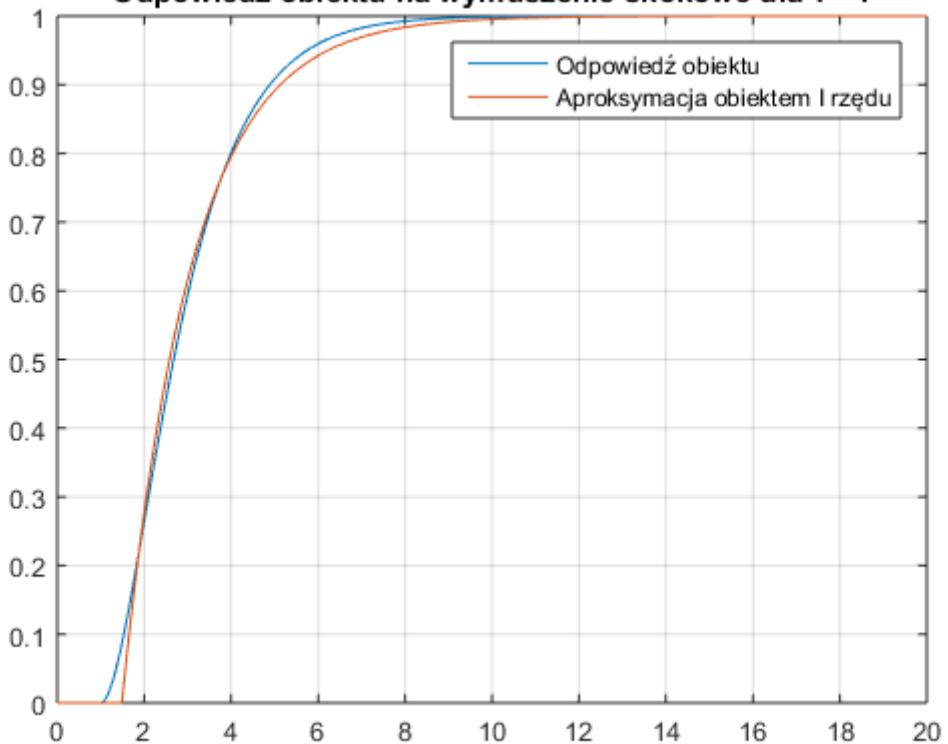
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.7$



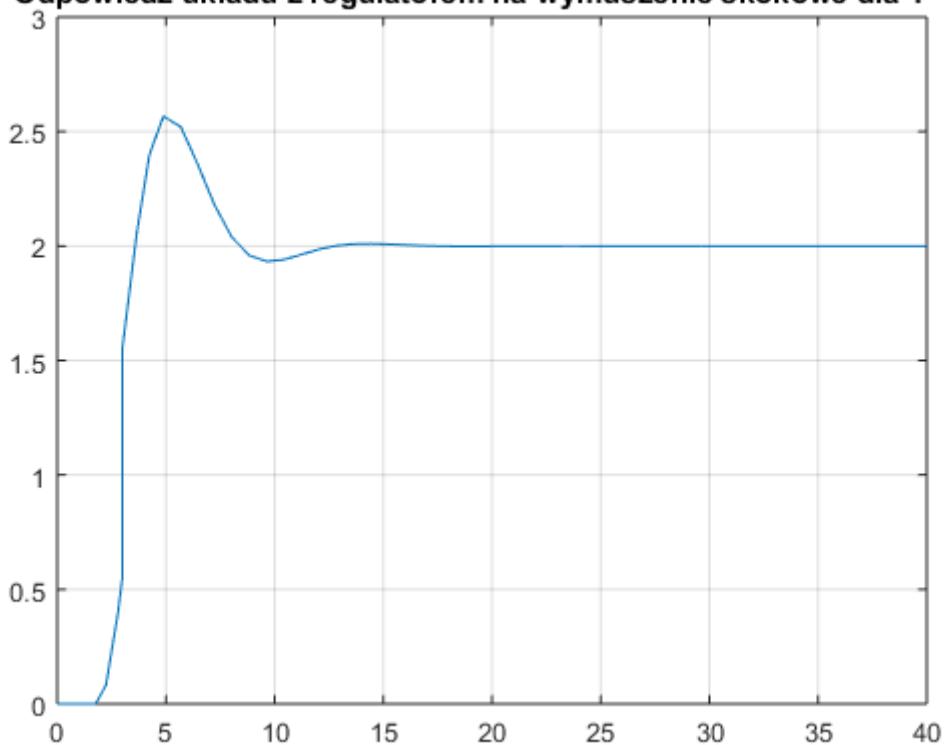
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.7$



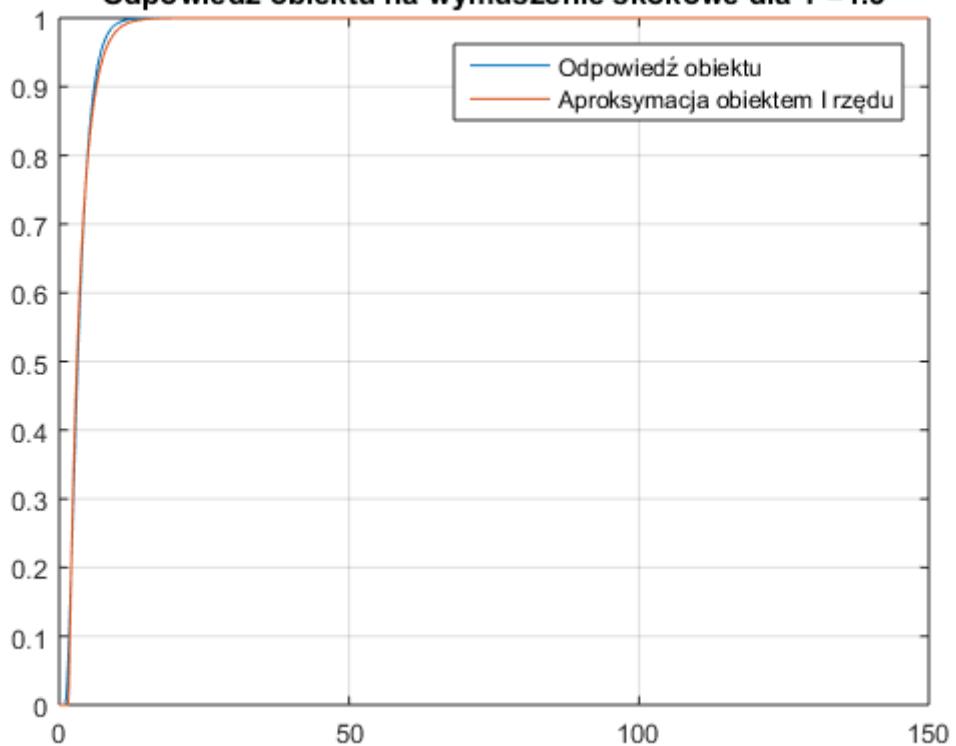
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1$



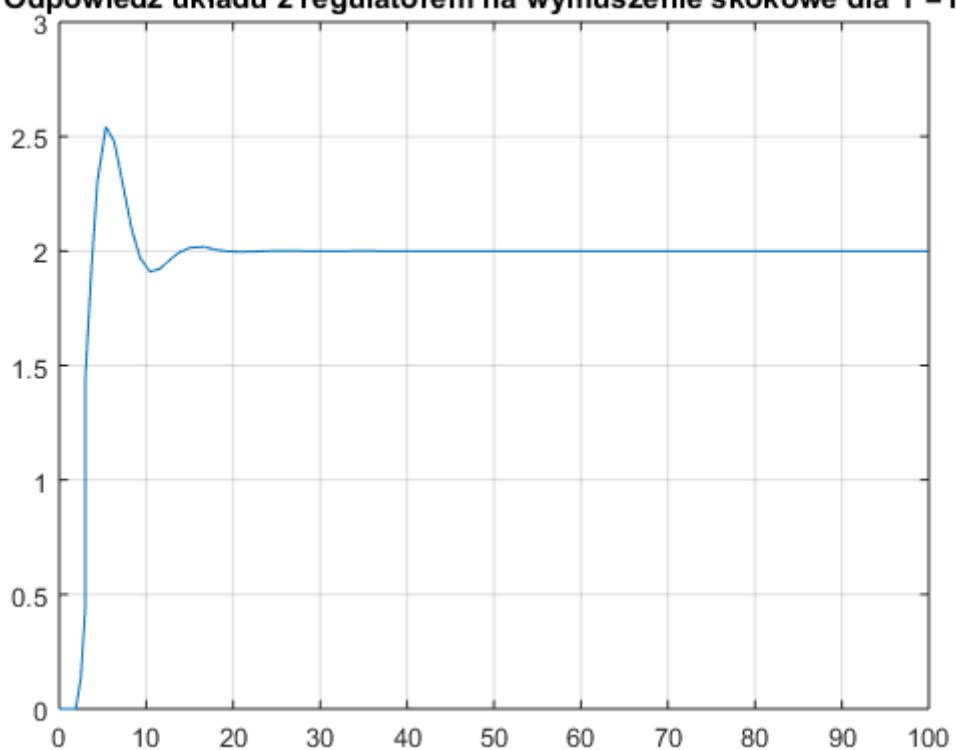
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1$



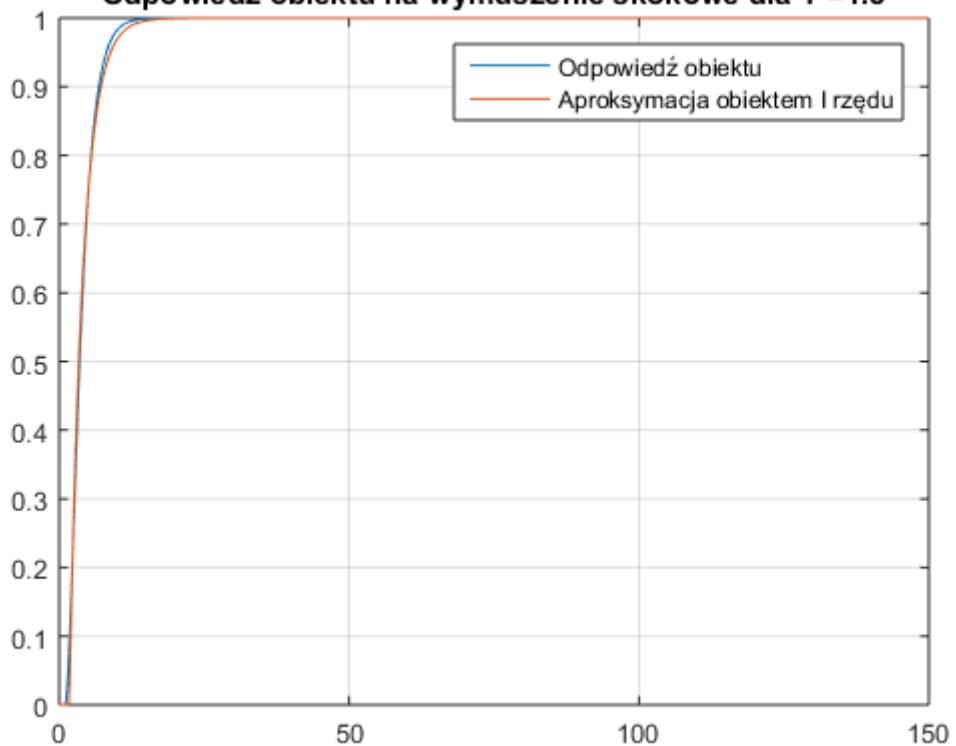
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1.3$



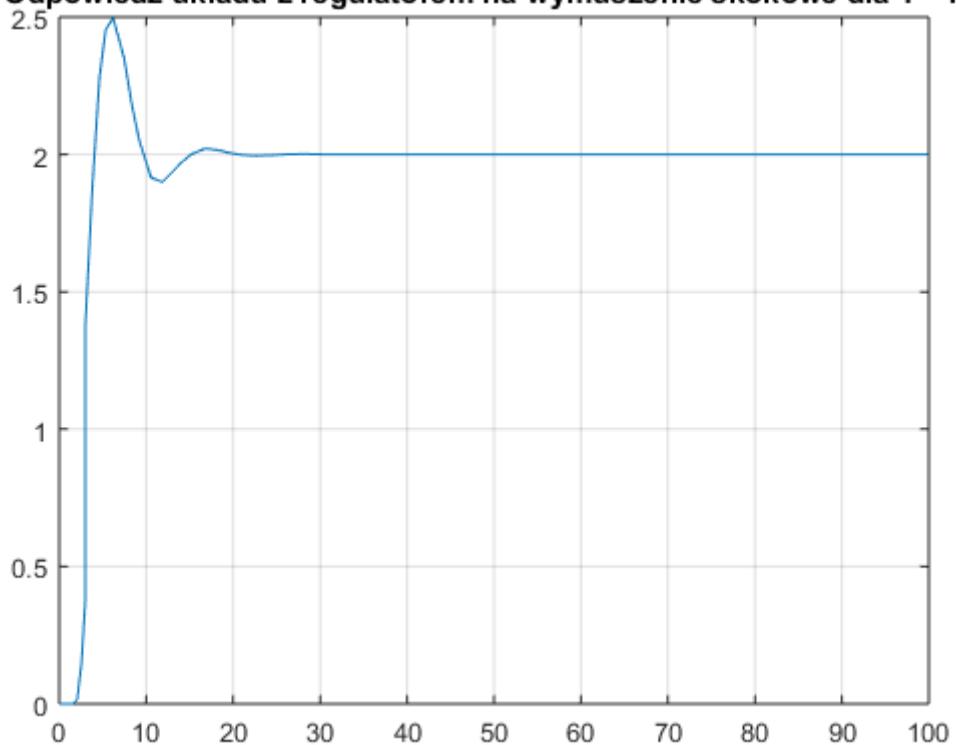
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1.3$



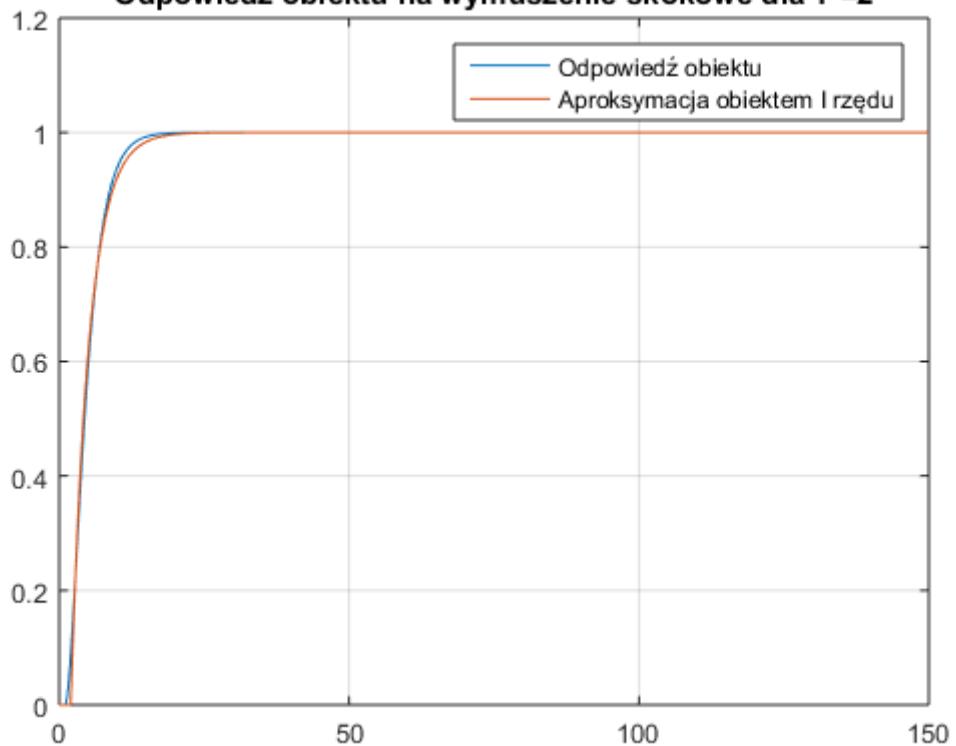
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1.5$



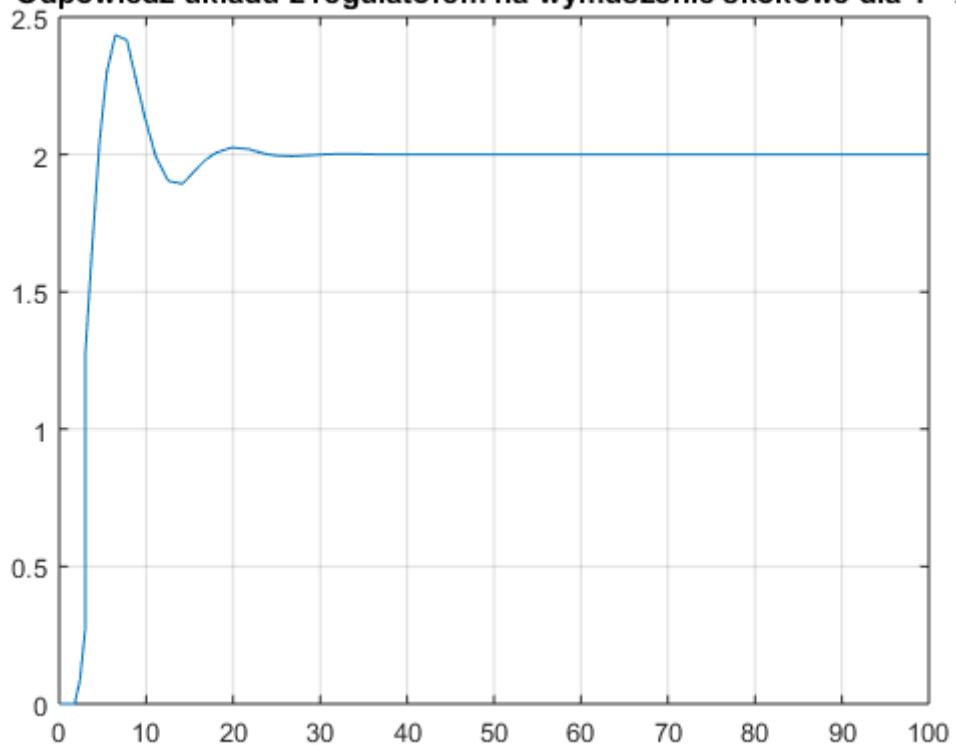
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1.5$



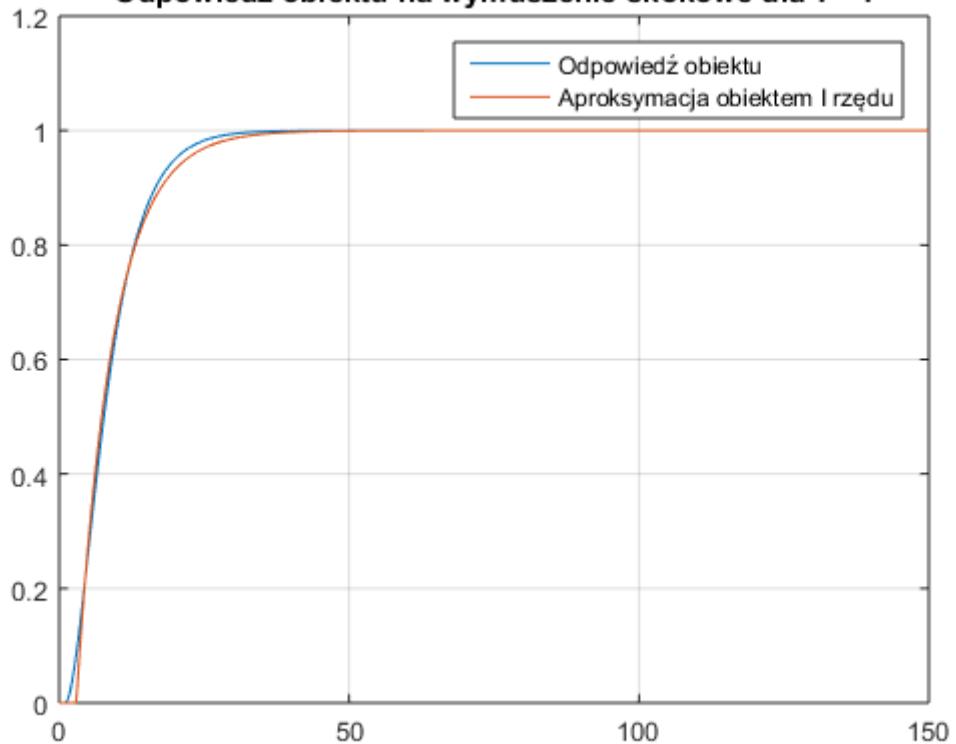
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 2$



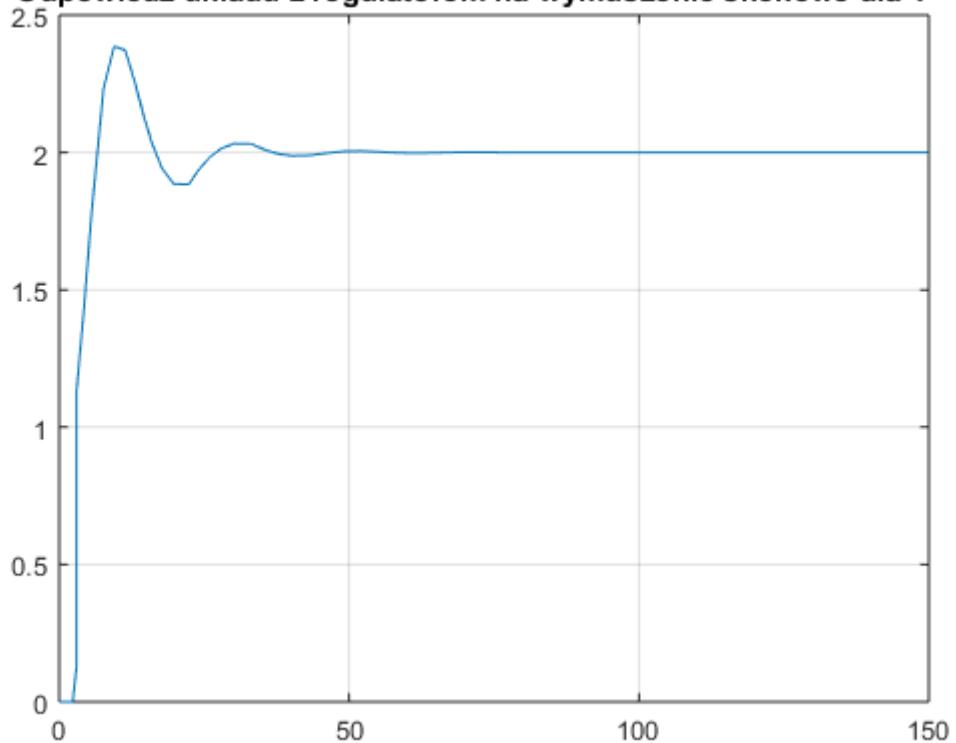
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 2$



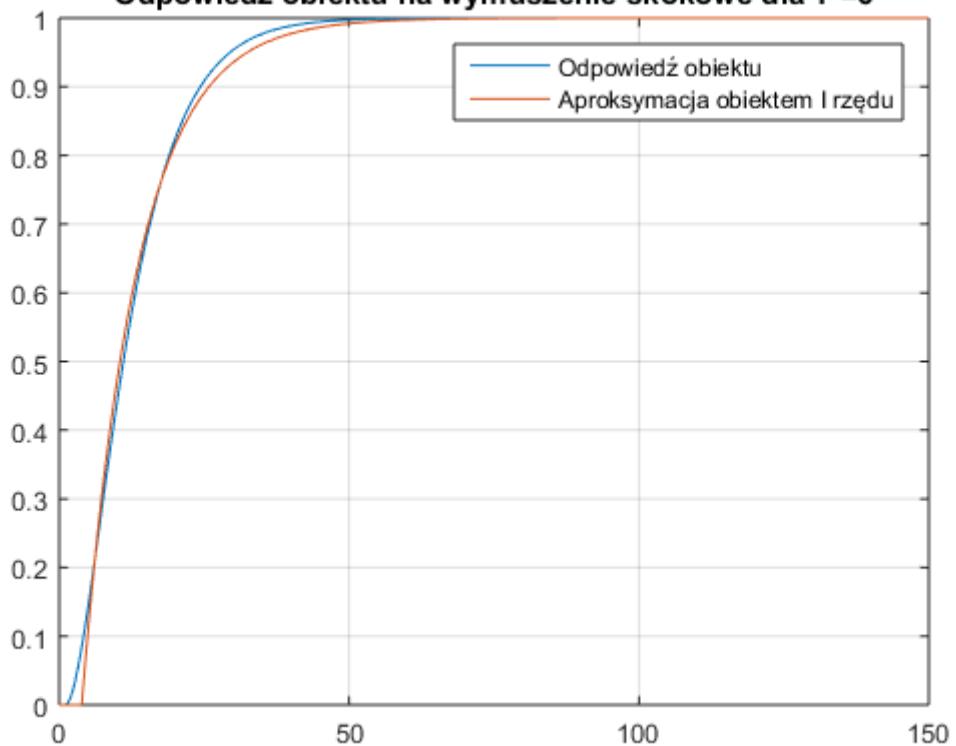
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 4$



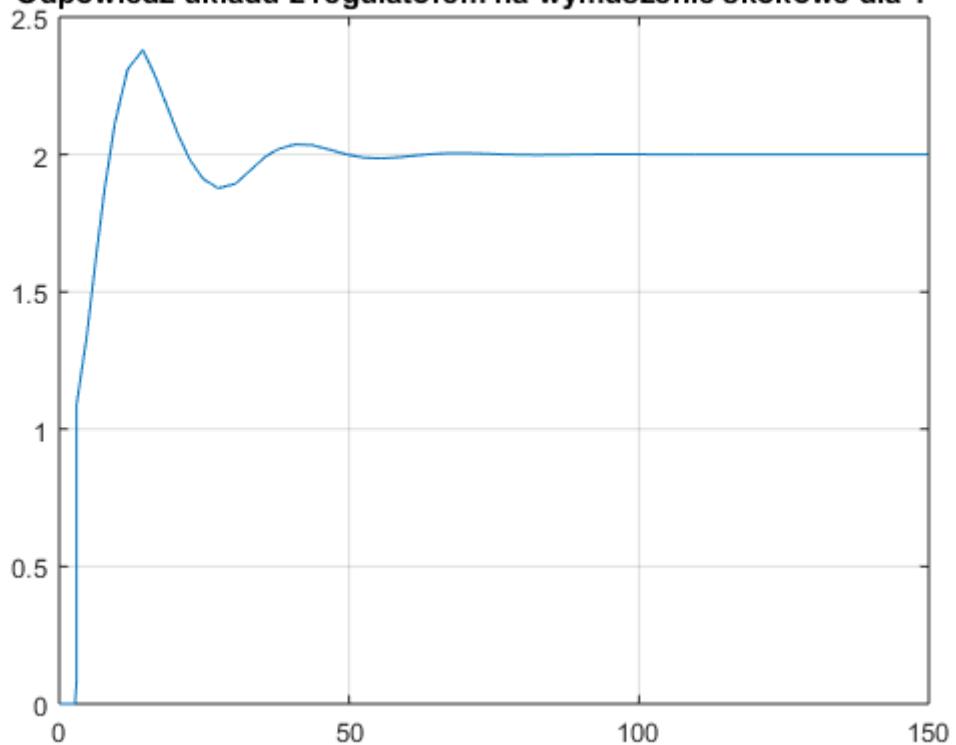
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 4$



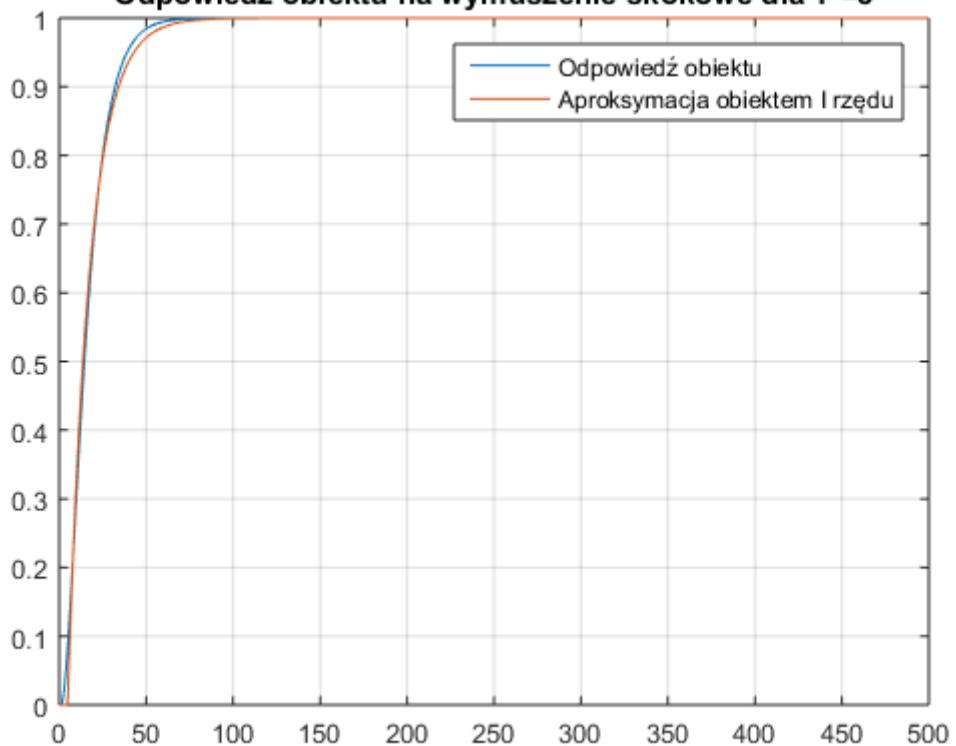
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 6$



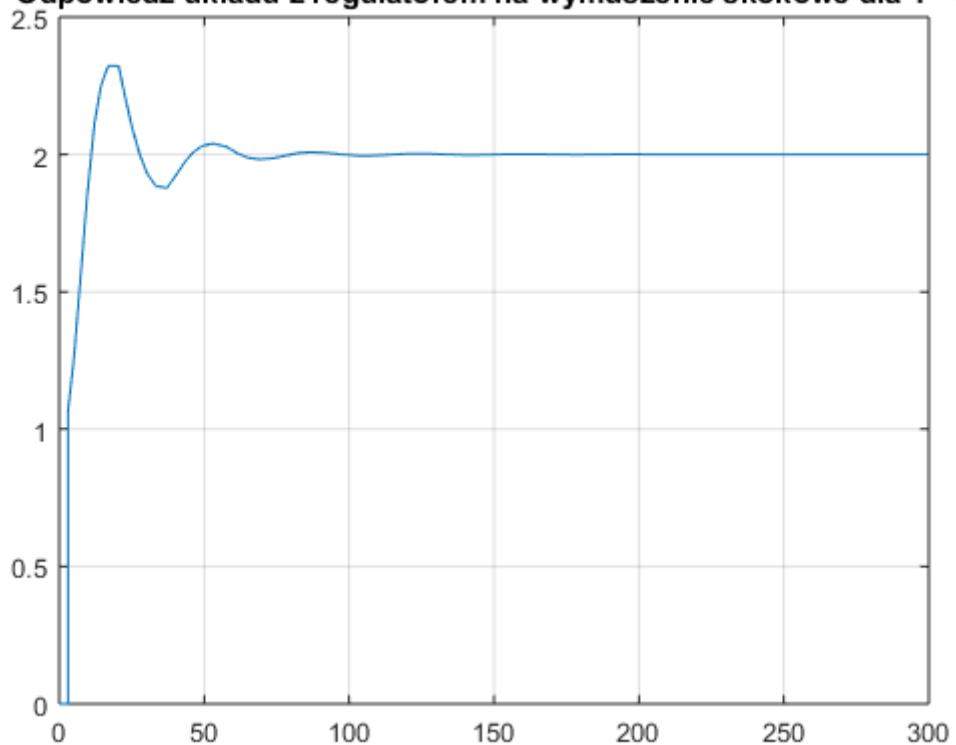
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 6$



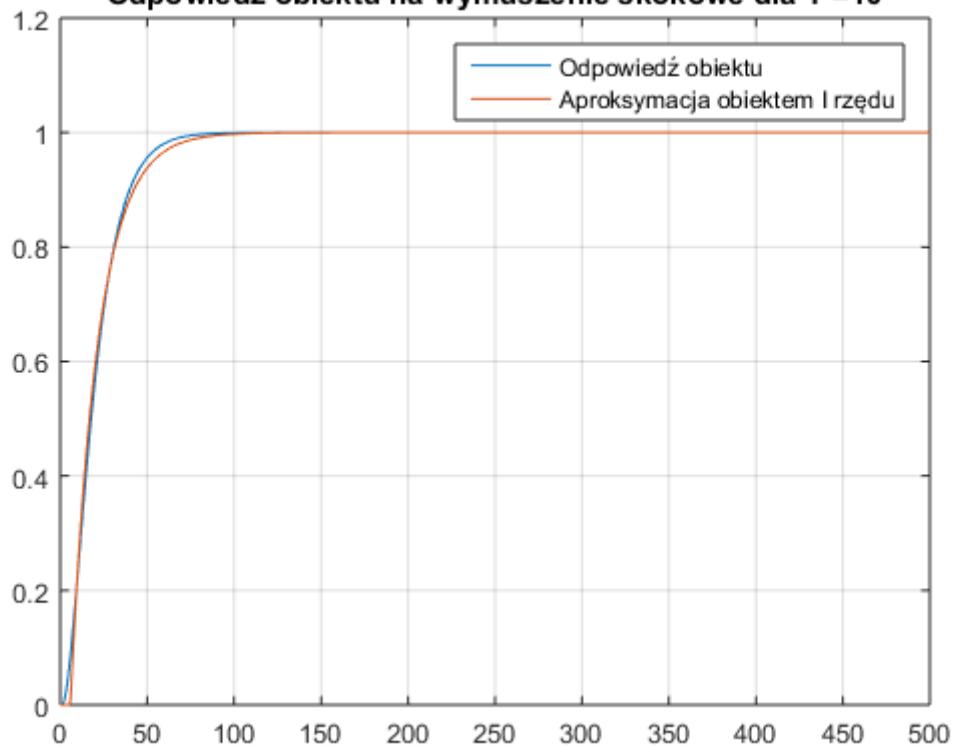
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 8$



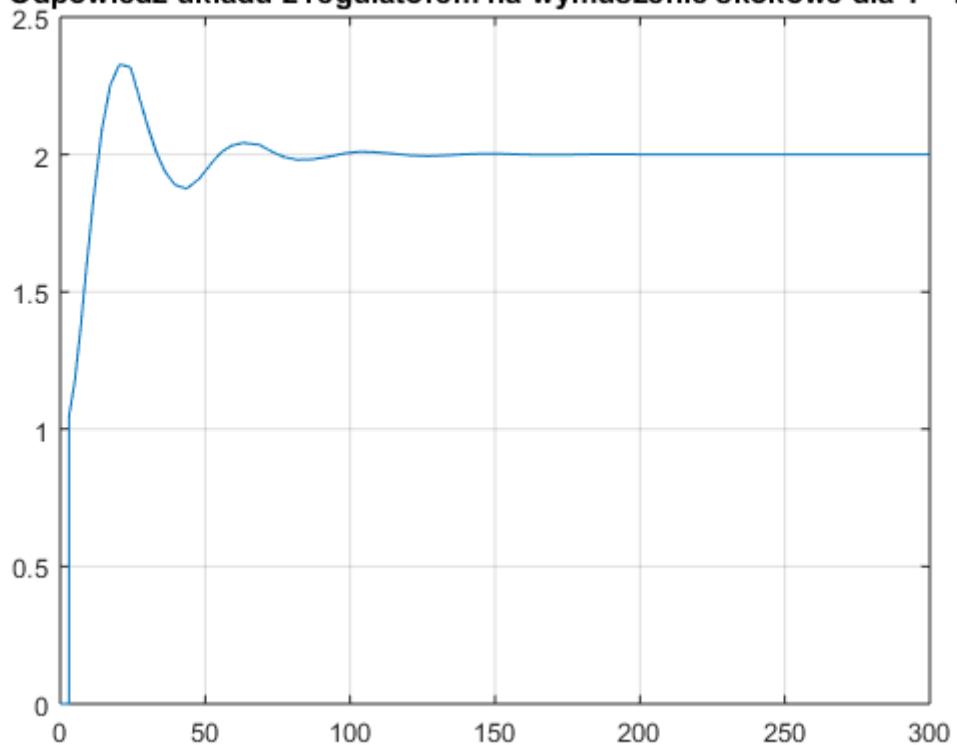
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 8$



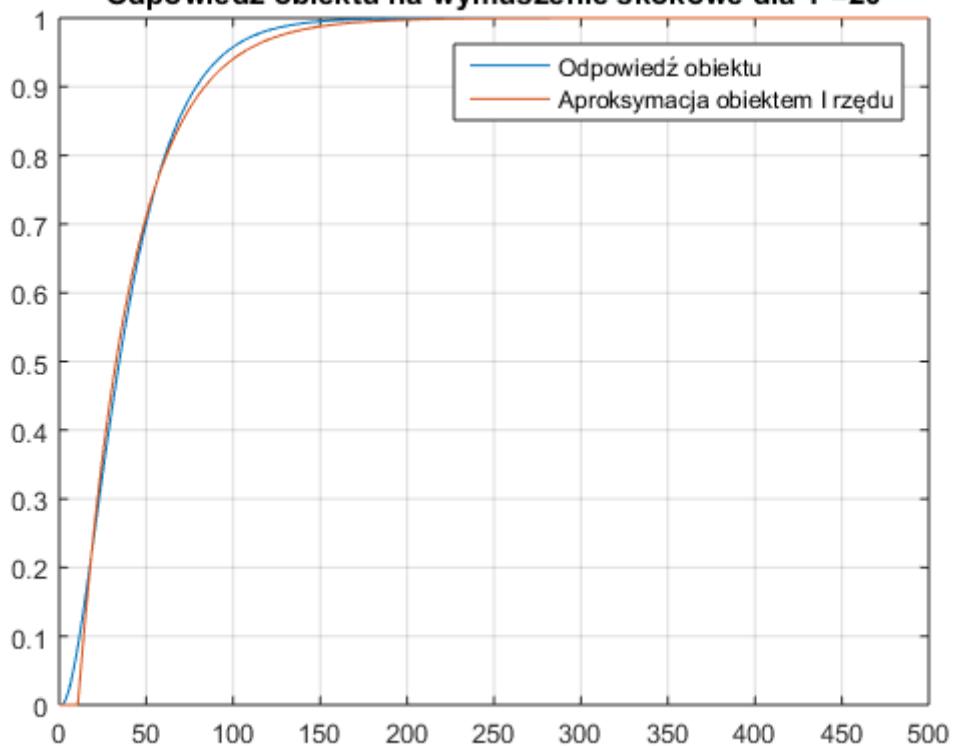
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 10$



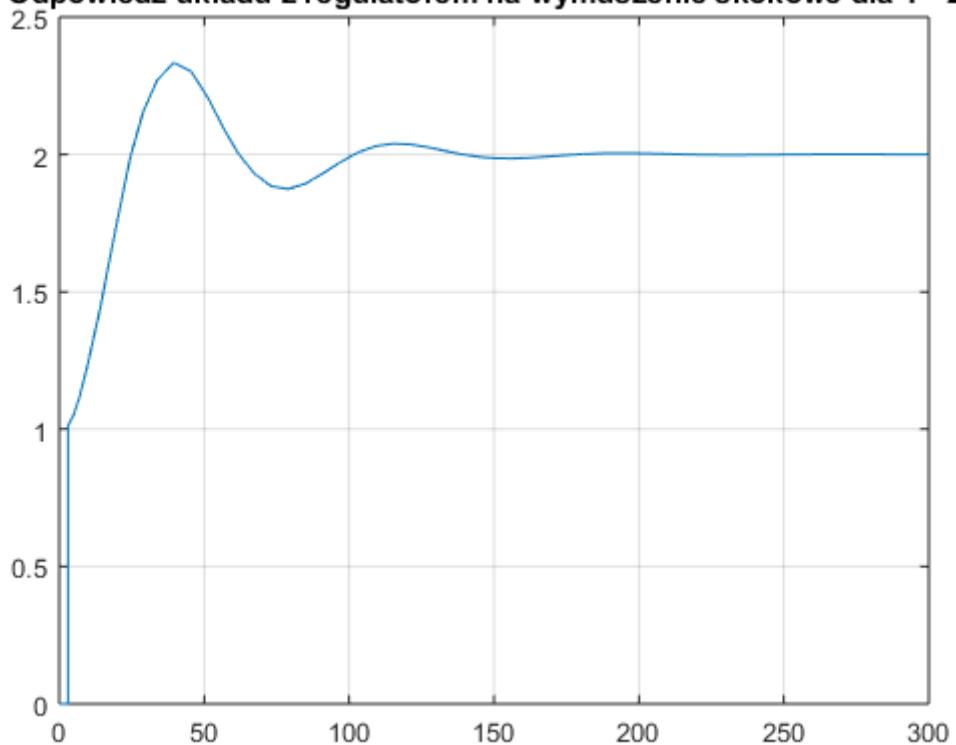
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 10$



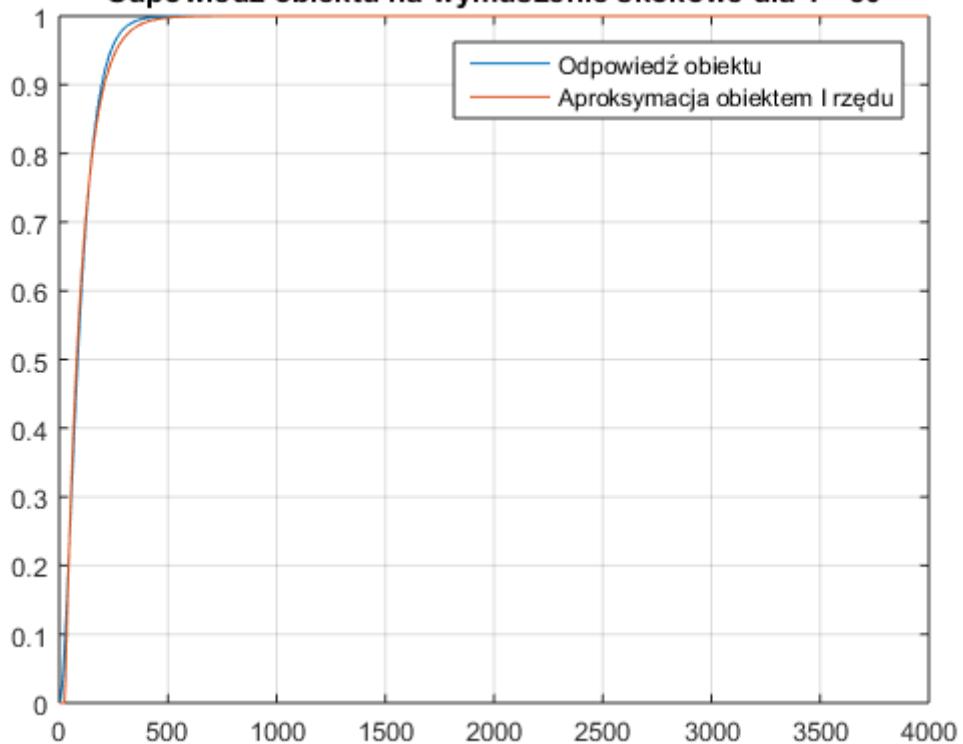
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla T =20



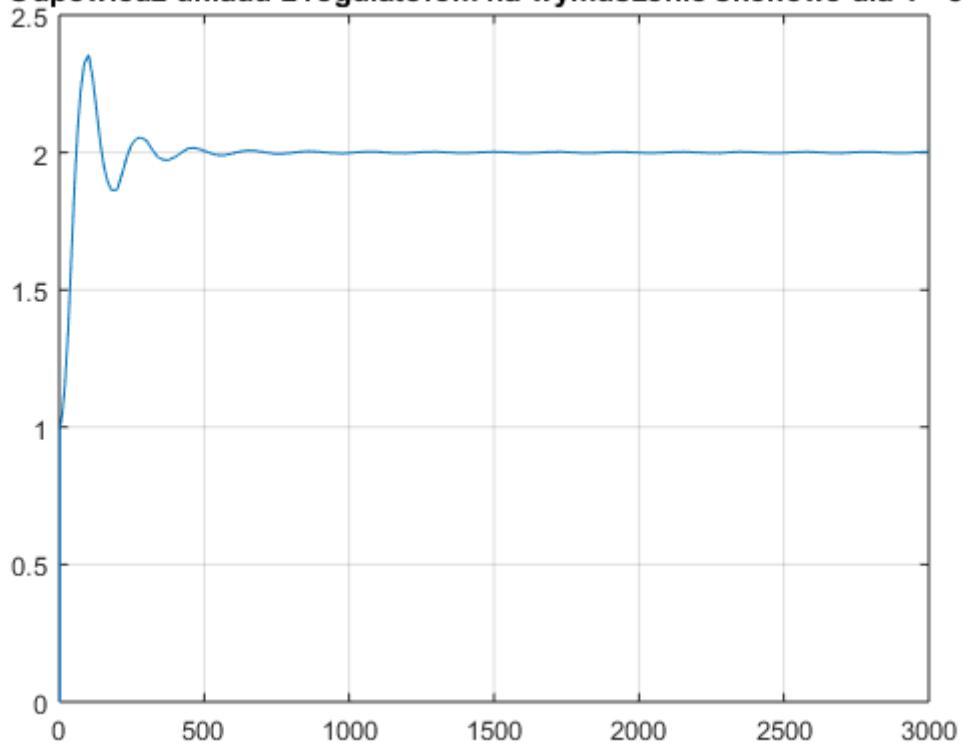
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla T =20



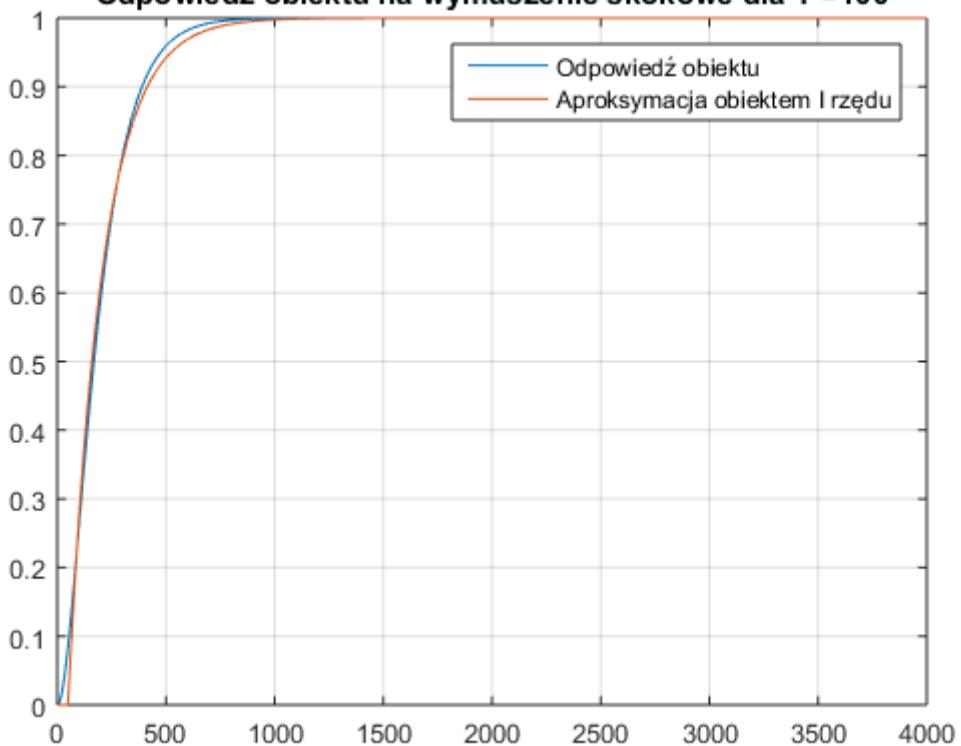
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 50$



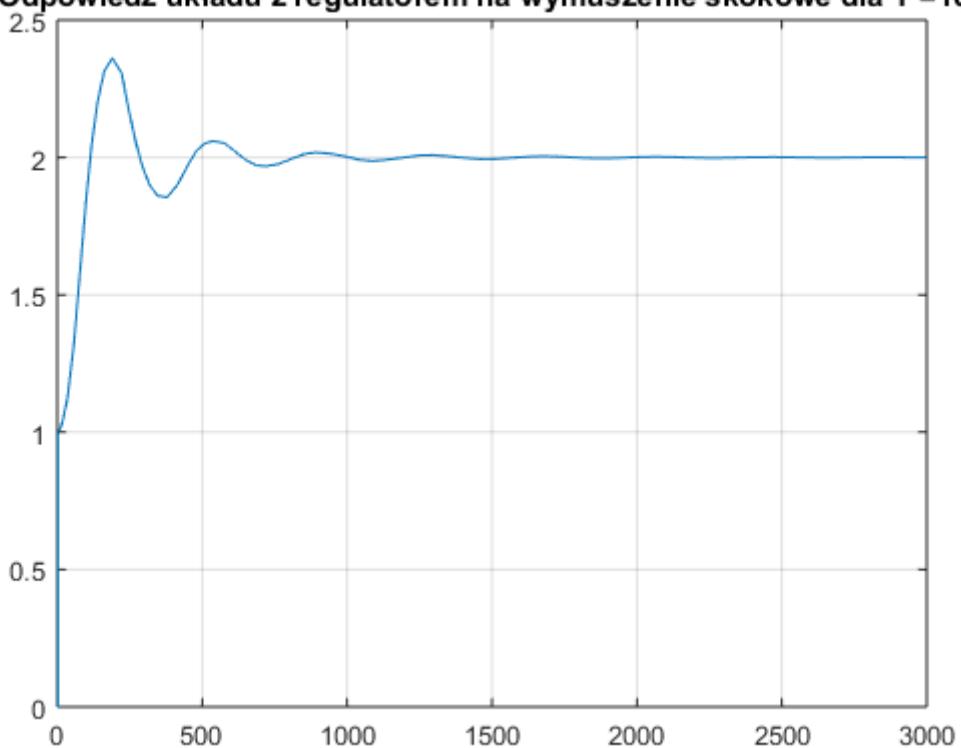
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 50$



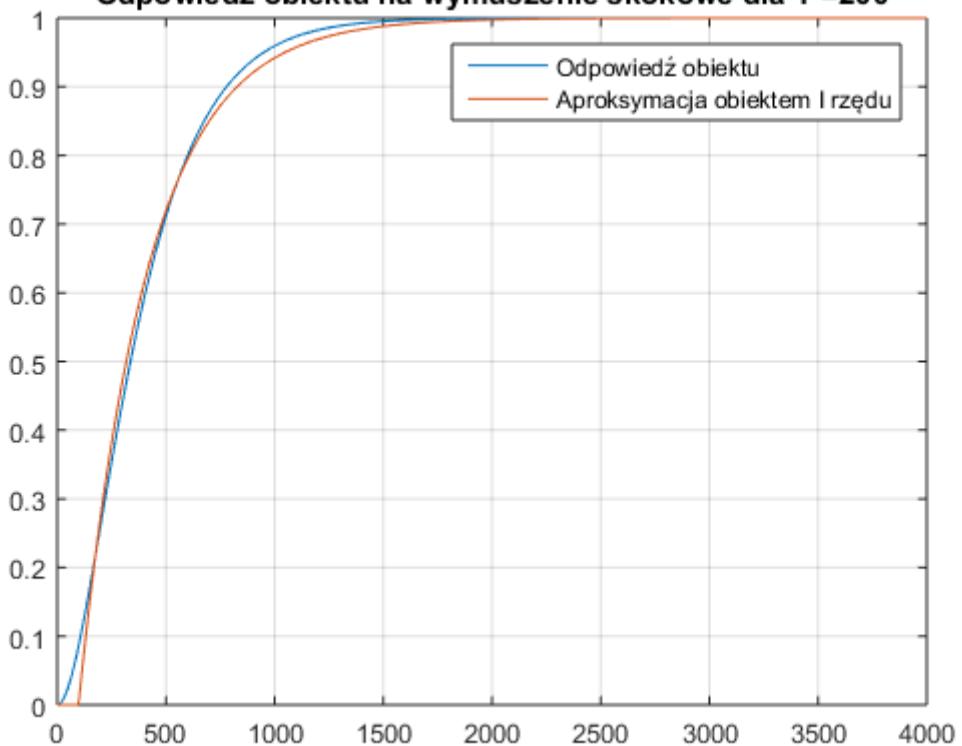
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 100$



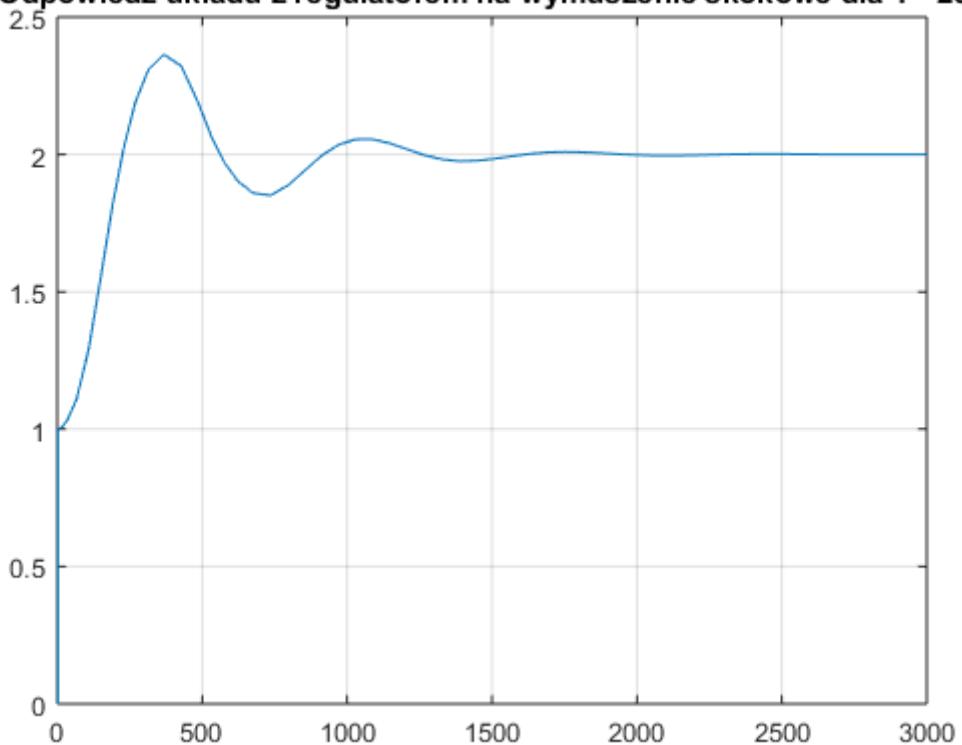
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 100$



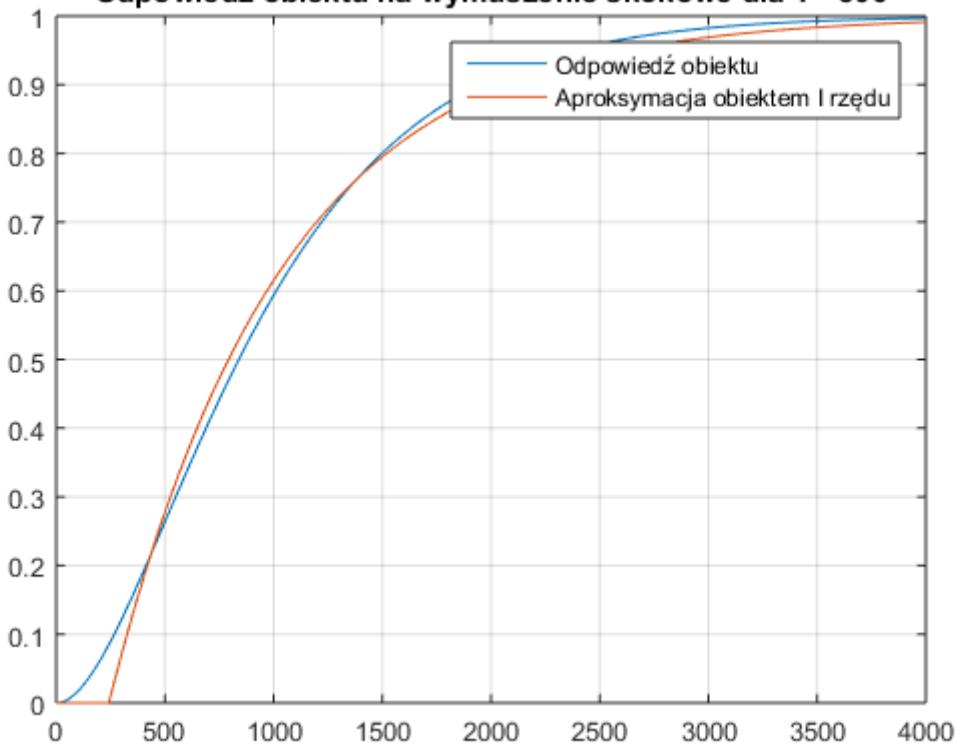
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla T =200



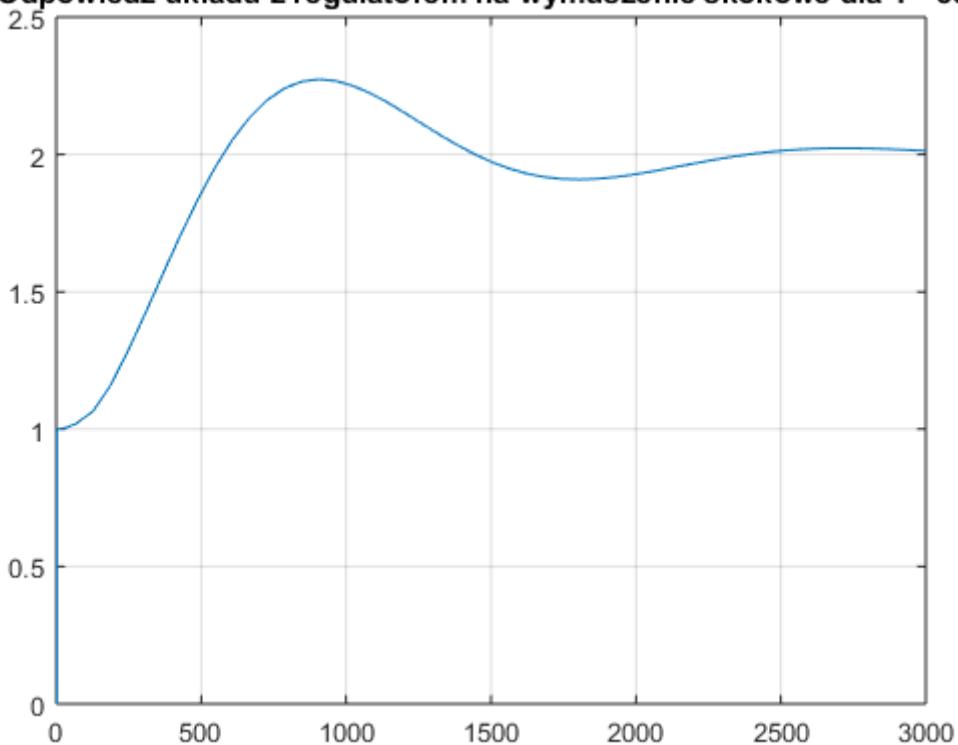
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla T =200



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 500$



Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 500$



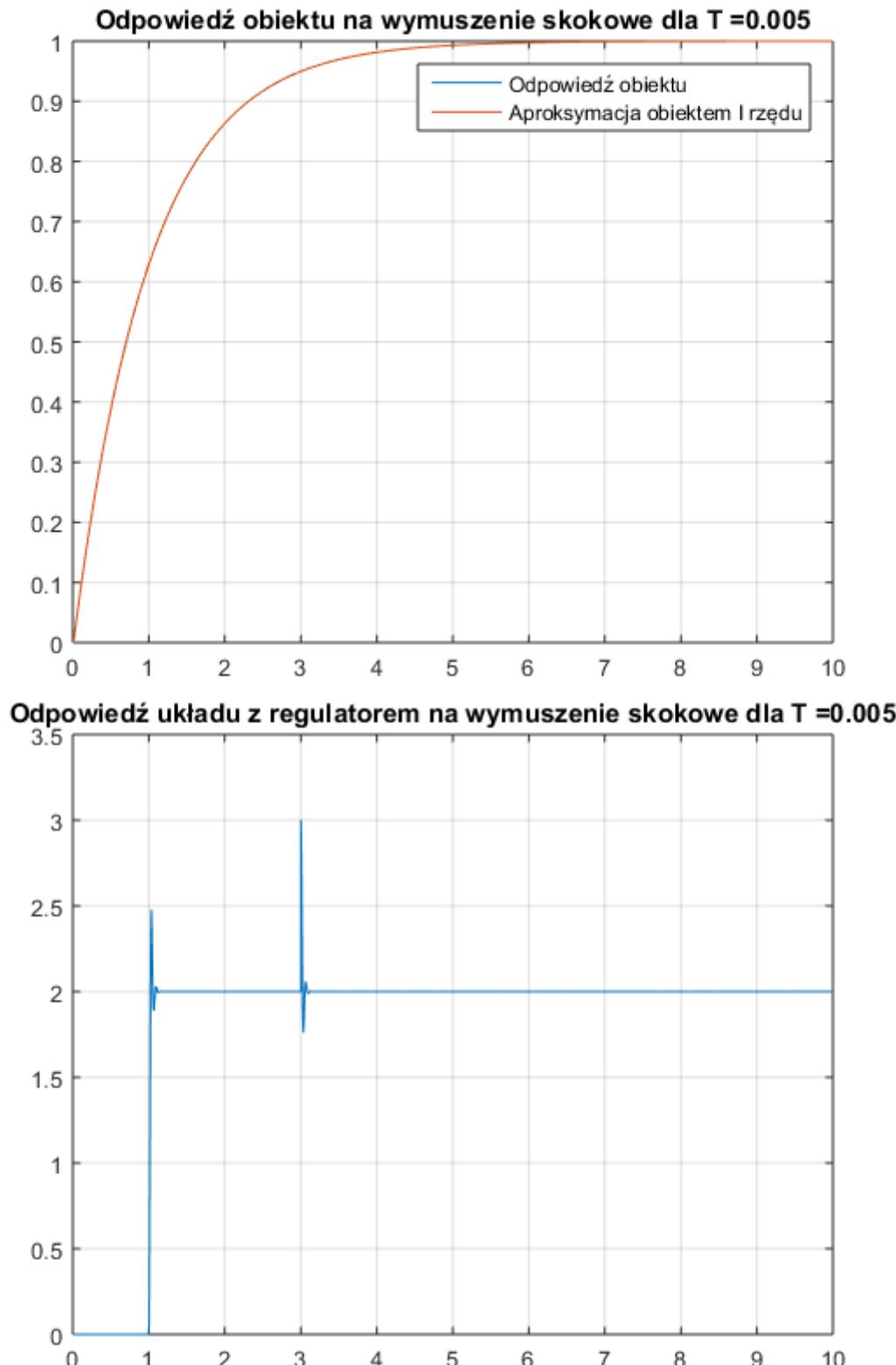
Badanym obiektem był układ II rzędu. Układ z regulatorem osiąga wartość zadawaną, lecz odpowiedź ta jest silnie uzależniona od stałej czasowej obiektu. Wraz z jej wzrostem pogorsza się dynamika systemu oraz wzrasta ilość przeregulowań.

6. Symulacje dla obiektu G_3 .

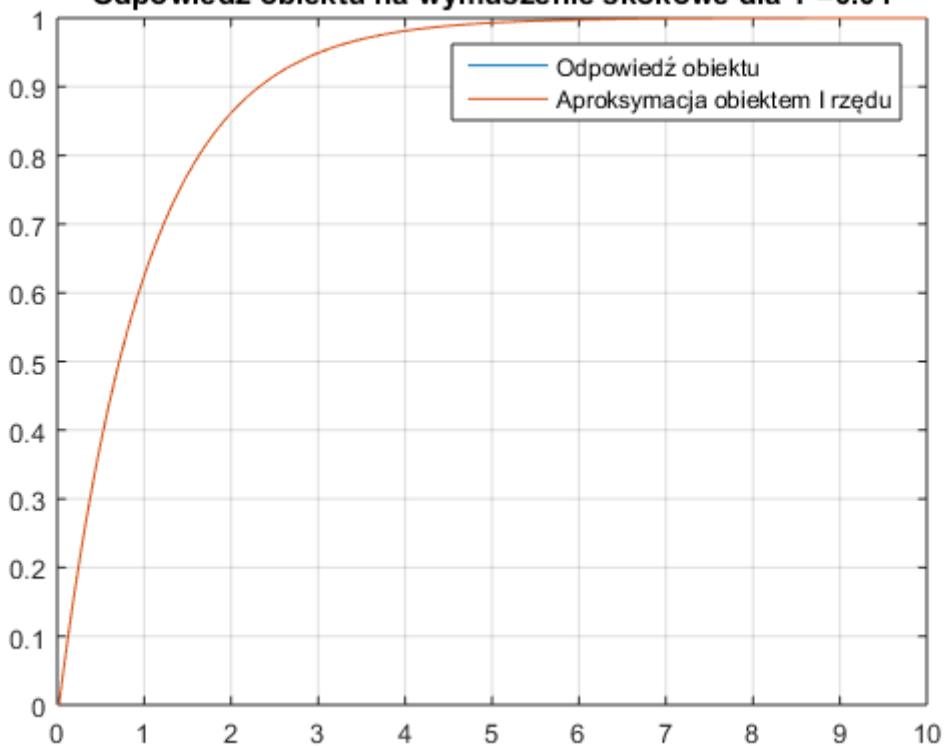
$$G_3 = \frac{e^{-s}}{(s + 1)(1 + sT)^2}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając stałą czasową w następujący sposób:

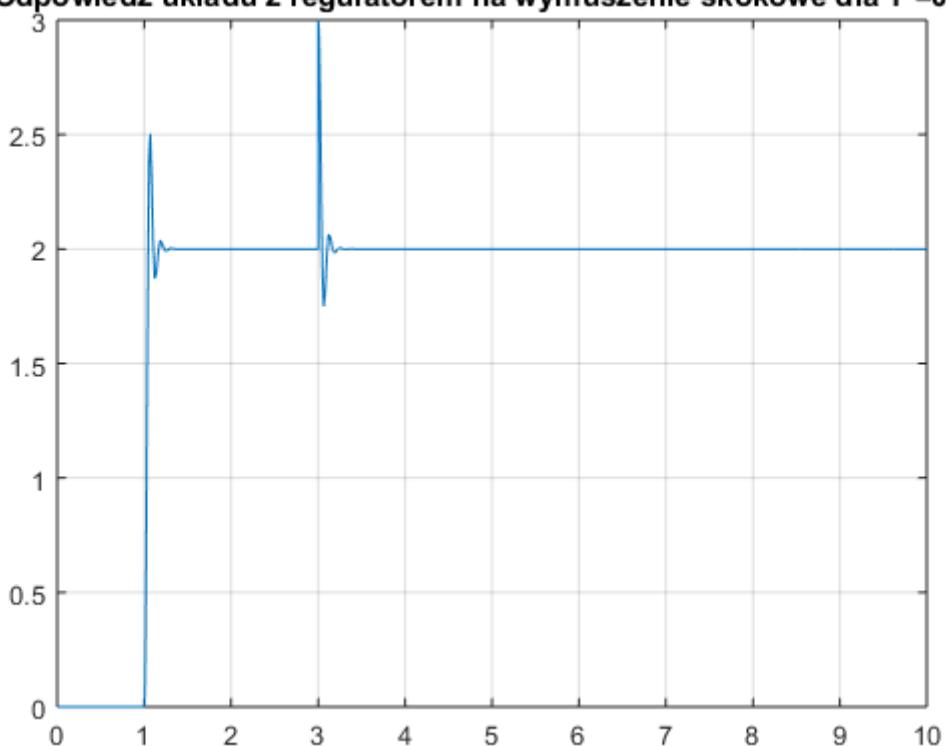
$T = 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 2, 5, 10$



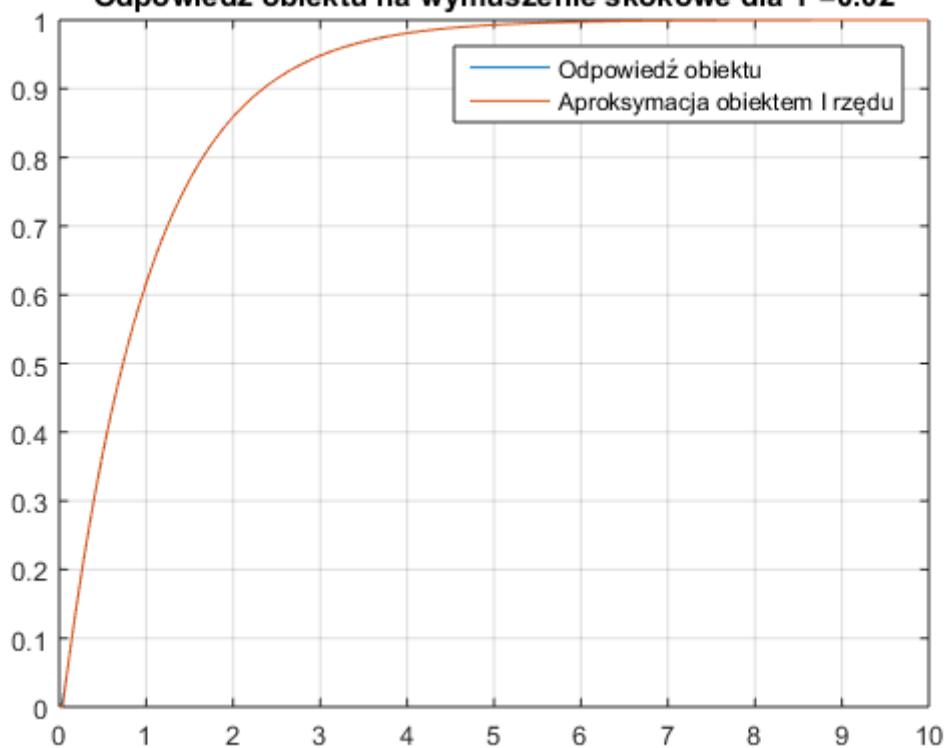
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.01$



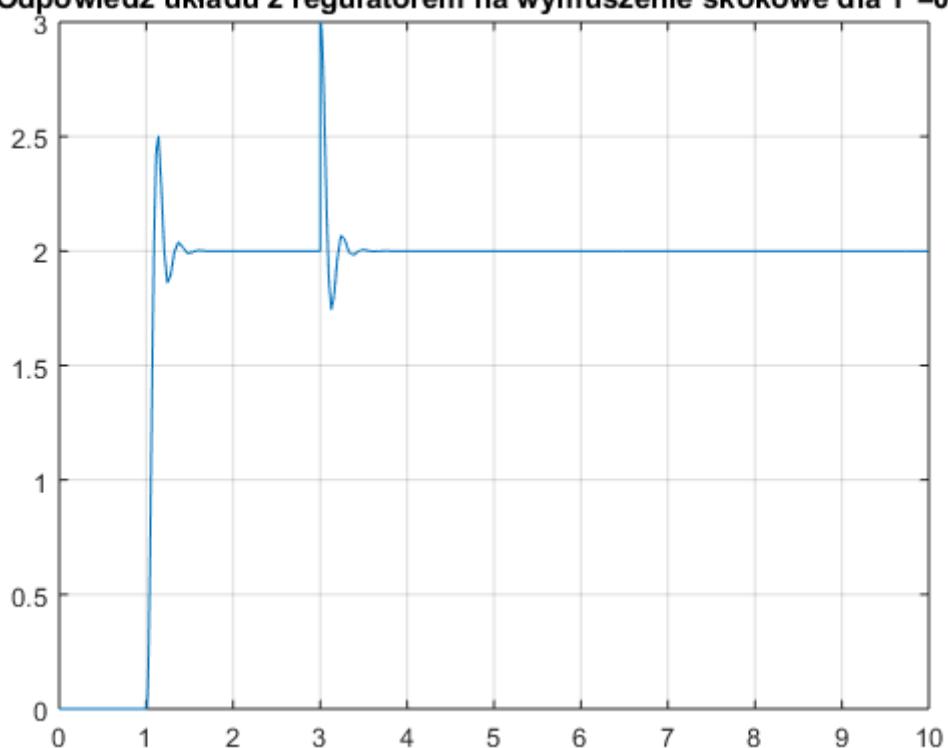
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.01$



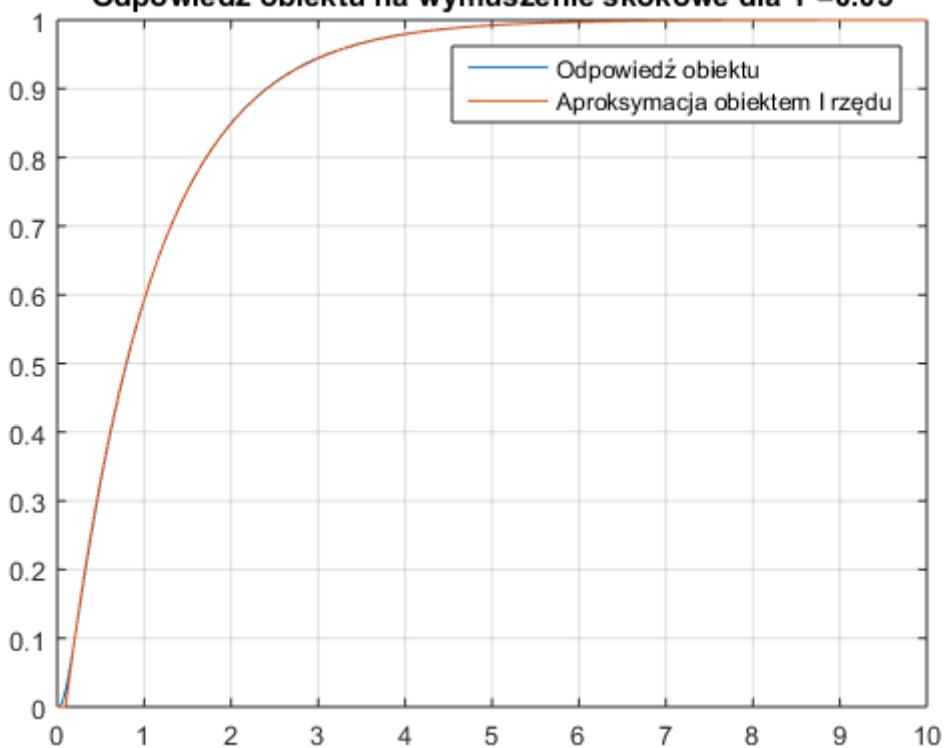
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.02$



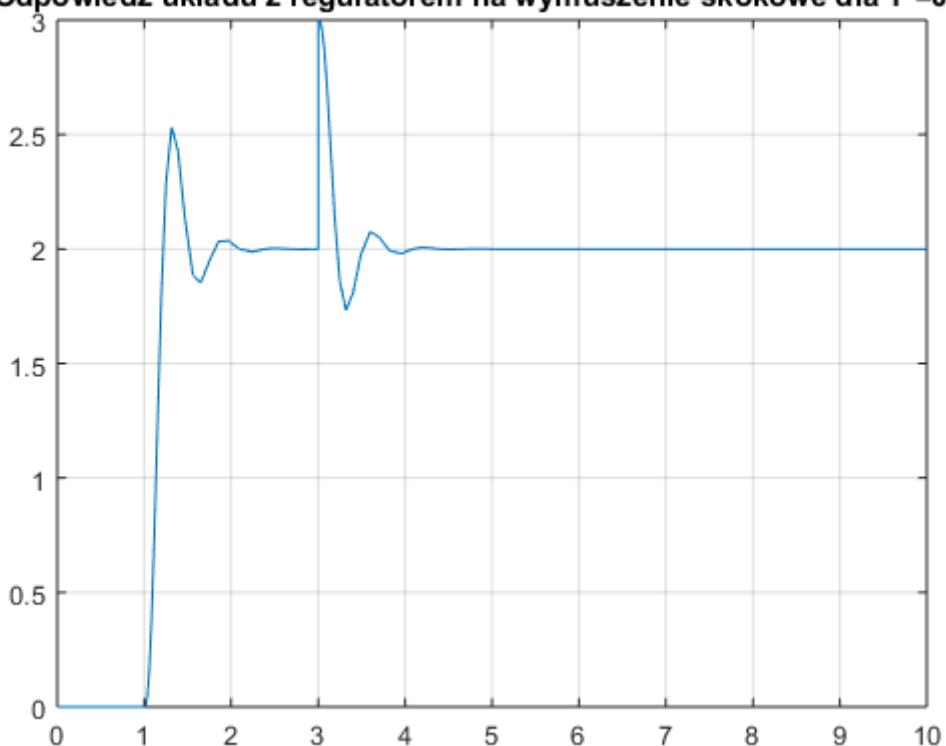
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.02$



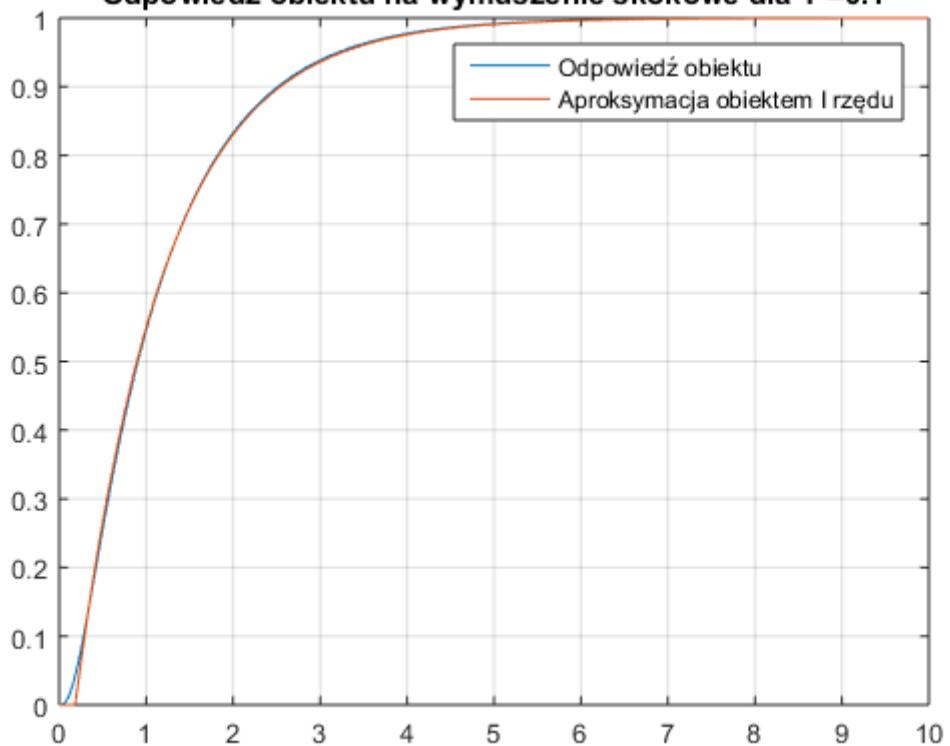
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.05$



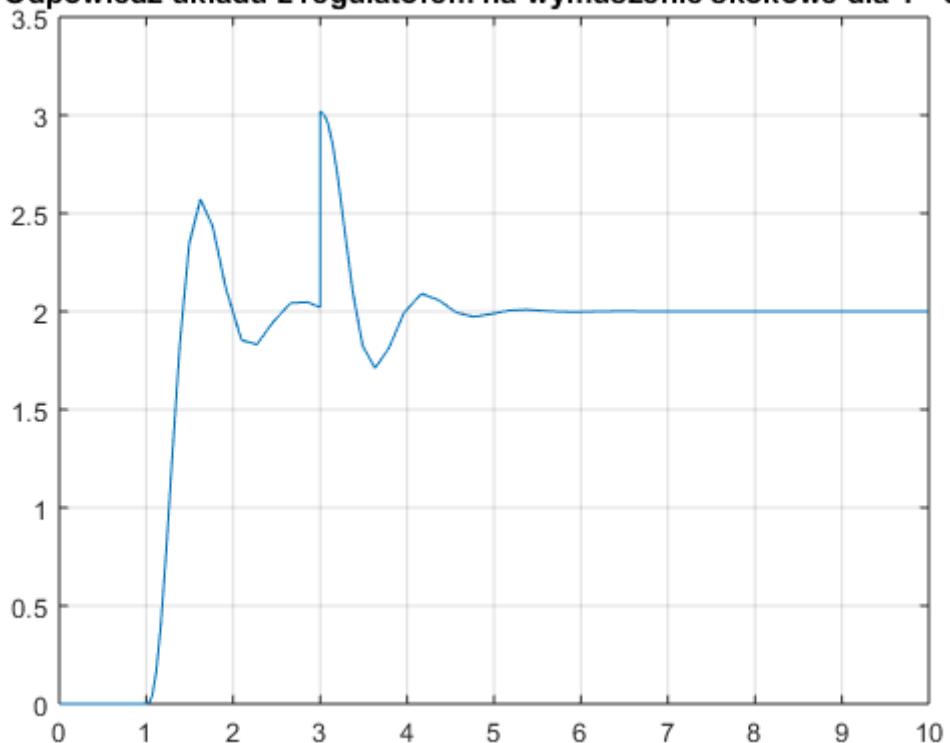
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.05$



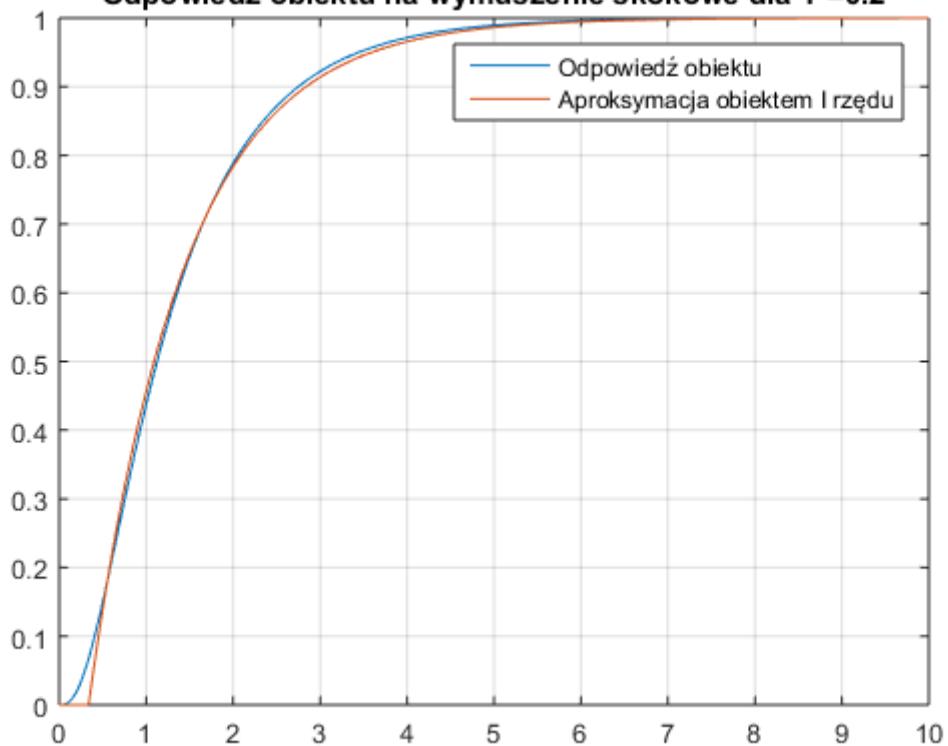
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.1$



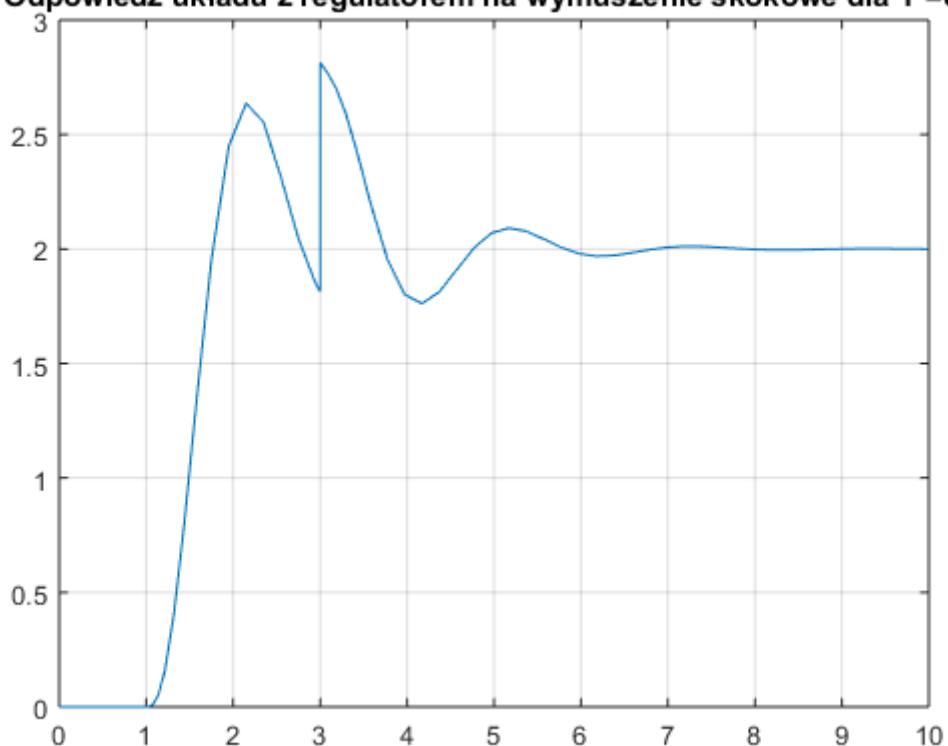
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.1$



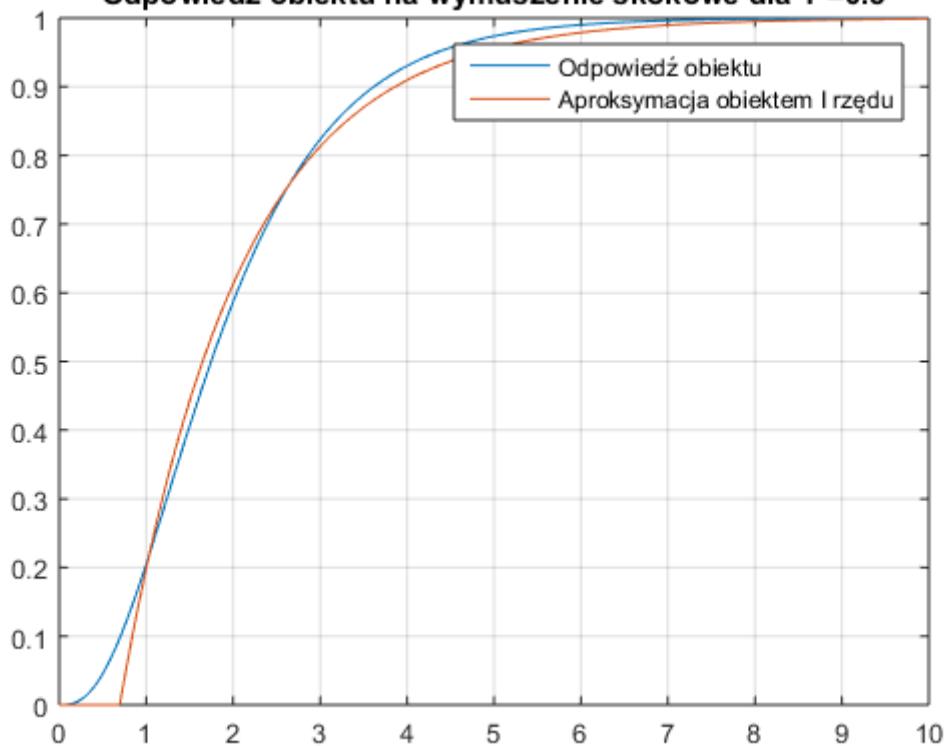
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



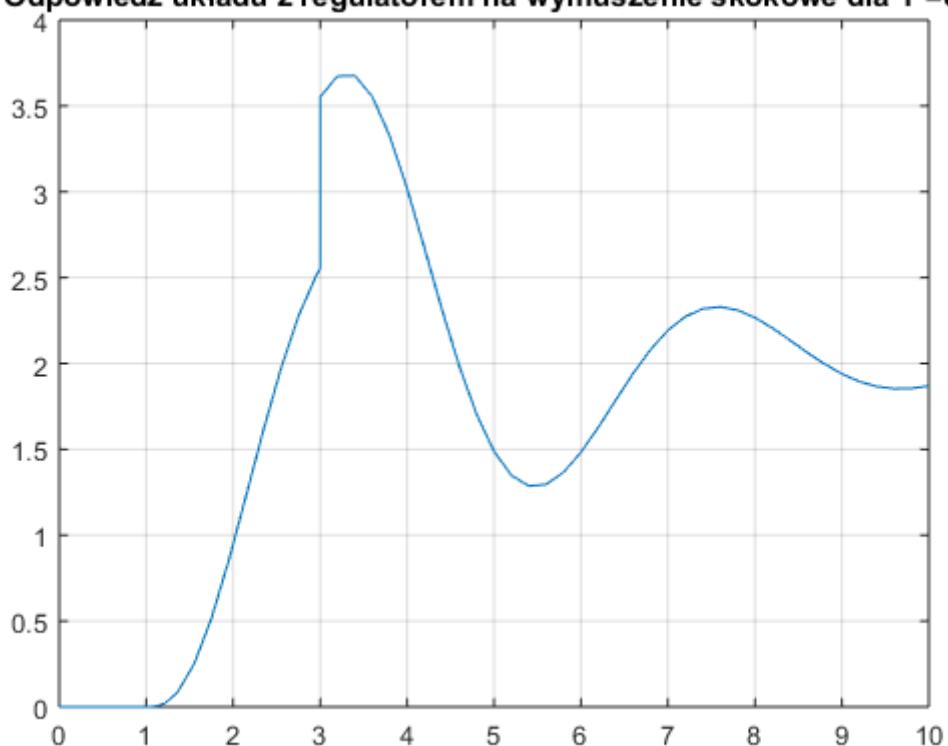
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



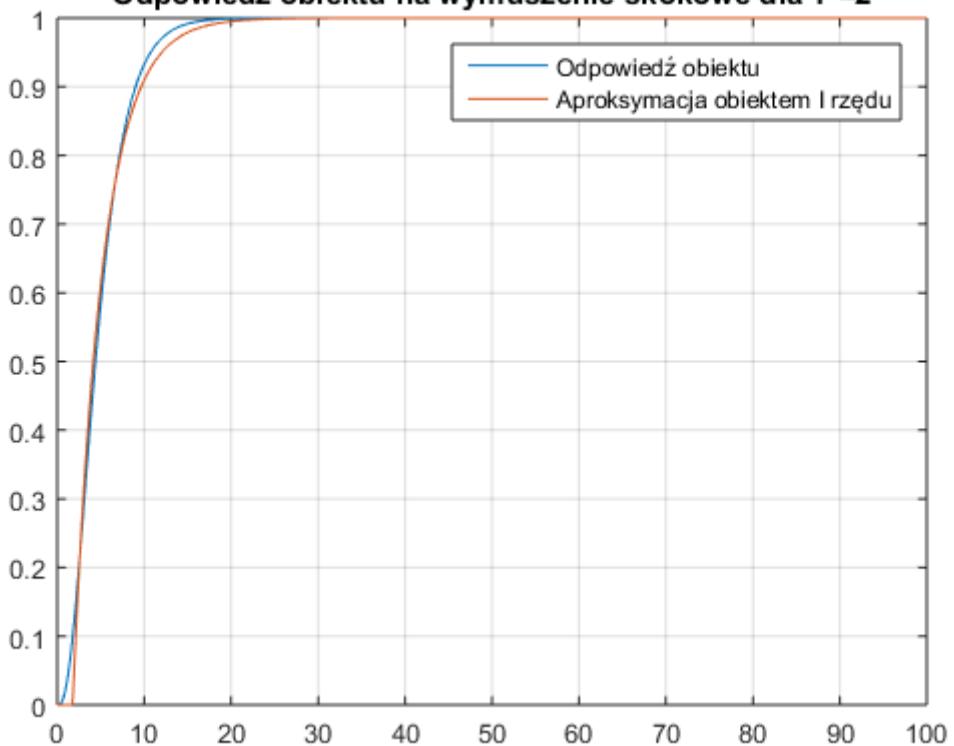
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



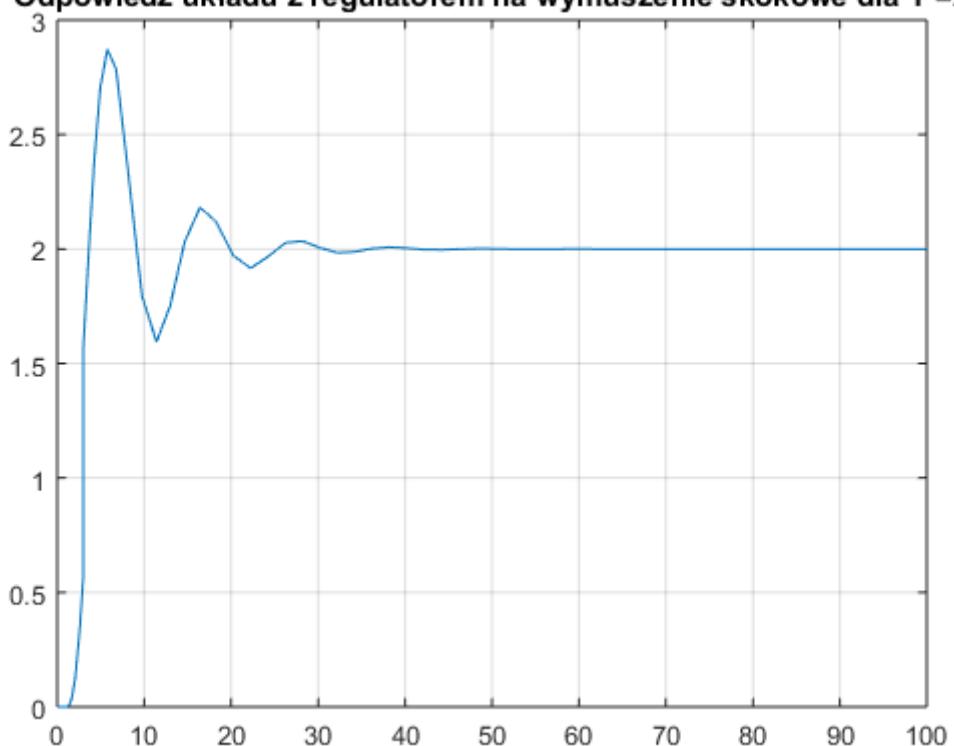
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



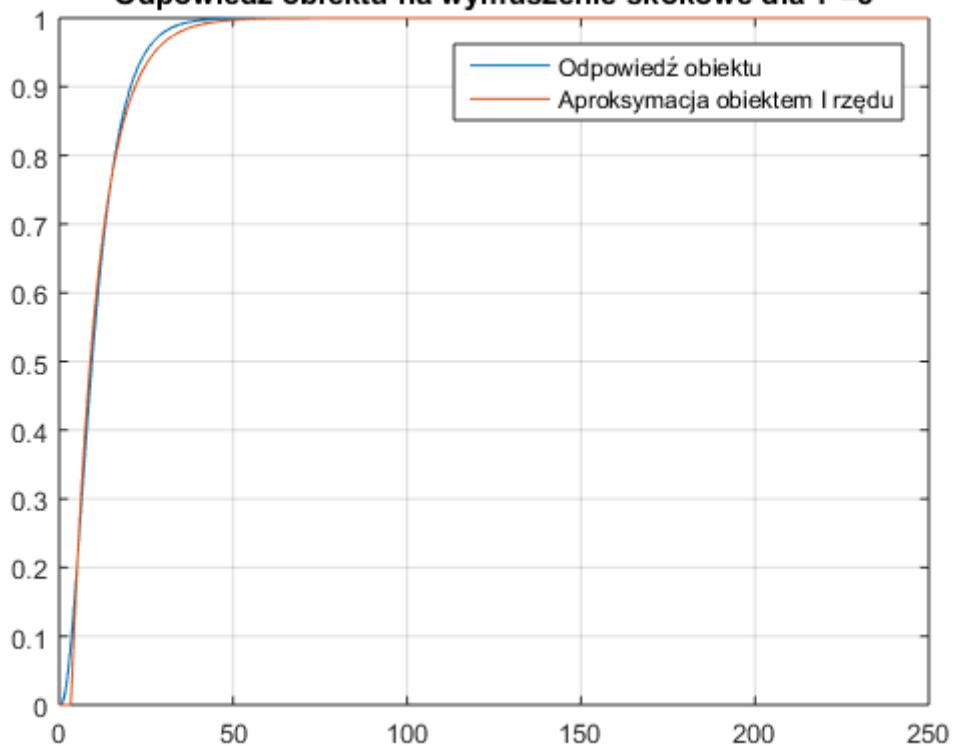
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 2$



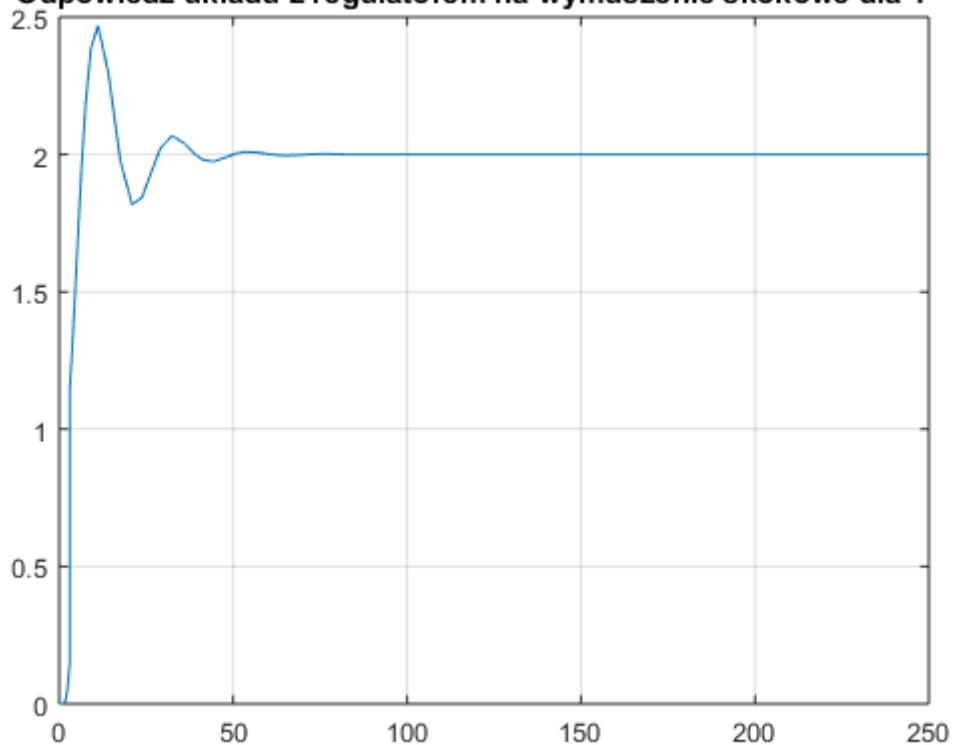
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 2$



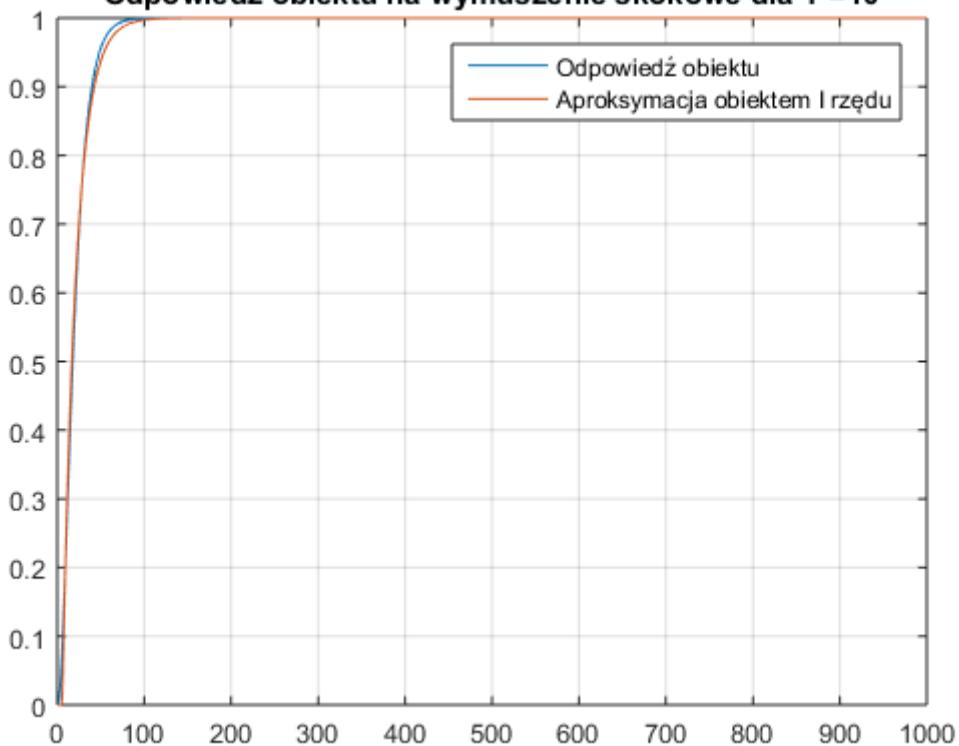
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 5$



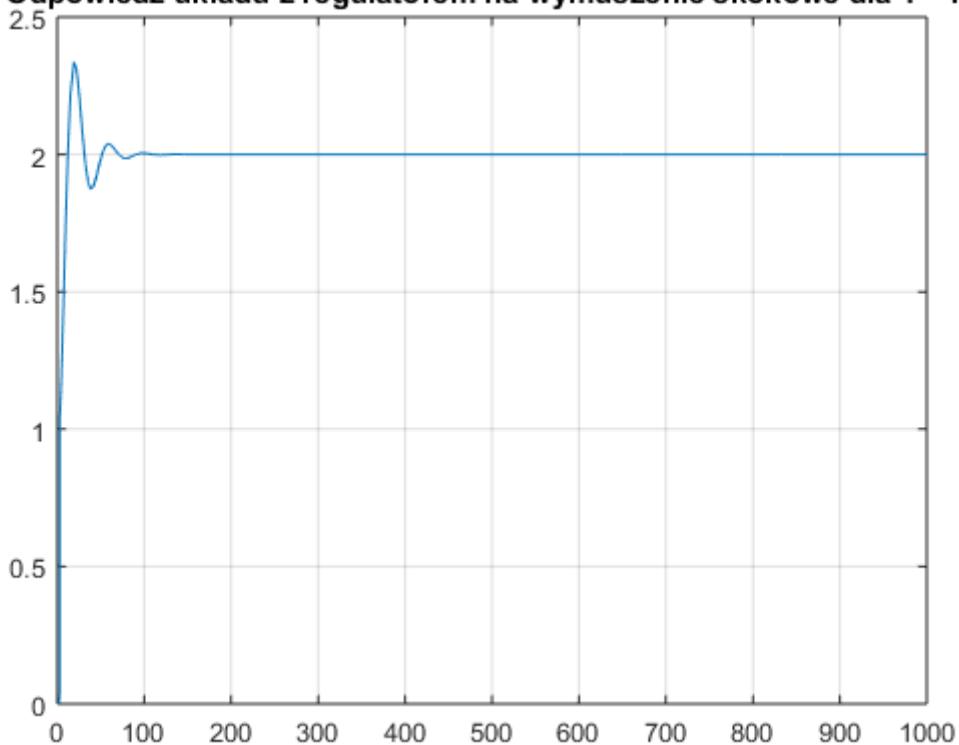
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 5$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 10$



Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 10$



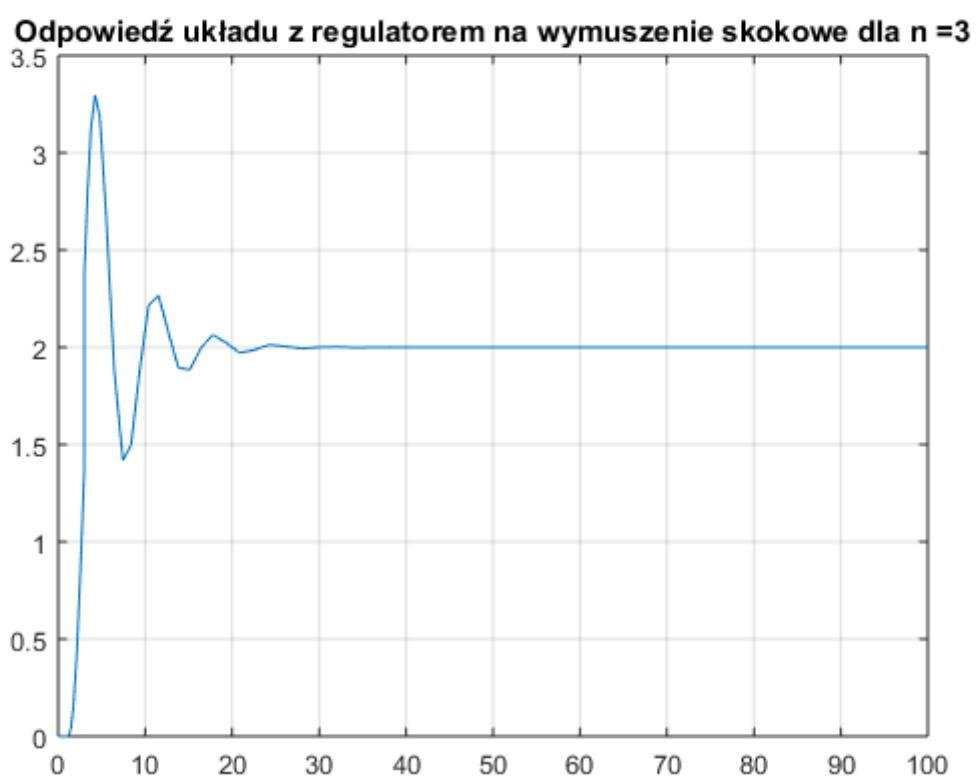
Trzeci w kolejności obiekt posiada dwie stałe czasowe, pierwszą równą 1 i drugą zmienną od 0.005 do 10. Układ z regulatorem charakteryzuje się ogromną dynamiką dla małych stałych czasowych i znakomicie radzi sobie z kompensacją wprowadzonego zakłócenia w 3 sekundzie symulacji. Podobnie jak w przypadku badania poprzedniego obiektu, czas osiągnięcia wartości zadanej wydłuża się wraz ze wzrostem stałej czasowej.

7. Symulacje dla obiektu G_4 .

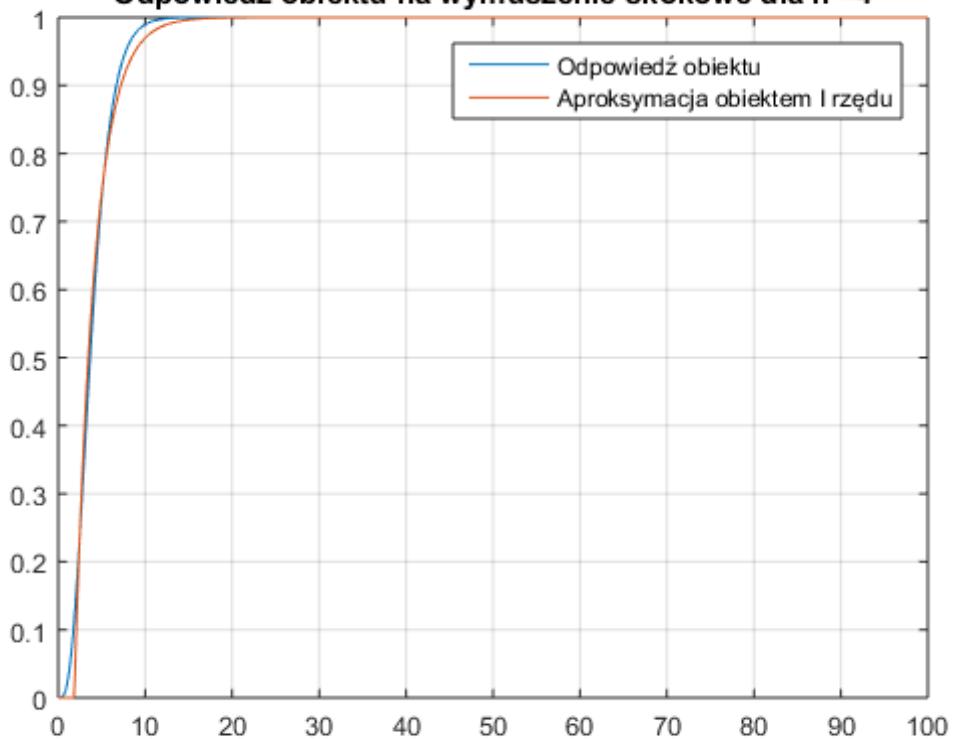
$$G_4 = \frac{1}{(s + 1)^n}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając rząd mianownika n w następujący sposób:

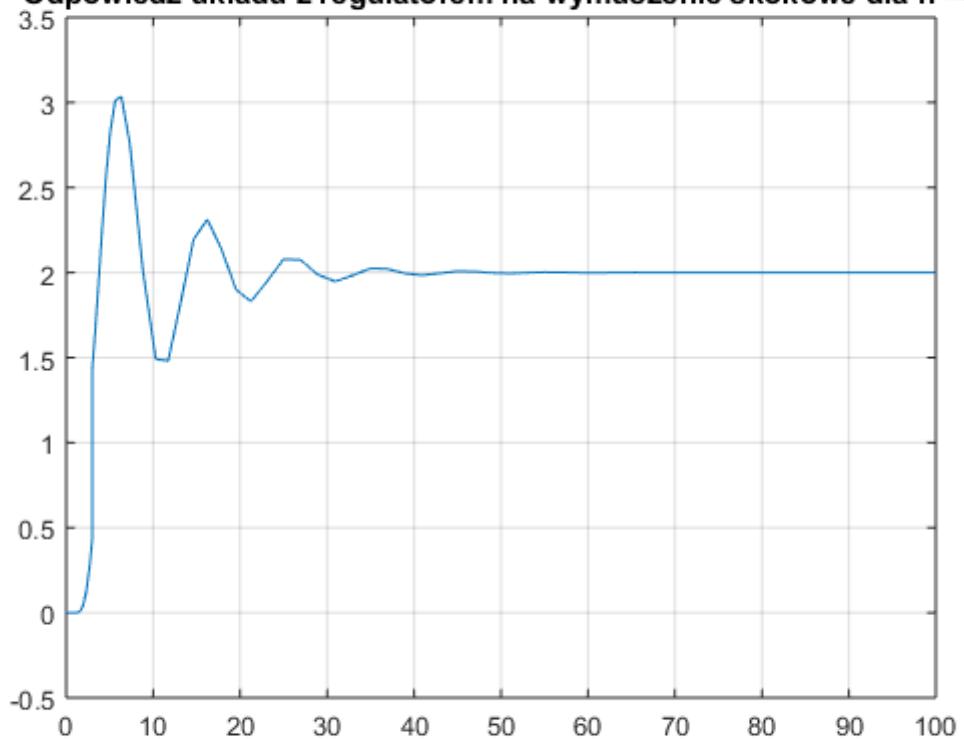
$n = 3, 4, 5, 6, 7, 8$



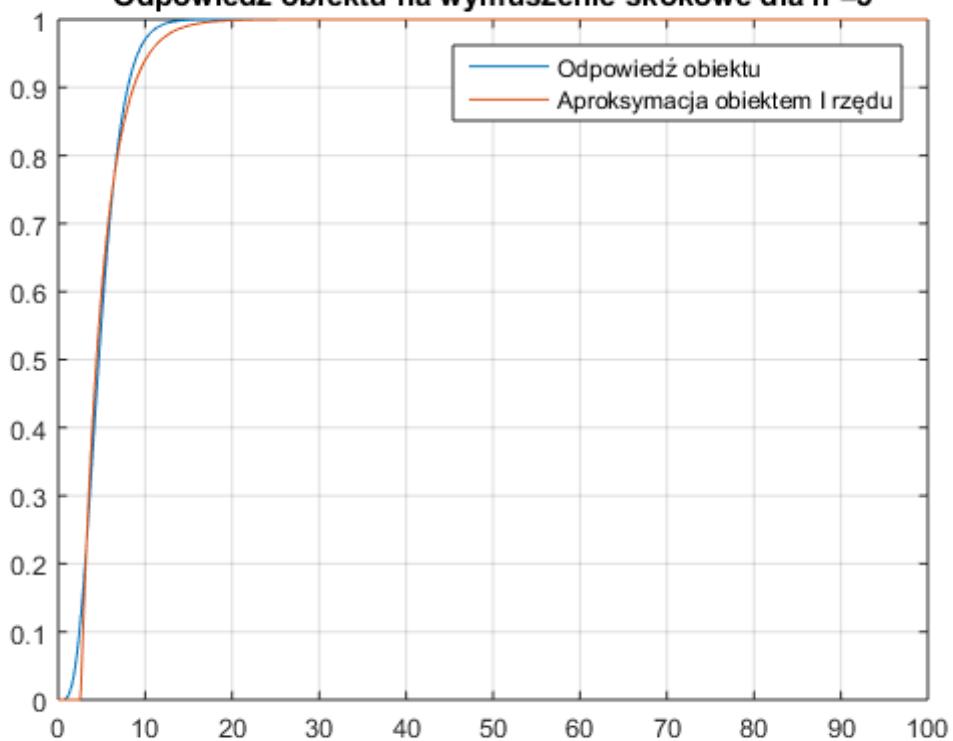
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla n =4



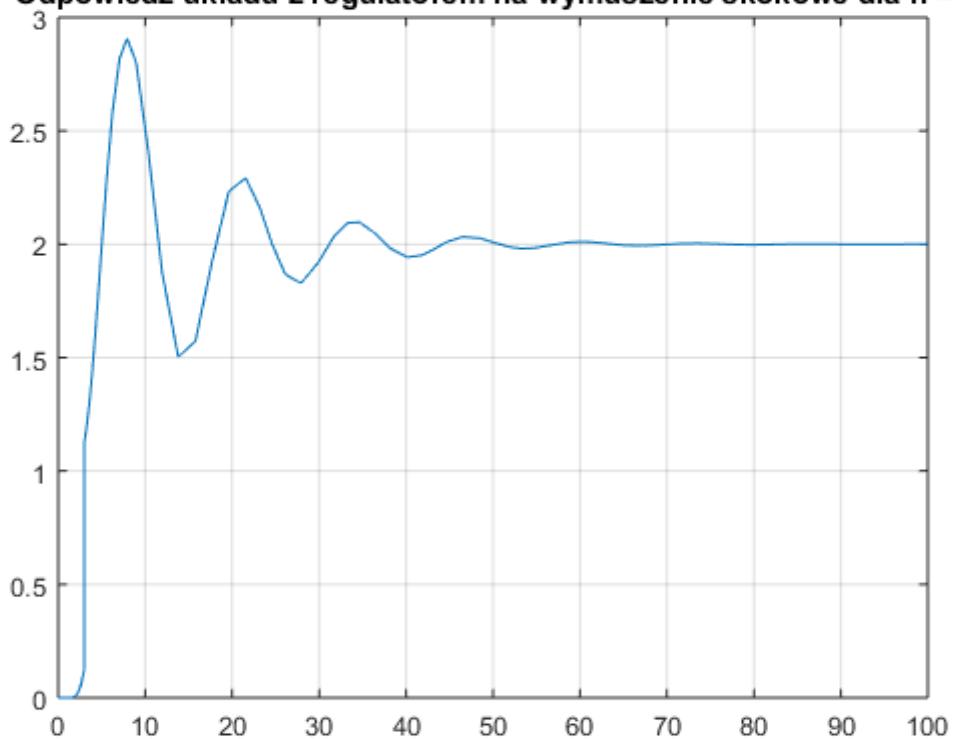
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla n =4



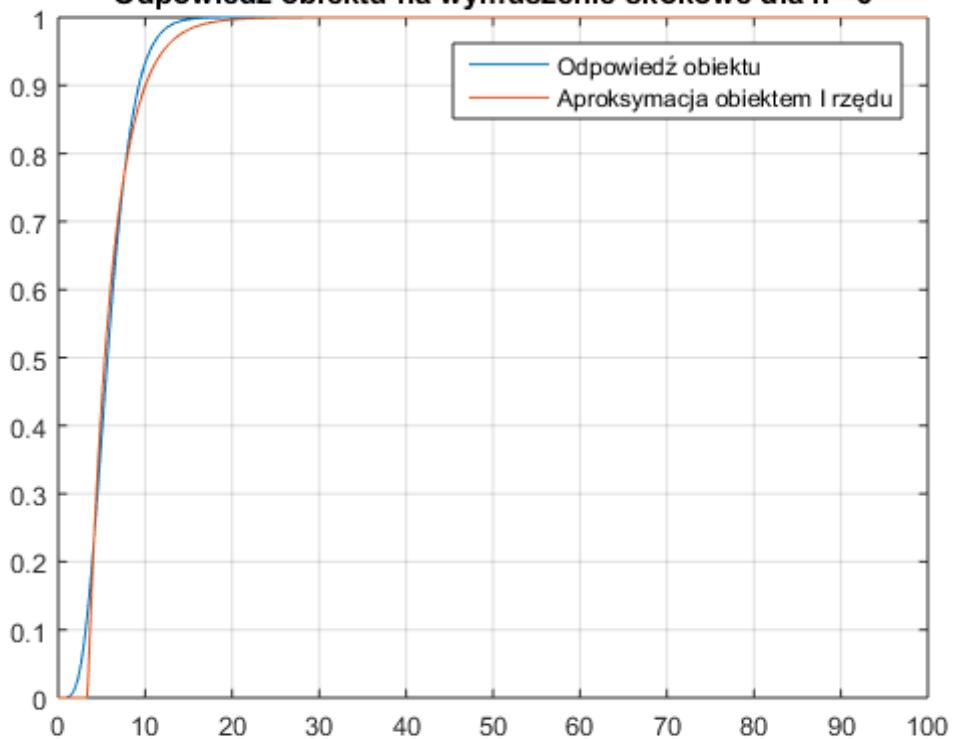
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla n = 5



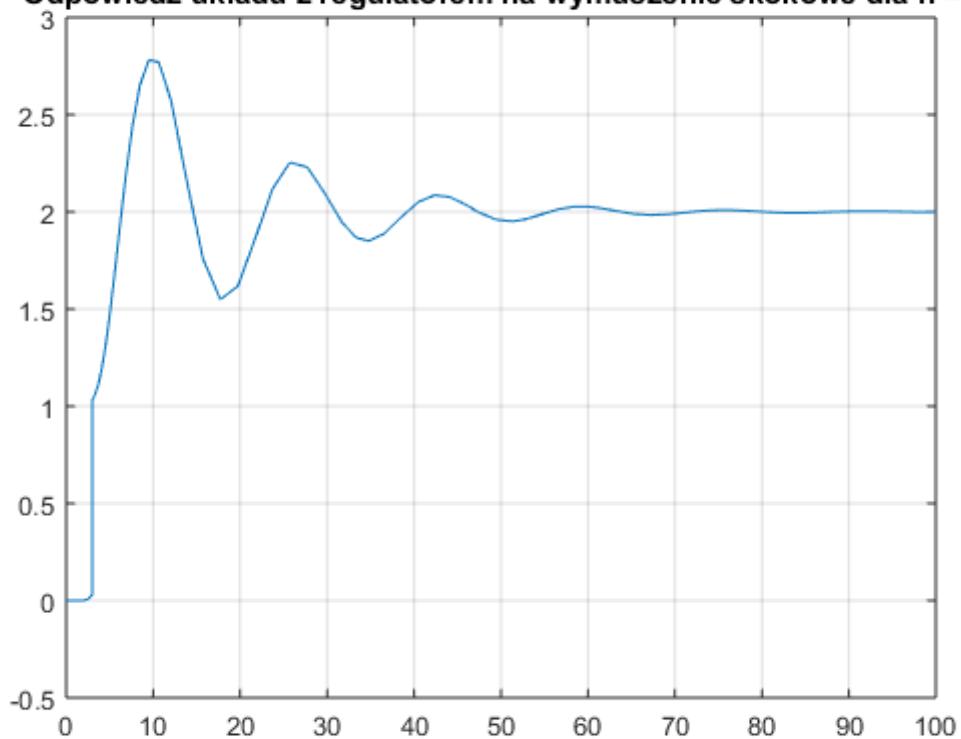
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla n = 5



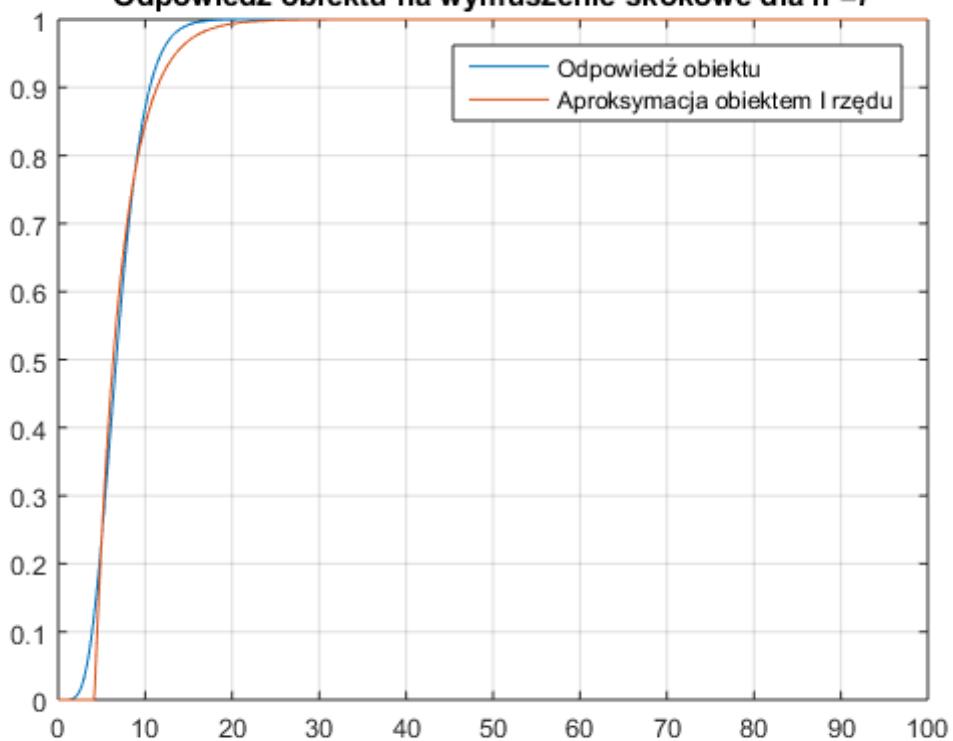
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla n =6



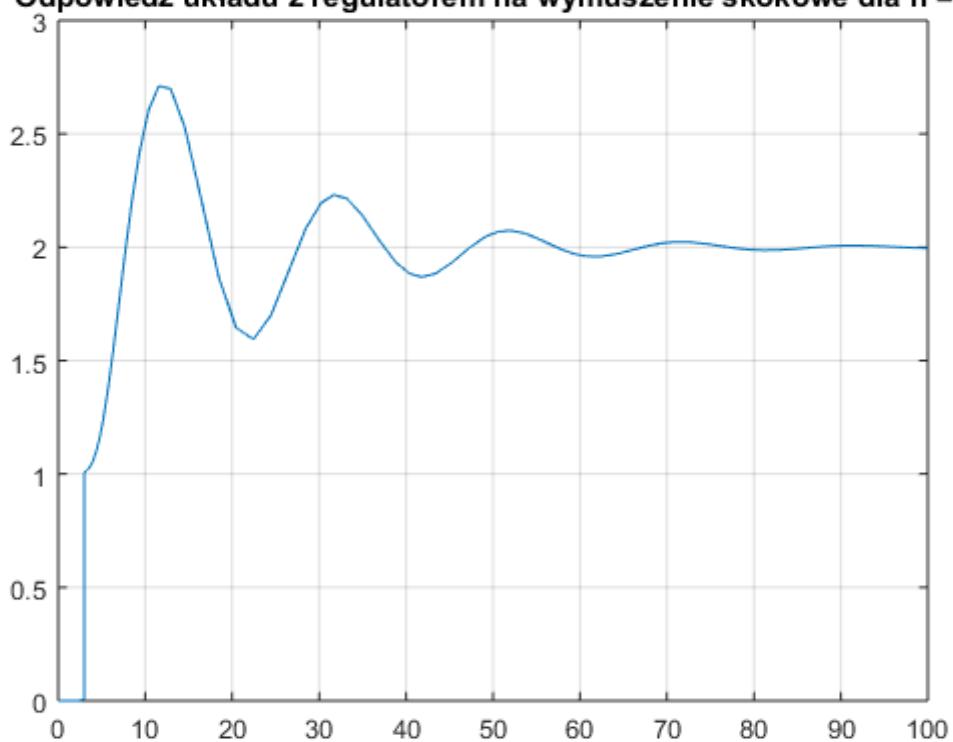
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla n =6



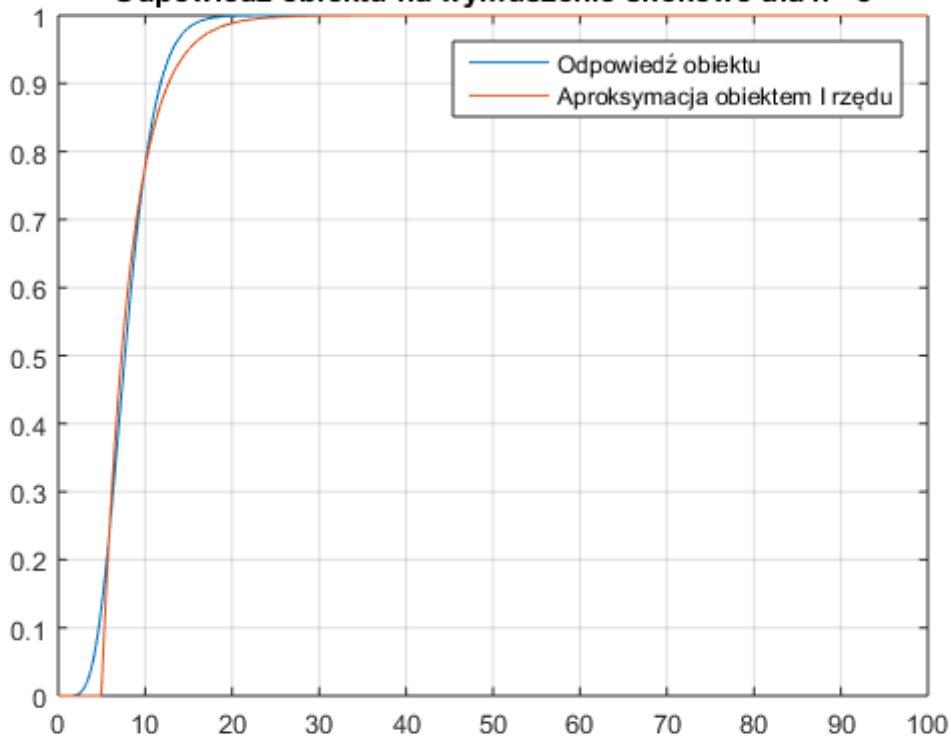
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $n = 7$



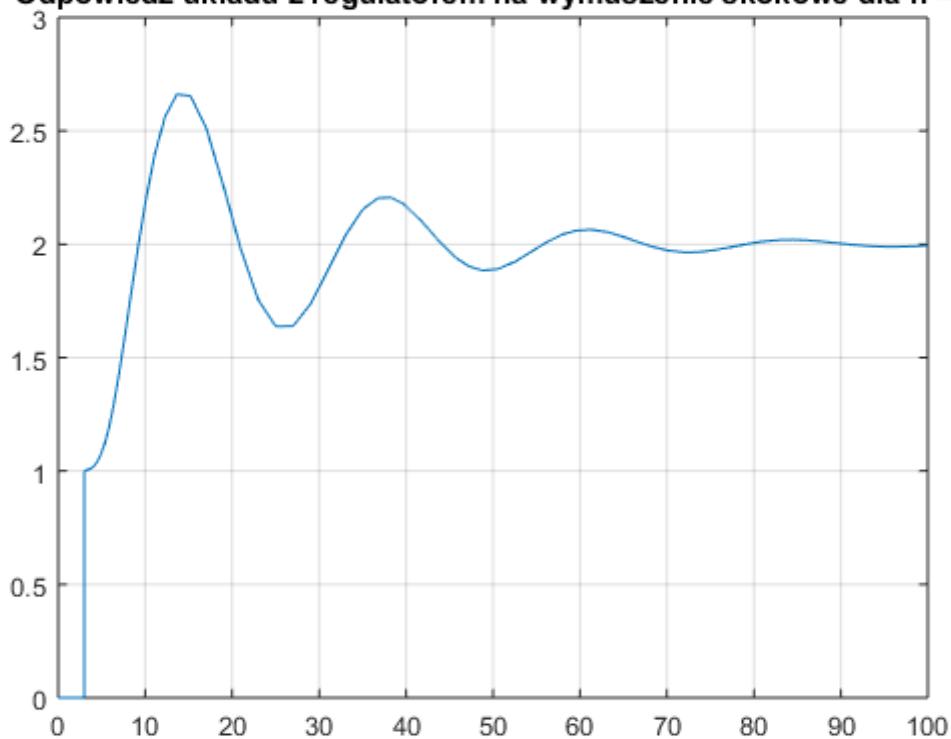
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $n = 7$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $n = 8$



Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $n = 8$



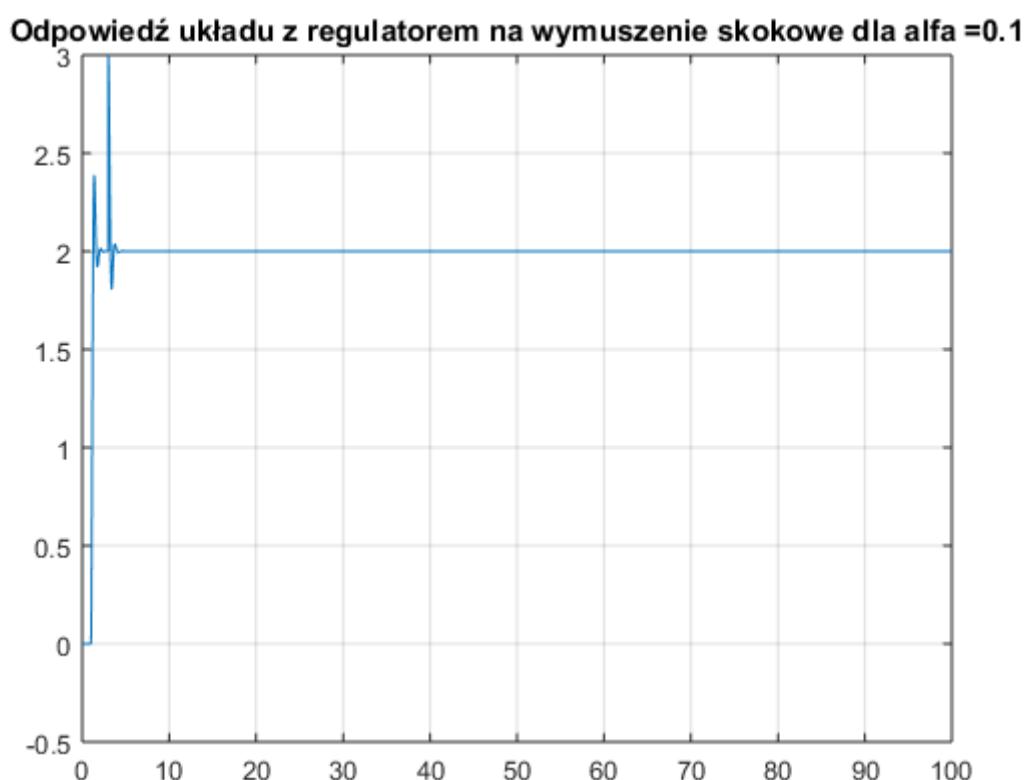
W czwartym badanym układzie zmienia się rzad mianownika transmitancji, czyli wielokrotność stałej czasowej. Układ z regulatorem doprowadza system do wartości zadanej, lecz wraz ze wzrostem stopnia mianownika n wydłuża się czas regulacji. Można zauważyć jednak, iż im wyższy stopień mianownika, tym przeregulowania osiągają mniejszą wartość, aczkolwiek układ potrzebuje więcej czasu na ich kompensację.

8. Symulacje dla obiektu G₅.

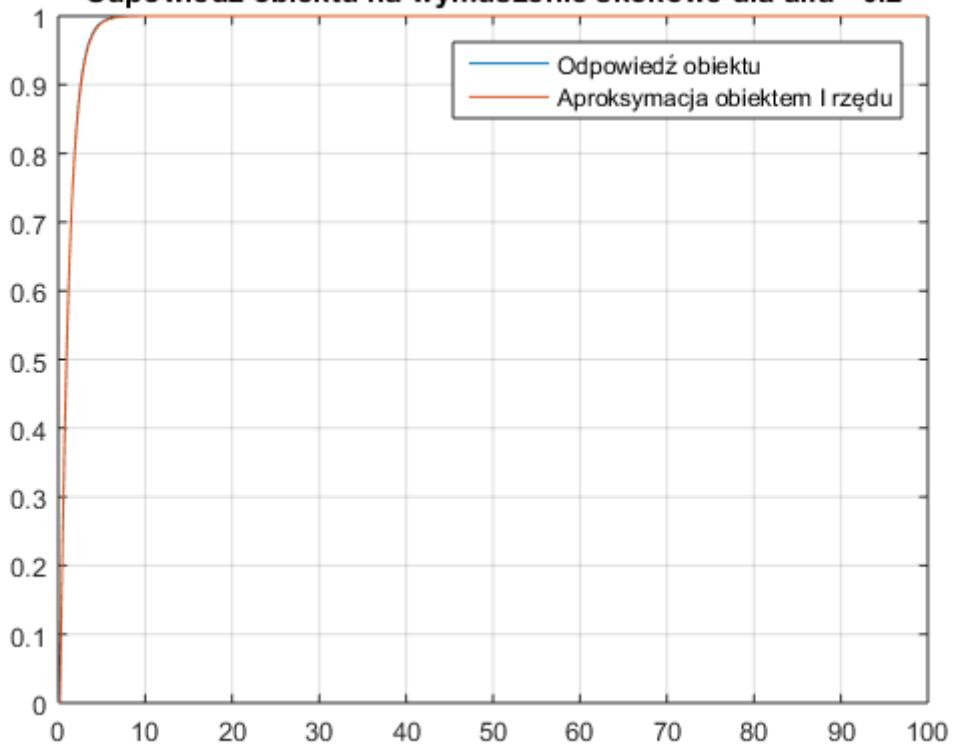
$$G_5 = \frac{1}{(1+s)(1+\alpha s)(1+\alpha^2 s)(1+\alpha^3 s)}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając parametr α w następujący sposób:

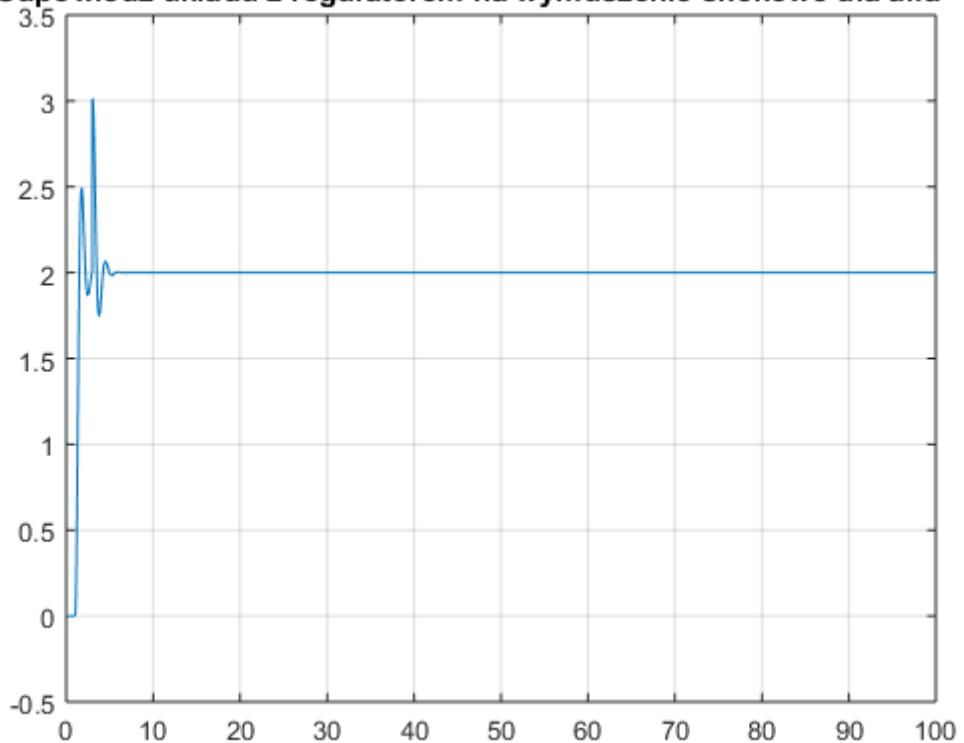
$\alpha = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$



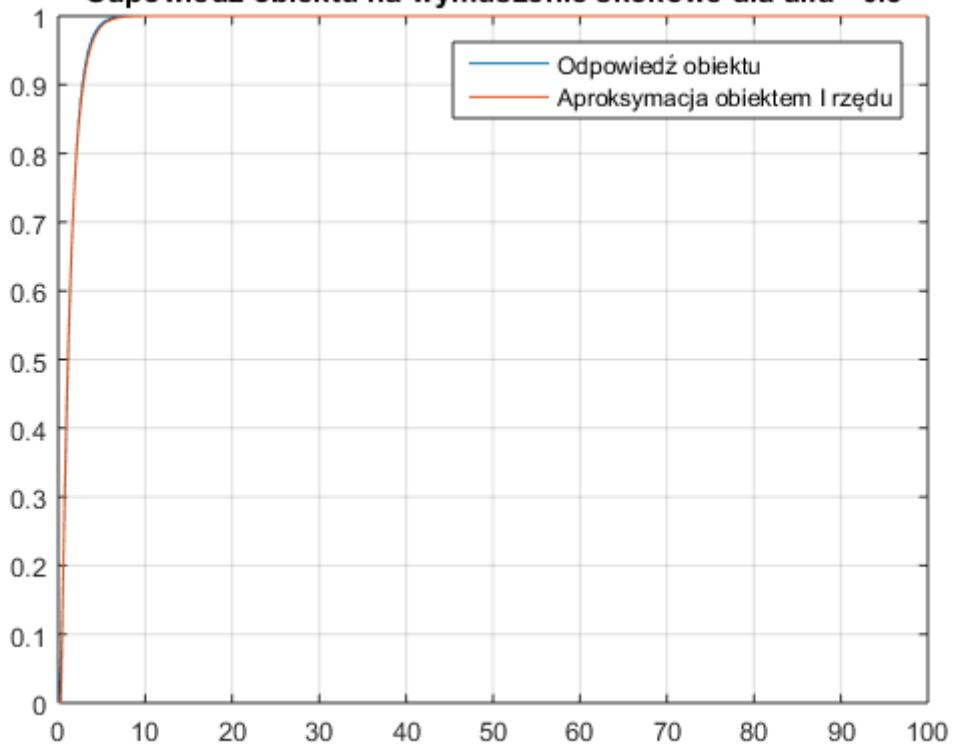
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.2



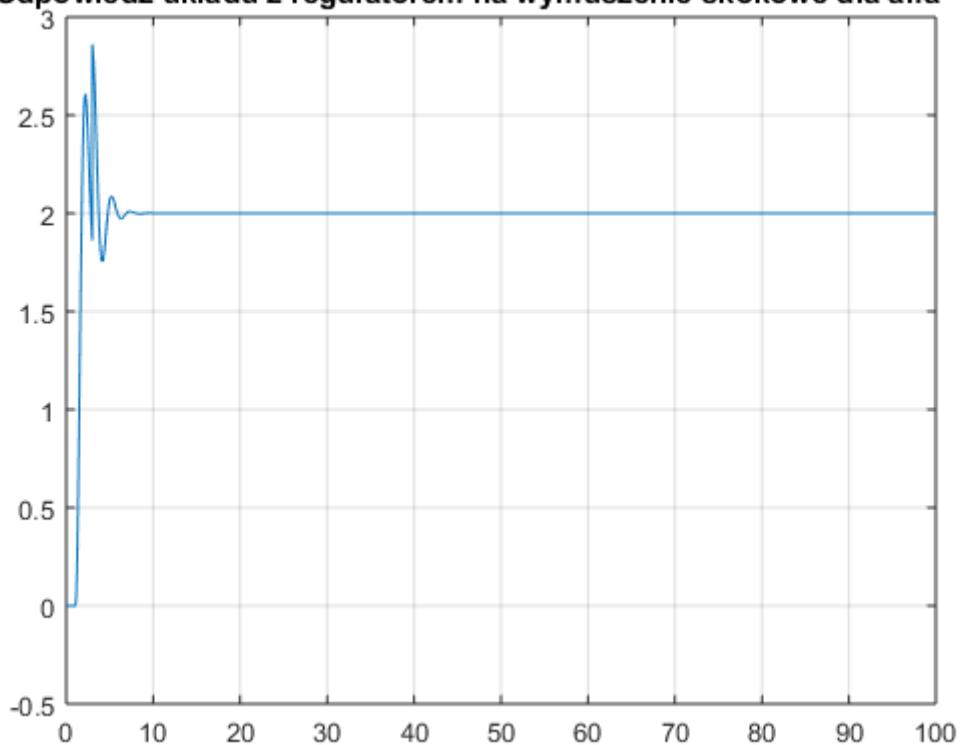
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.2



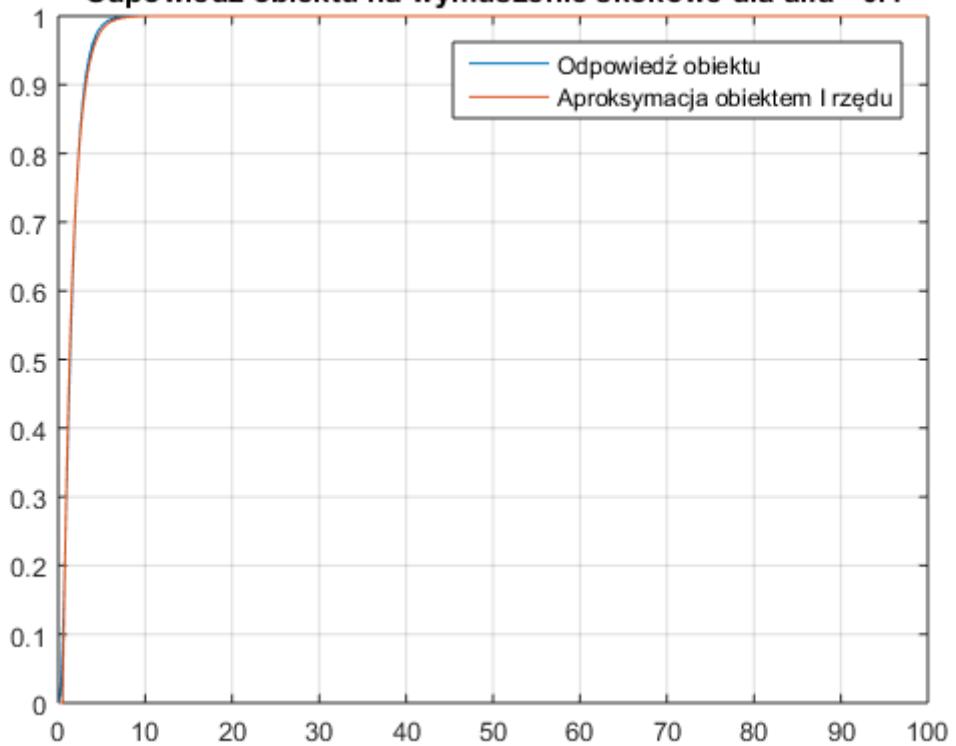
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.3



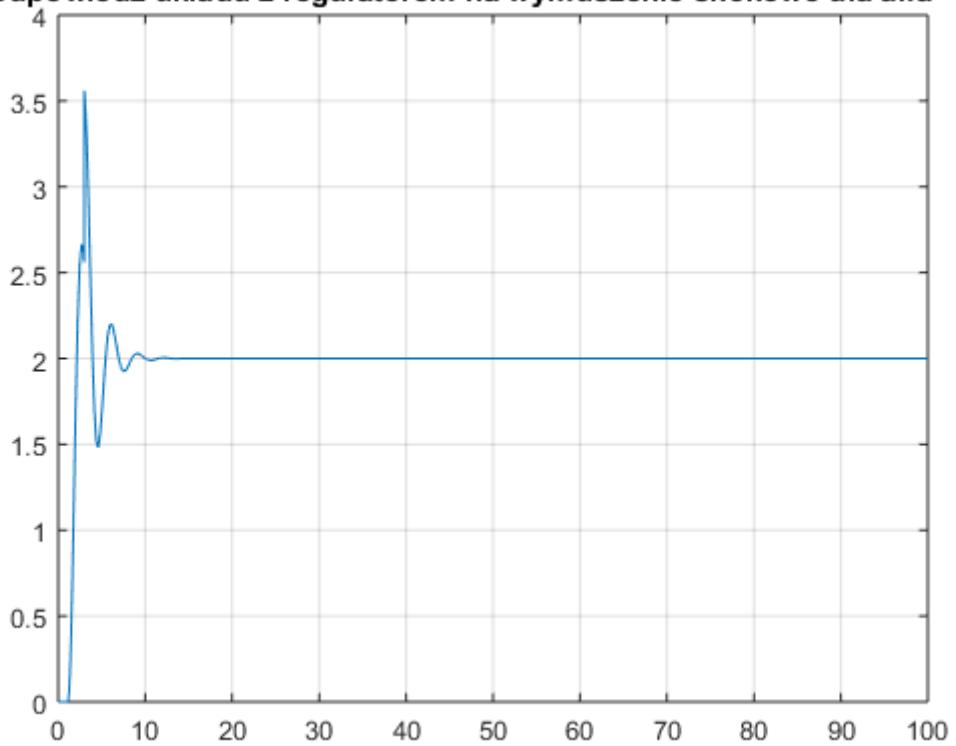
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.3



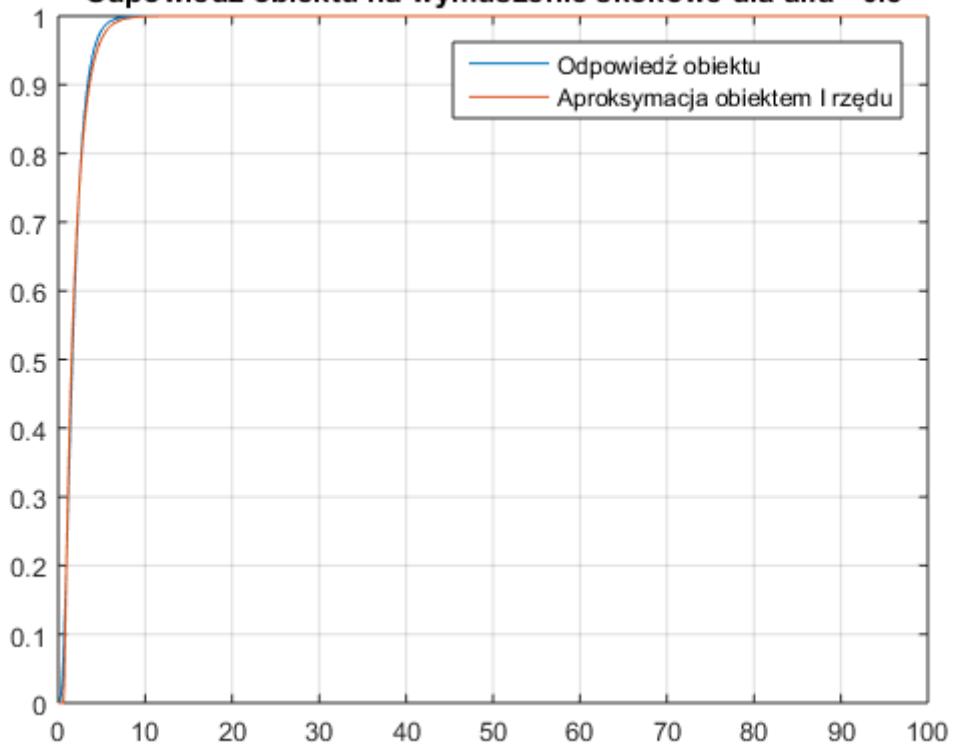
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.4



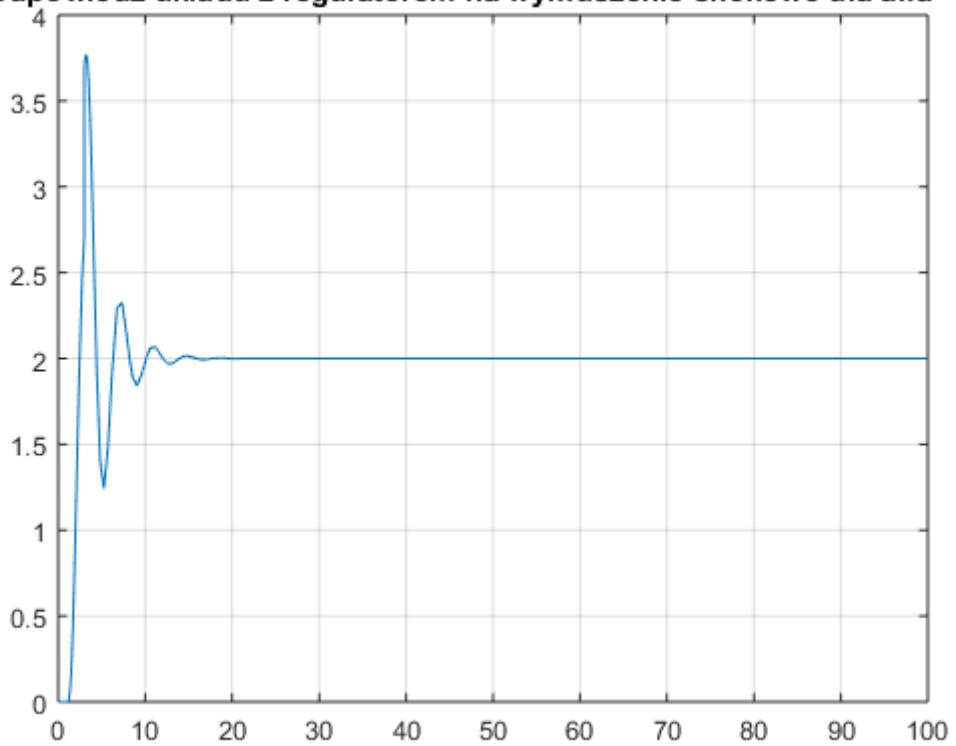
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.4



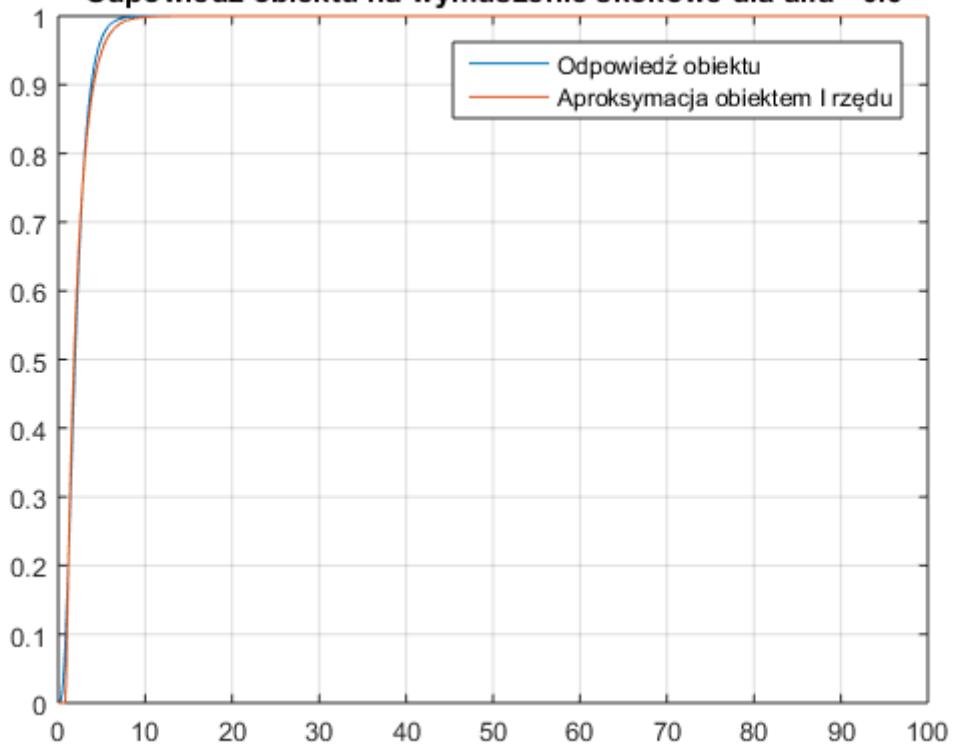
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.5



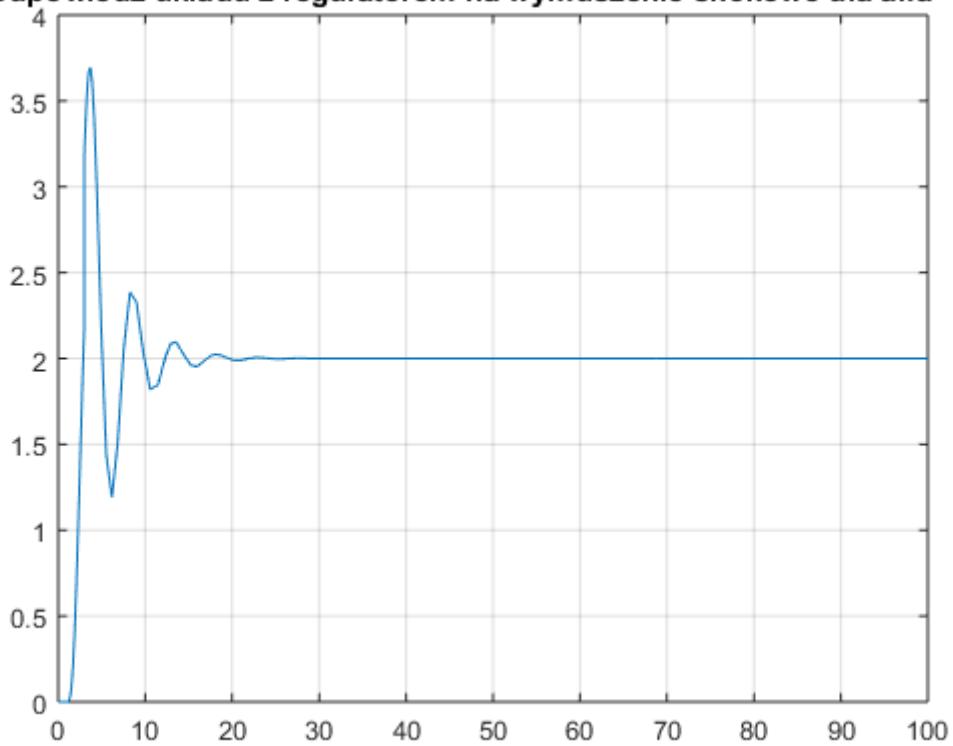
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.5



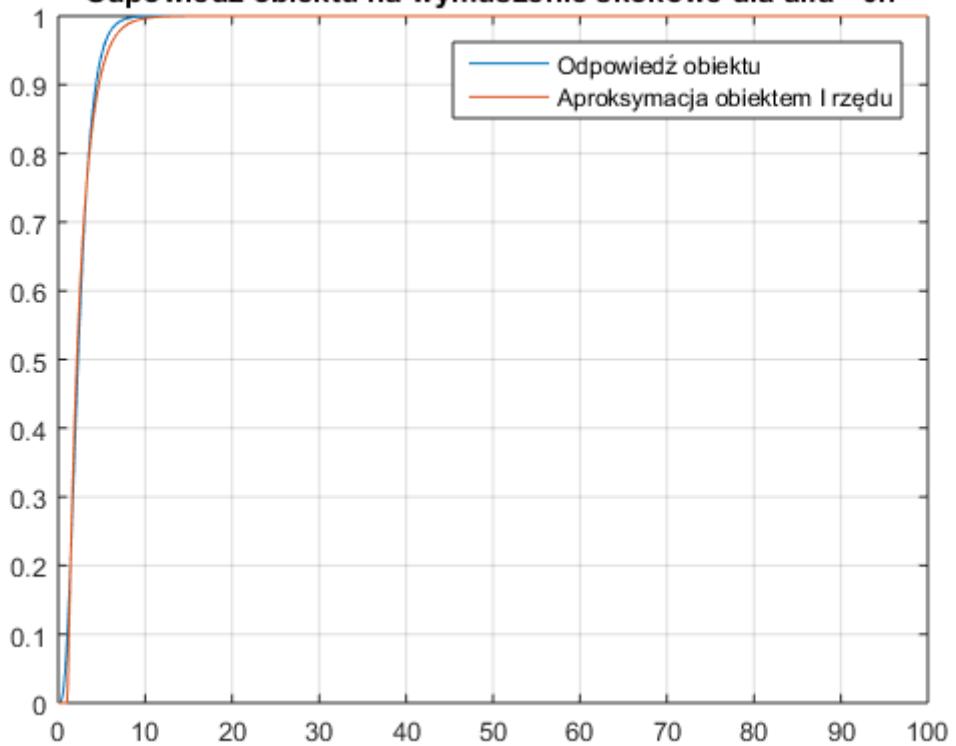
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.6



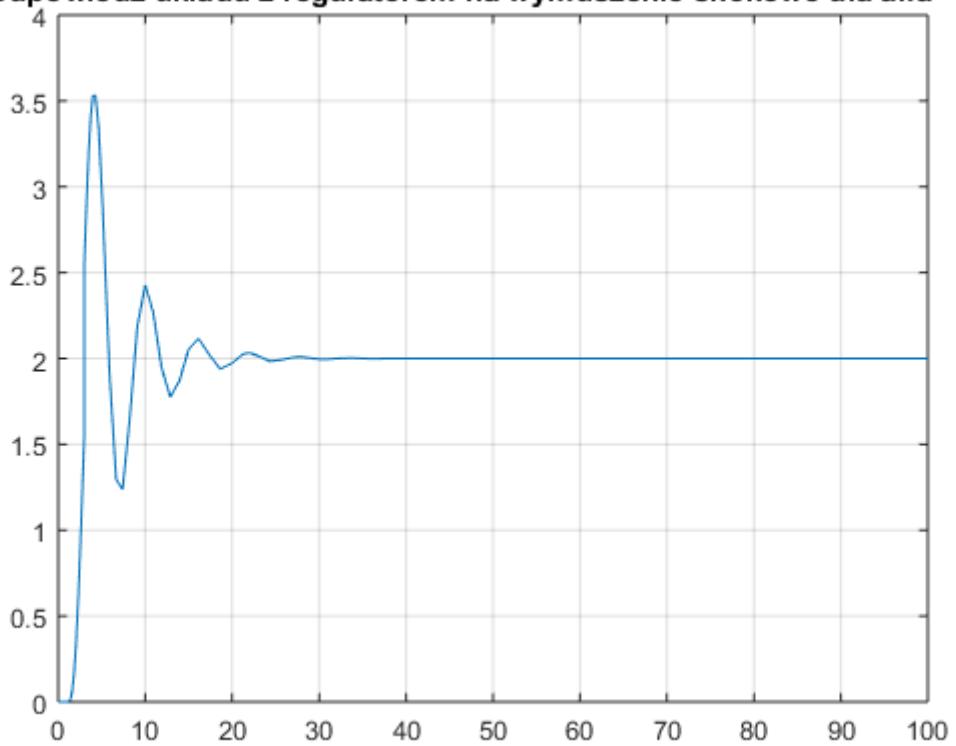
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.6



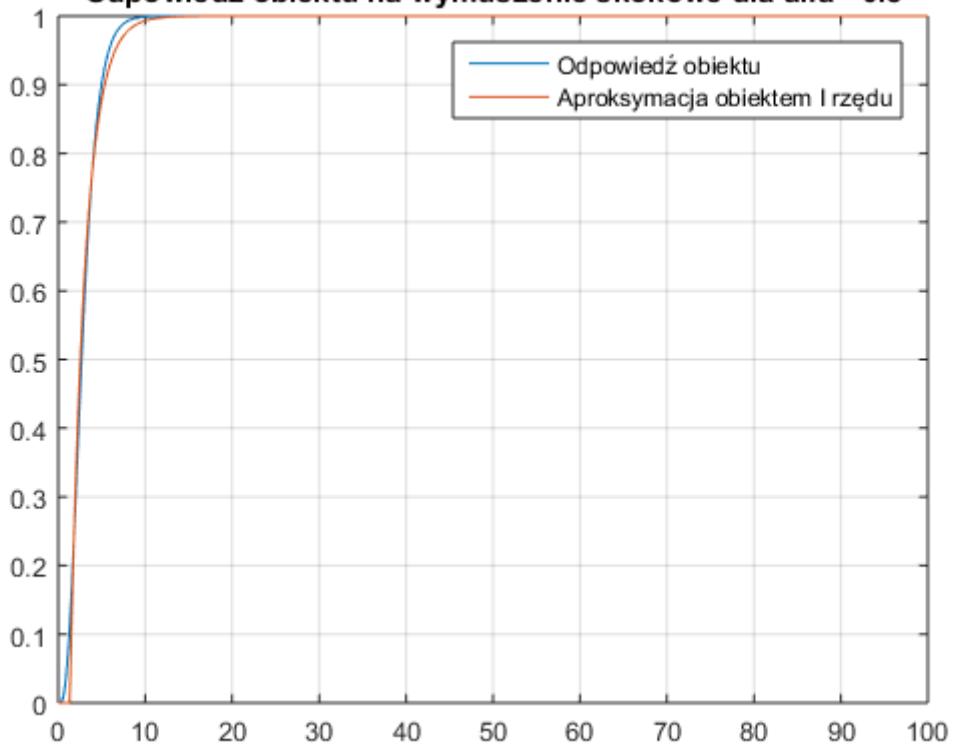
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.7



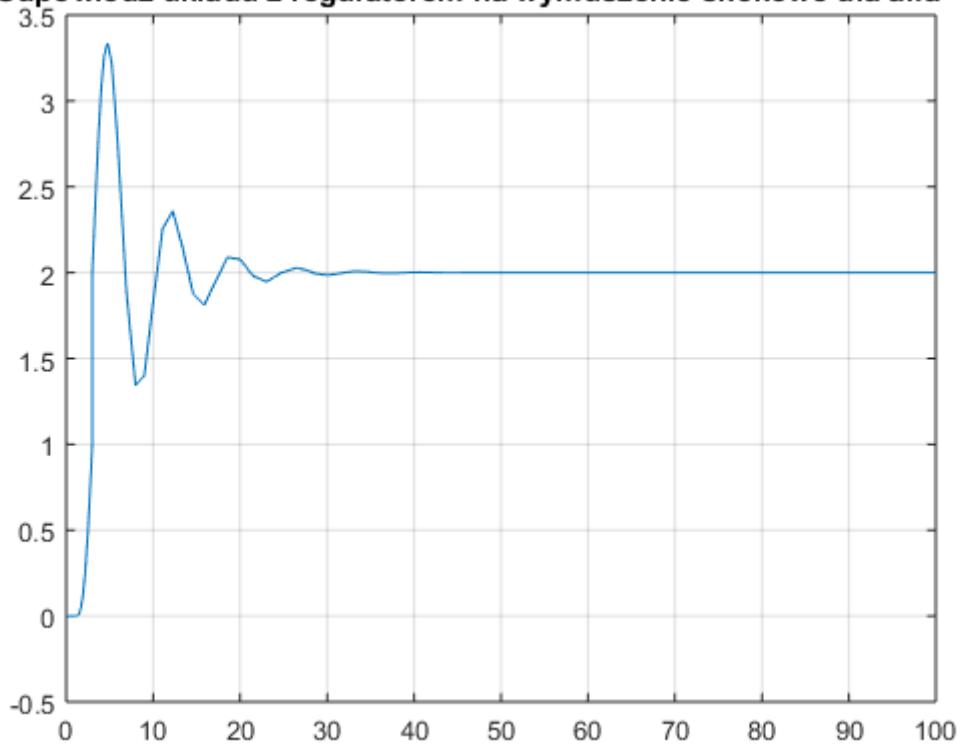
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.7



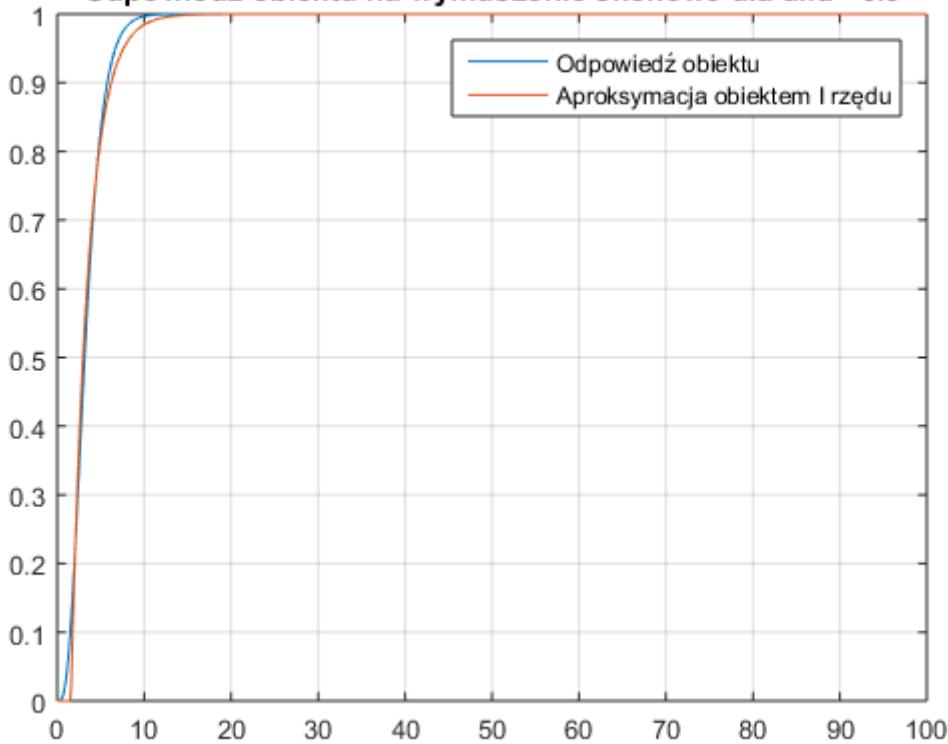
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.8



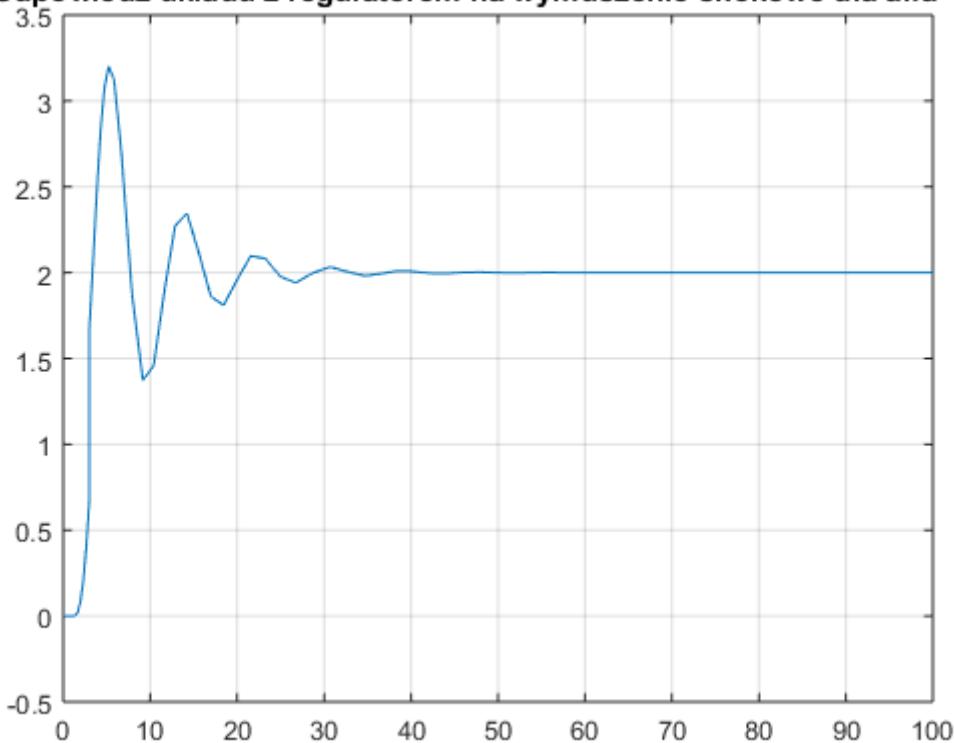
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.8



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa =0.9



Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa =0.9



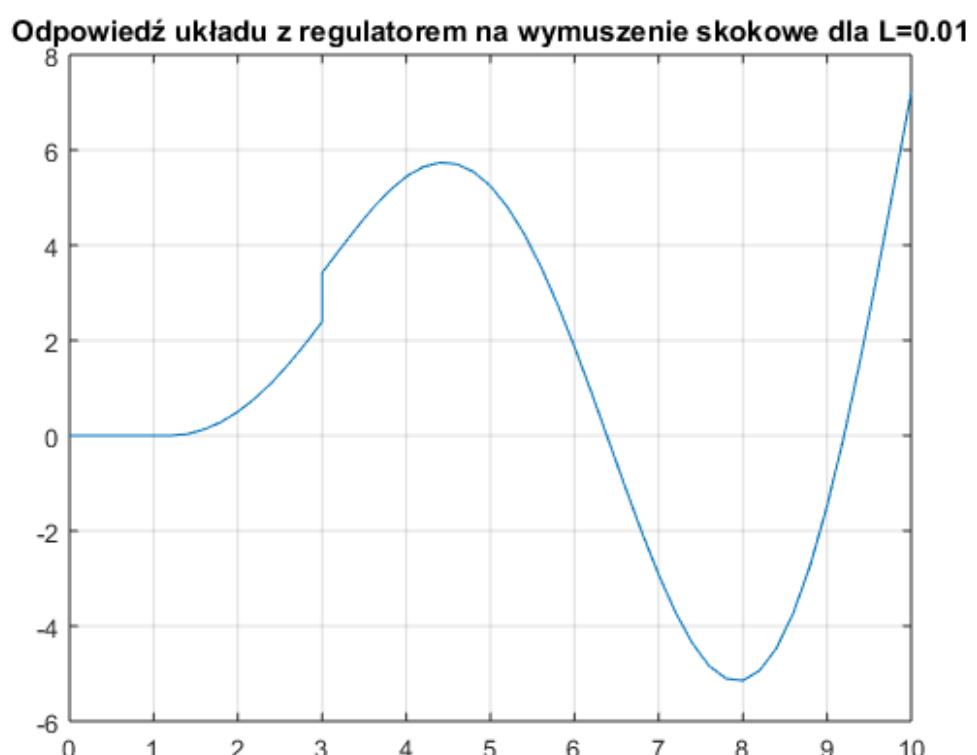
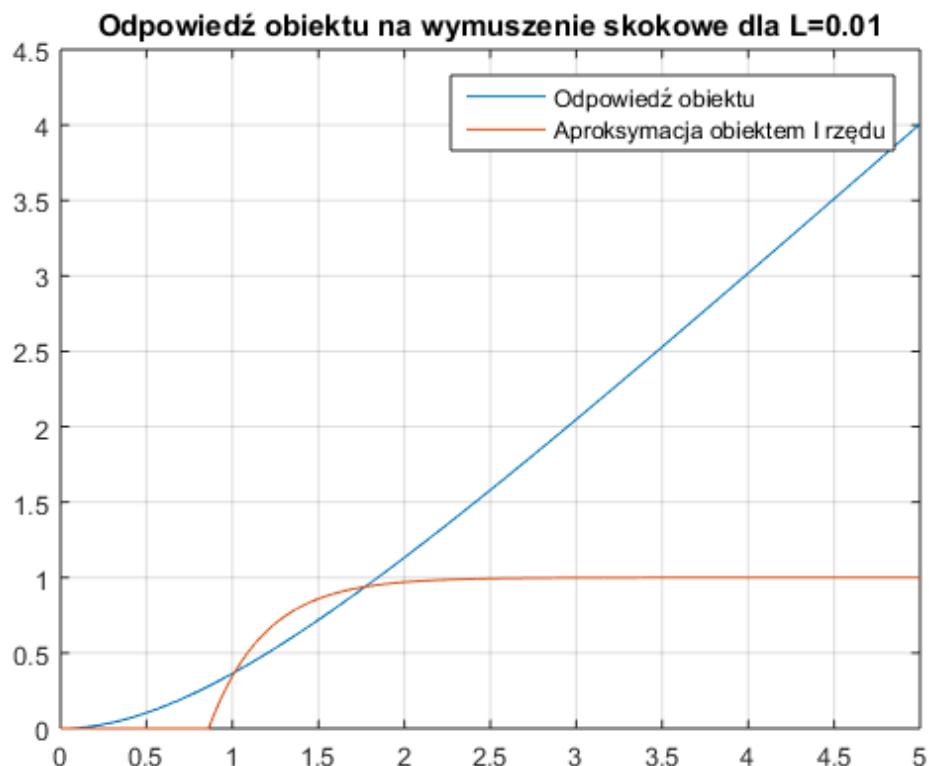
Czas regulacji układu z regulatorem wzrasta wraz ze zwiększeniem parametru α . Rośnie także liczba przeregulować. Regulator doprowadza system do wartości zadanej i utrzymuje ją, co oznacza stabilność. Dla małych wartości parametru α układ charakteryzuje się ogromną dynamiką.

9. Symulacje dla obiektu G₆.

$$G_6 = \frac{e^{-sL_1}}{s(1 + sT_1)}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając opóźnienie L_1 układu w następujący sposób:

$$L_1 = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, \text{ gdzie } L_1 + T_1 = 1$$



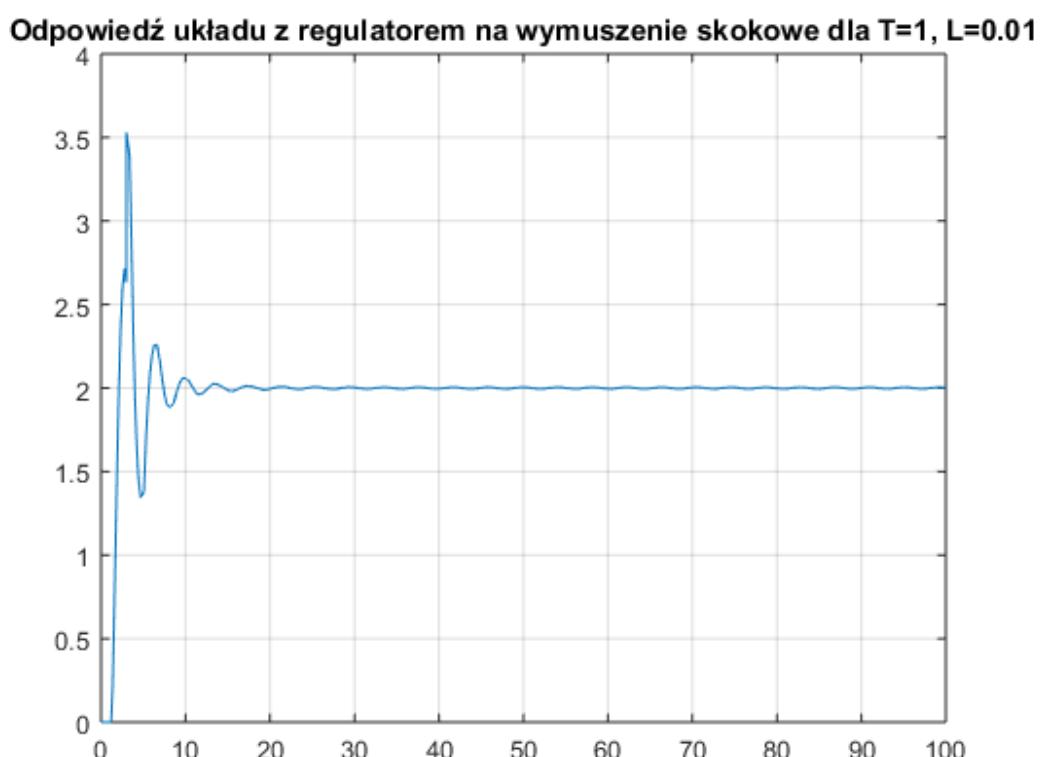
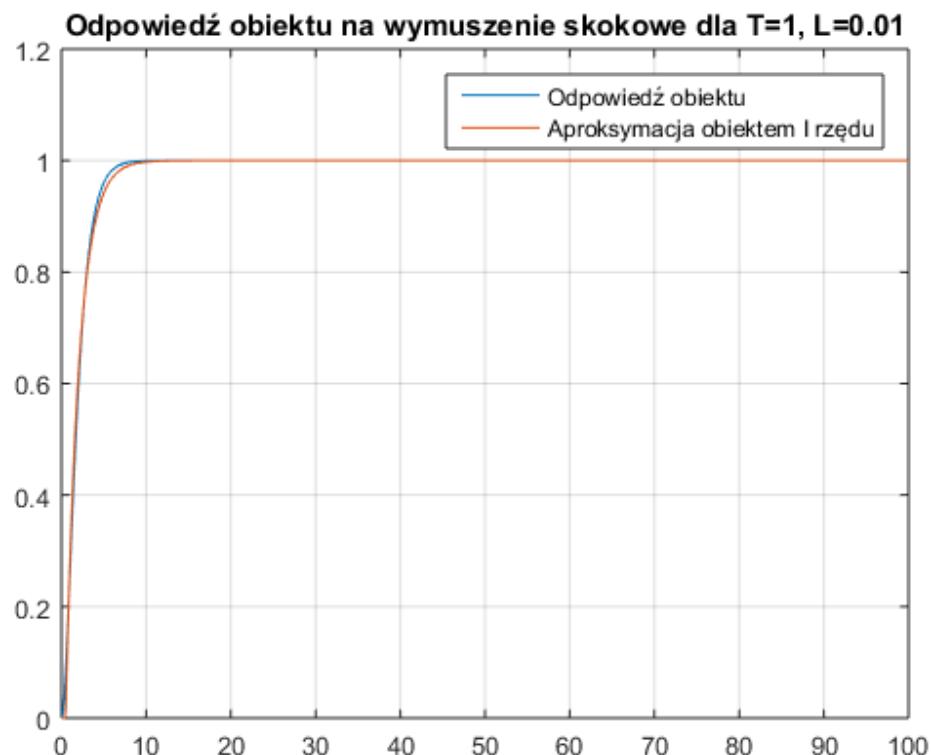
Obiekt szósty w odpowiedzi na skok jednostkowy ucieka do nieskończoności i jest niestabilny. Metoda IMC służy do regulacji obiektów stabilnych. Odpowiedź układu z regulatorem wpada w oscylację, które z czasem zmierzają do nieskończoności.

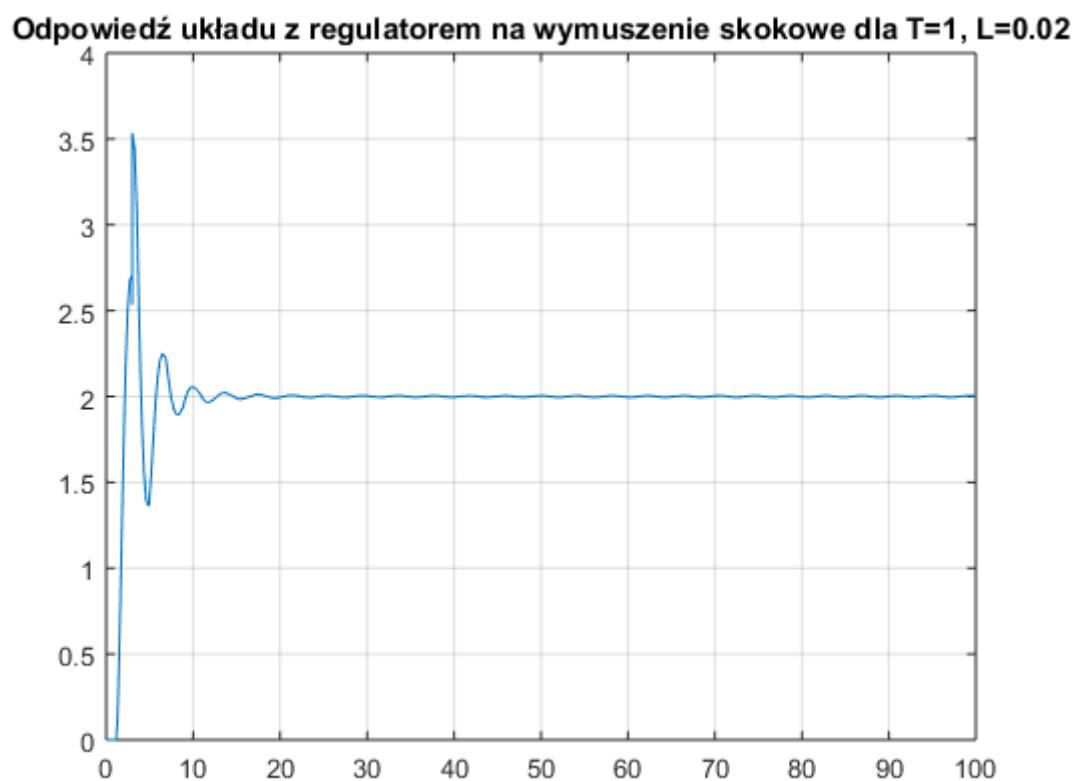
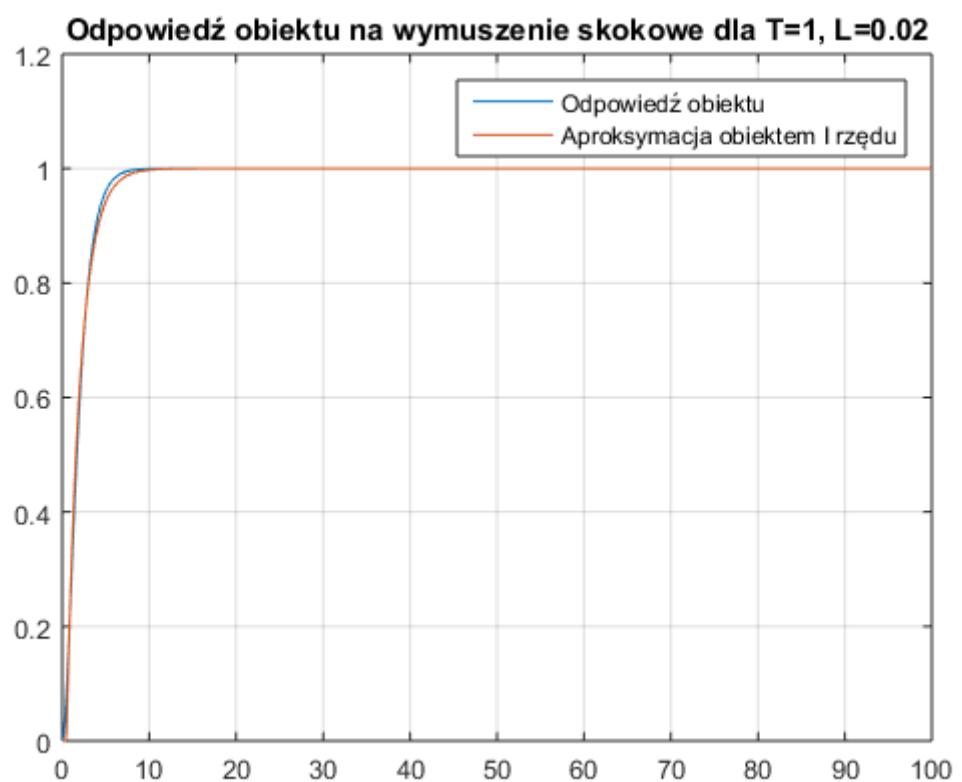
10. Symulacje dla obiektu G₇.

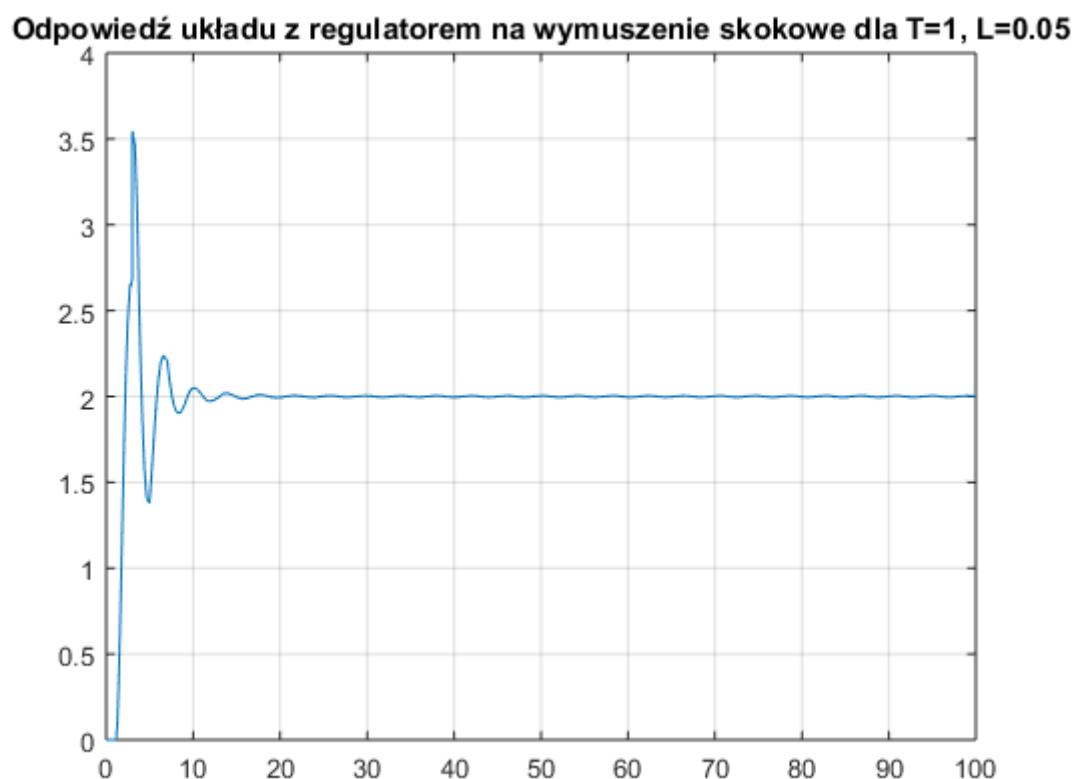
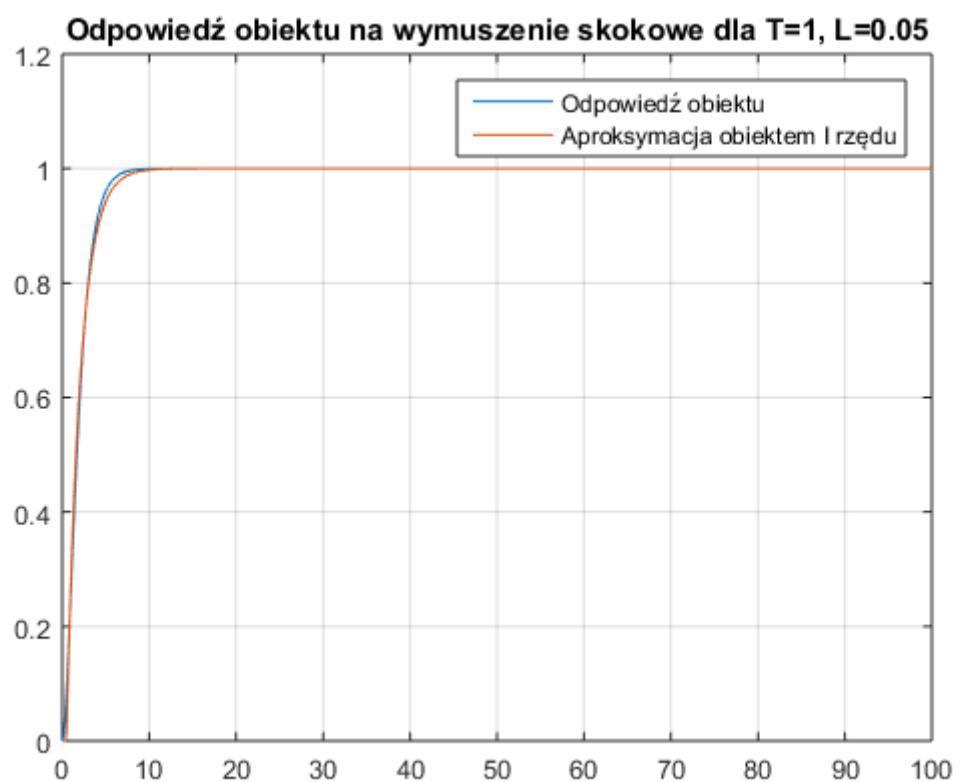
$$G_7 = \frac{Te^{-sL_1}}{(1+sT)(1+sT_1)}$$

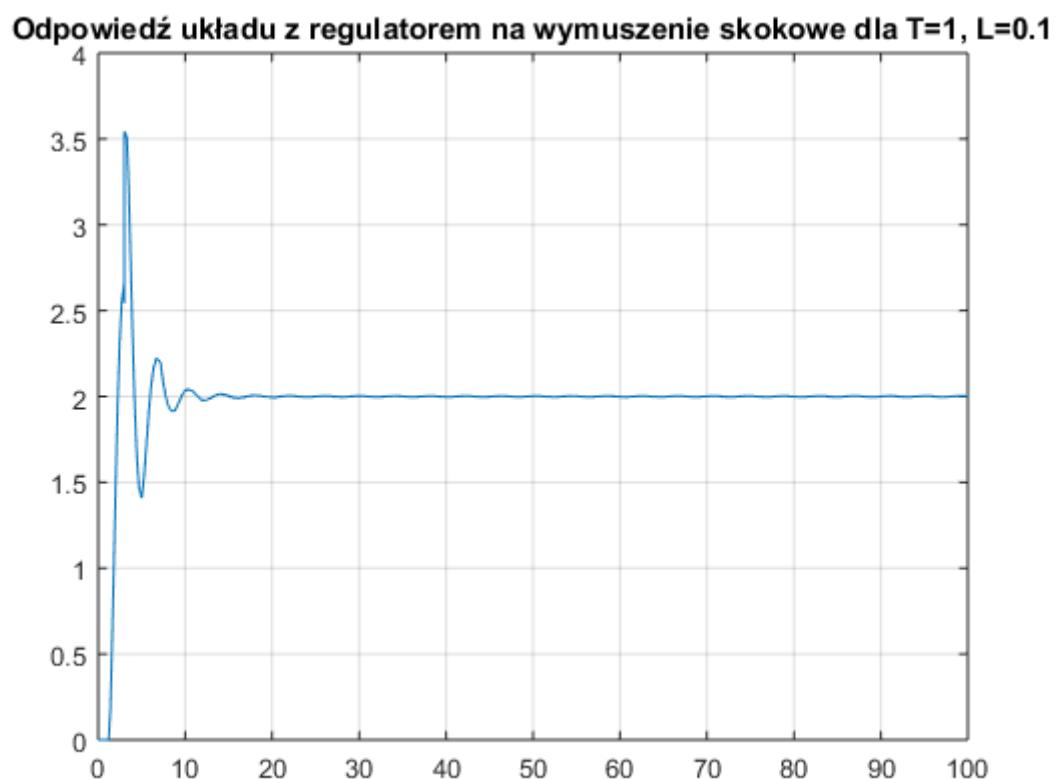
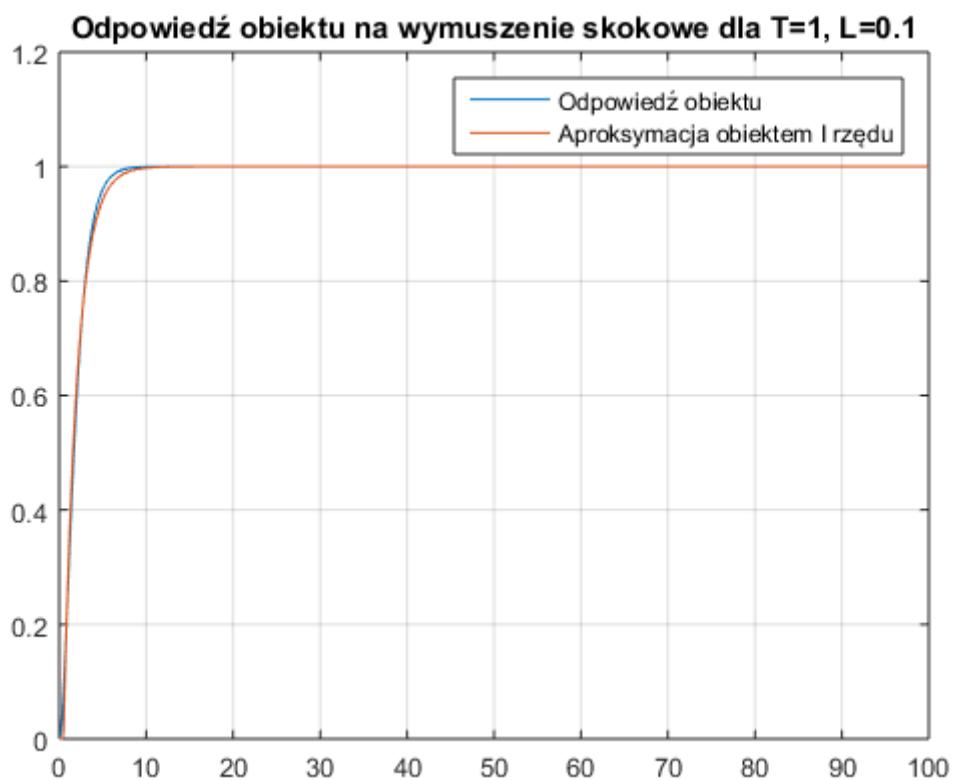
Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając stałą czasową T oraz opóźnienie L₁ w następujący sposób:

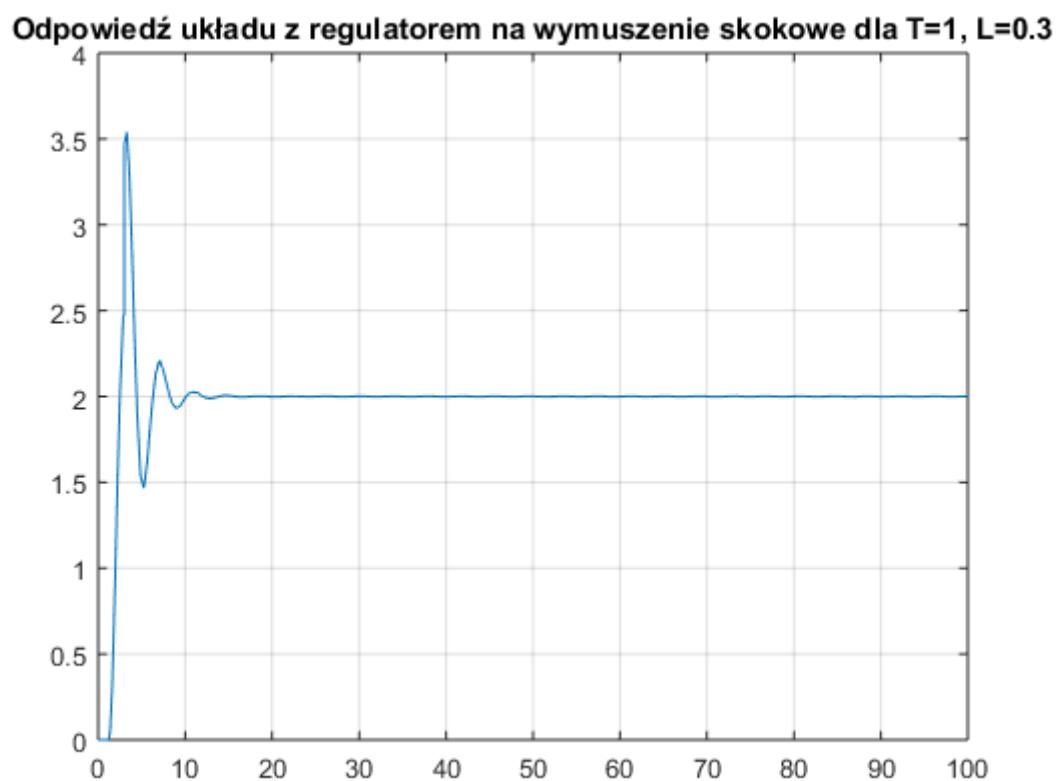
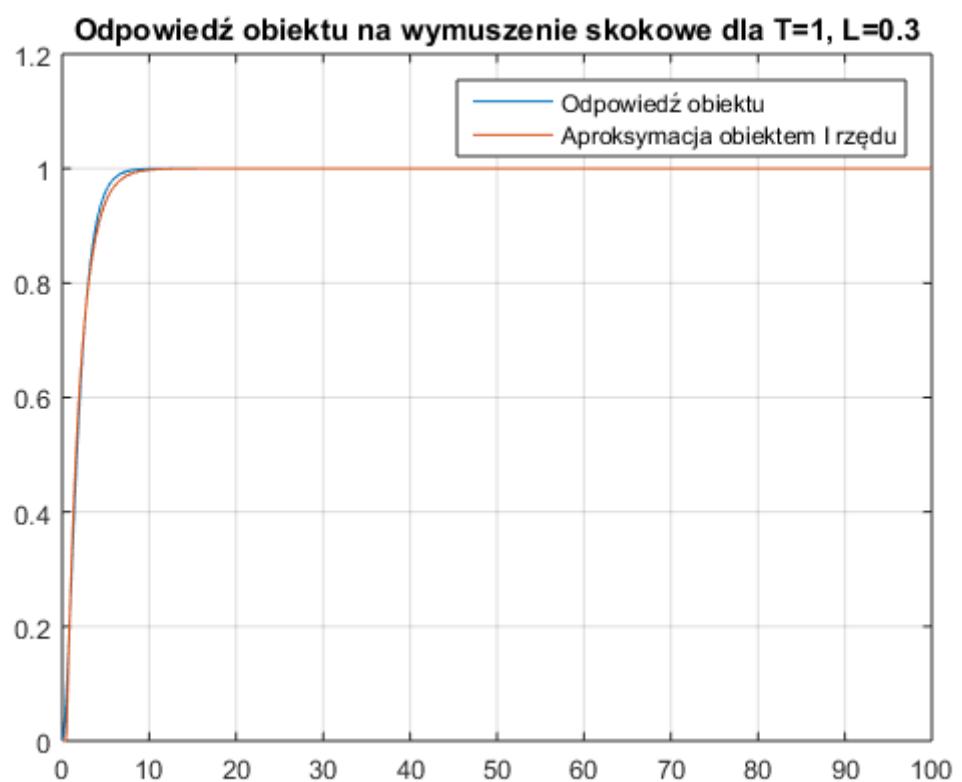
T = 1, 2, 5, 10; L₁ = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, gdzie L₁ + T₁ = 1

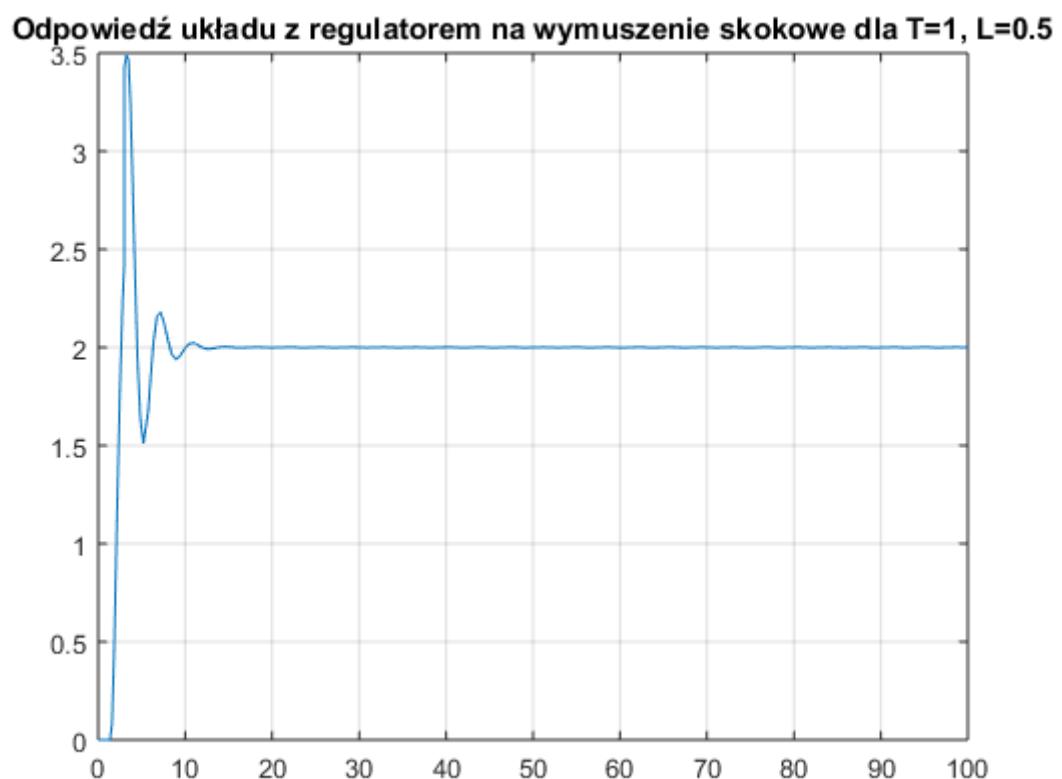
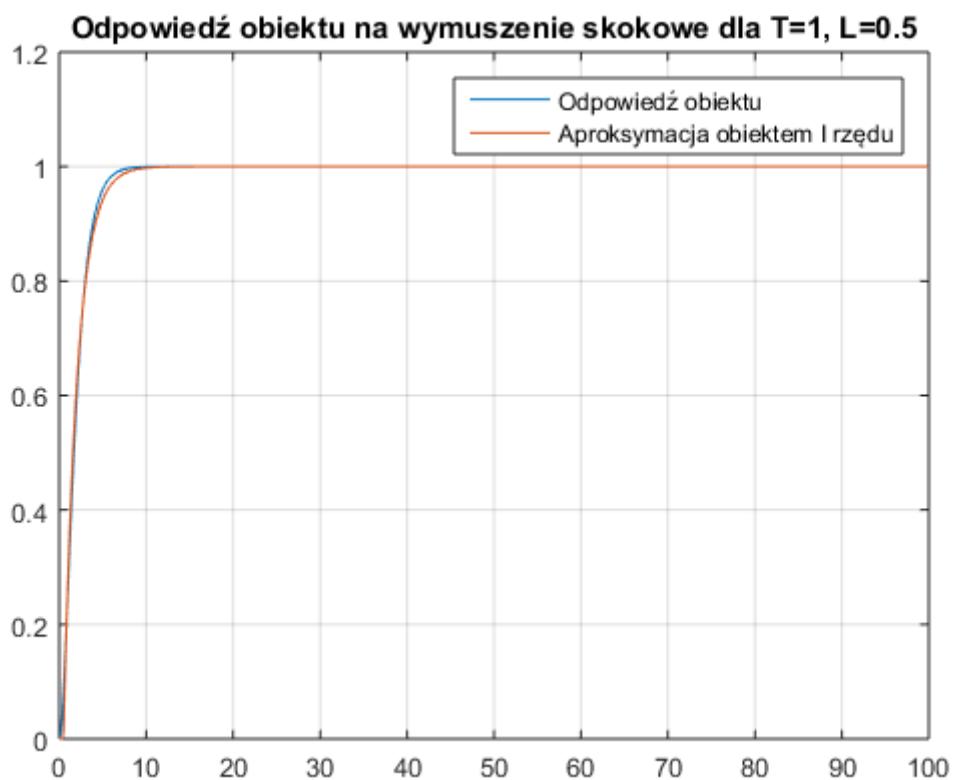


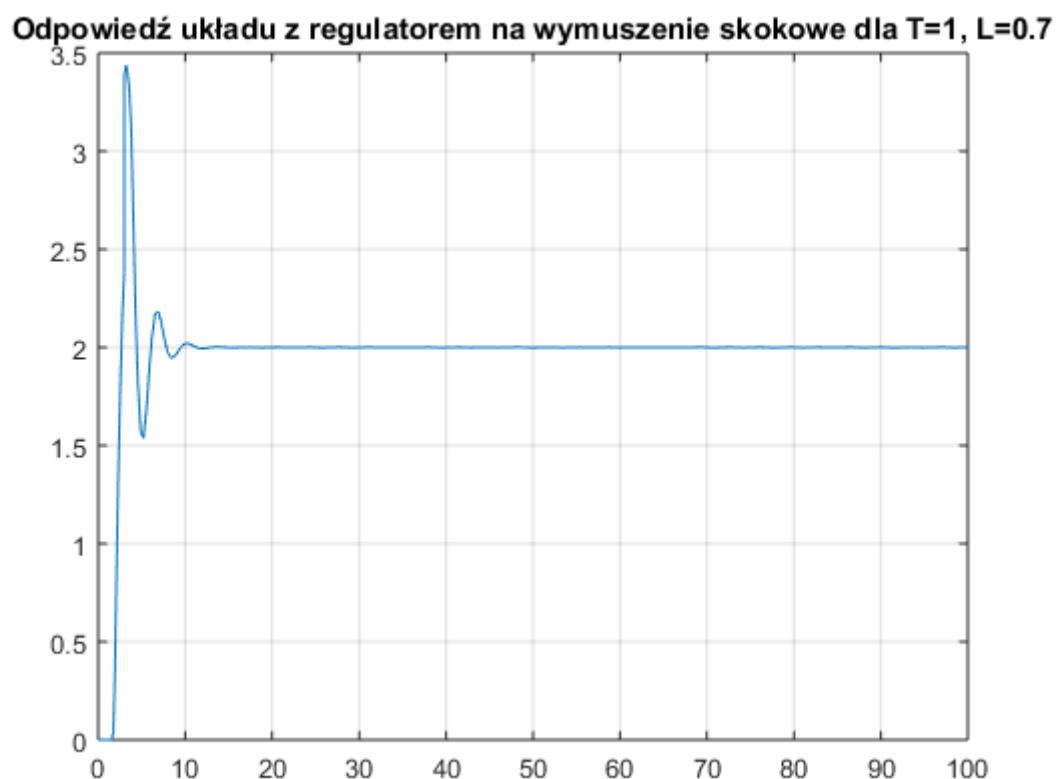
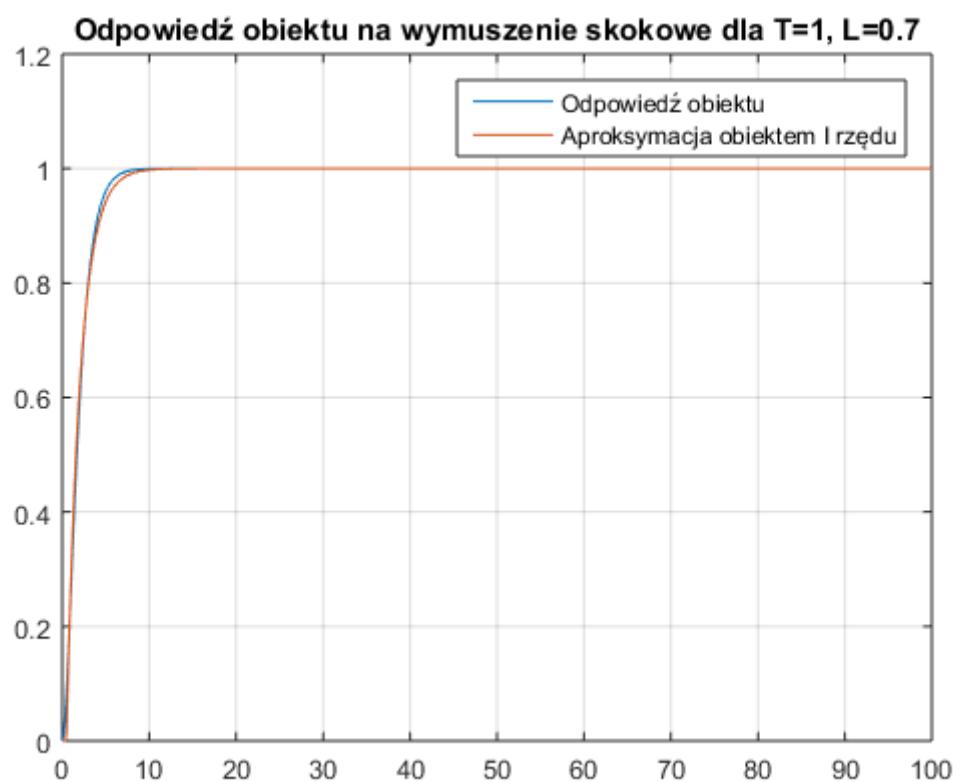


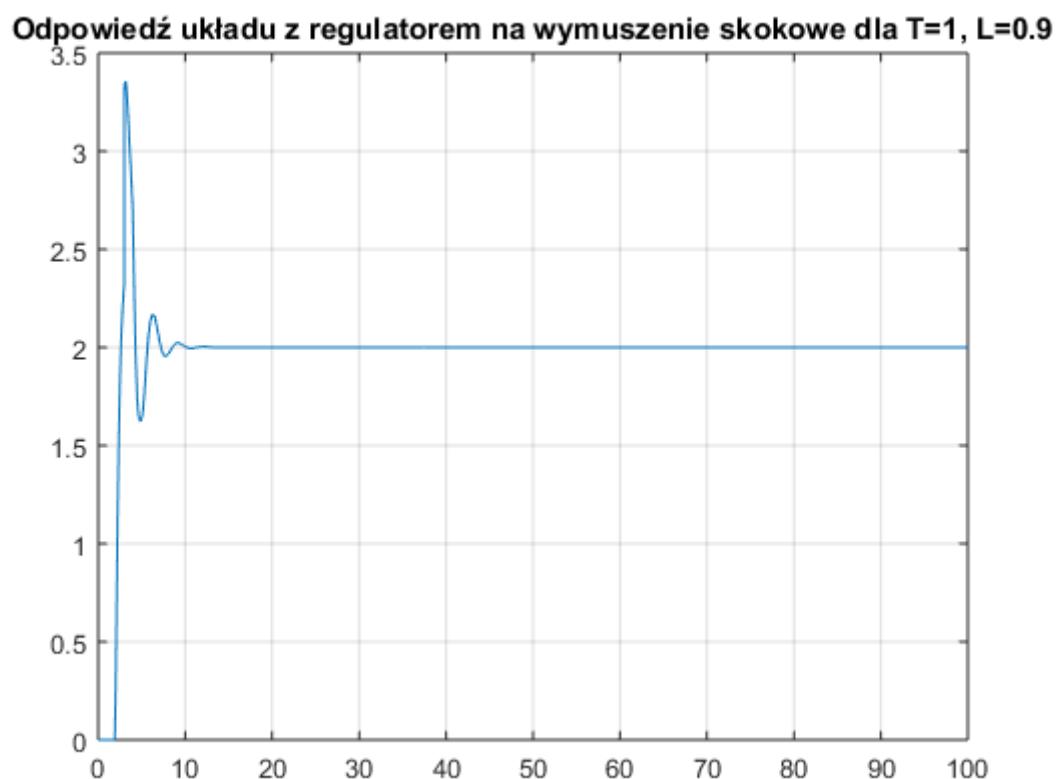
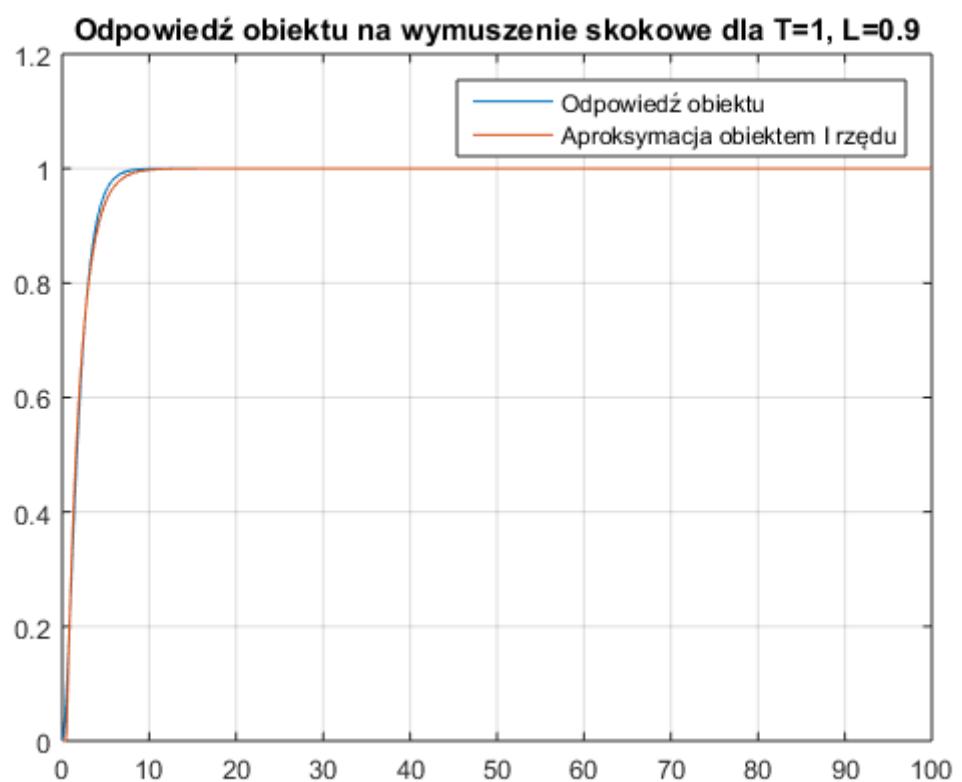


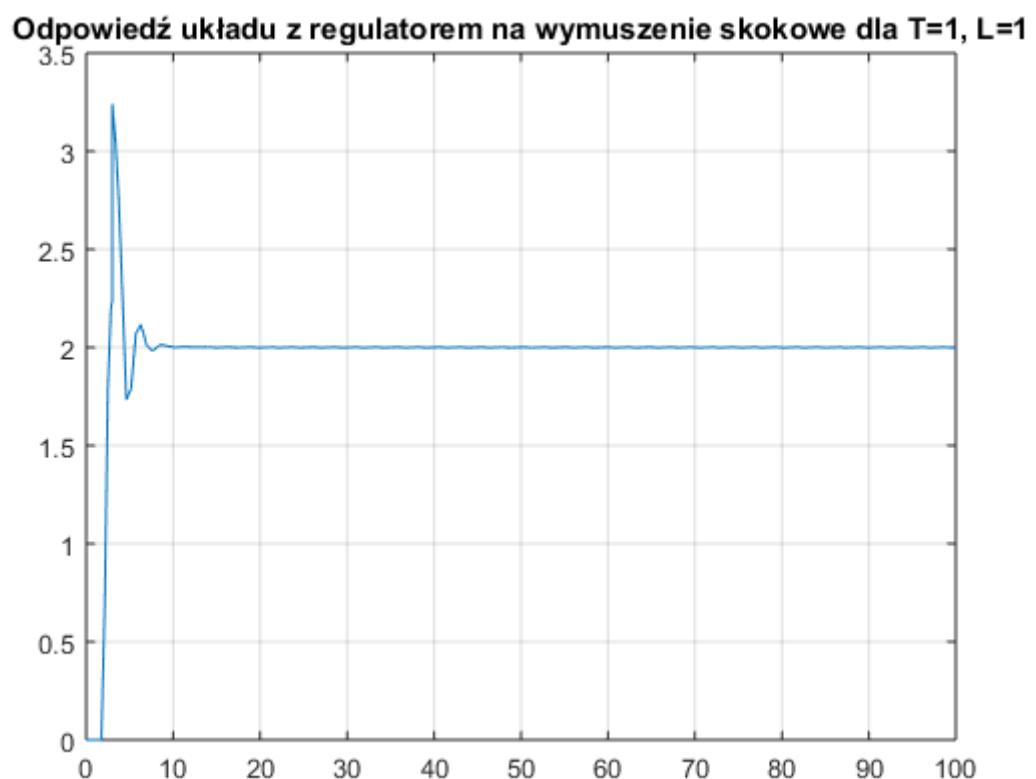
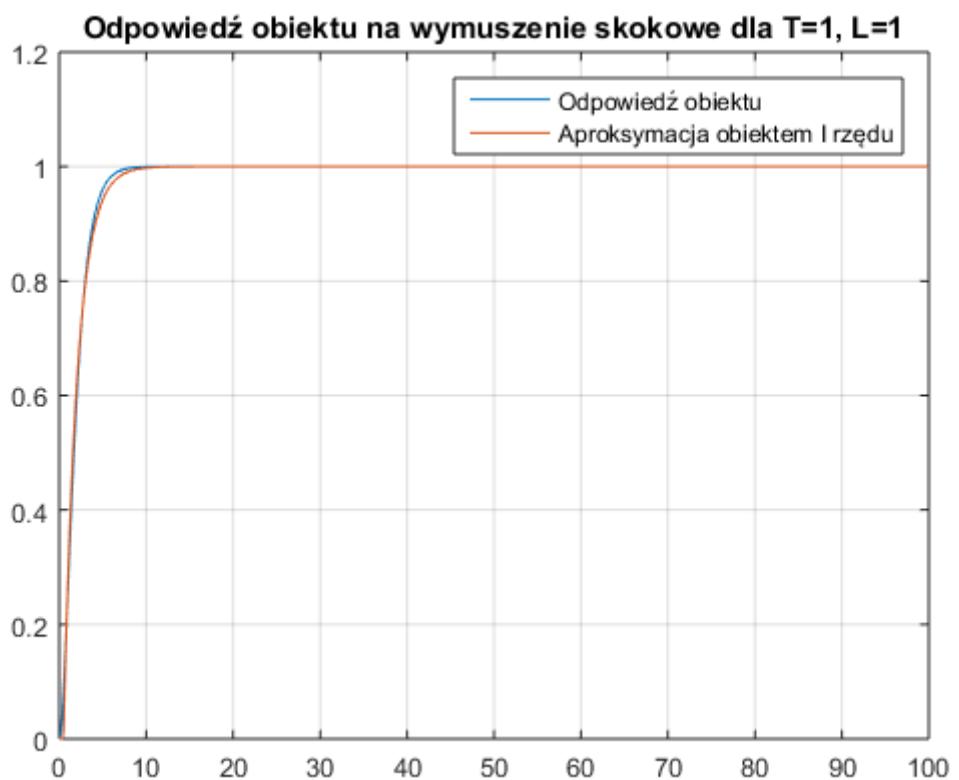




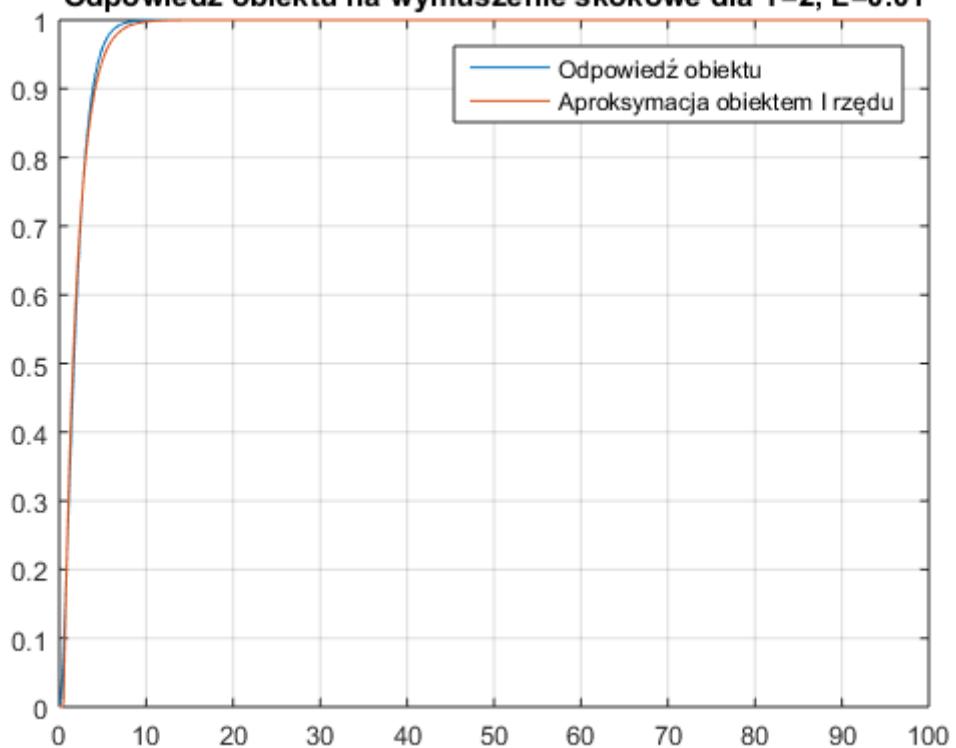




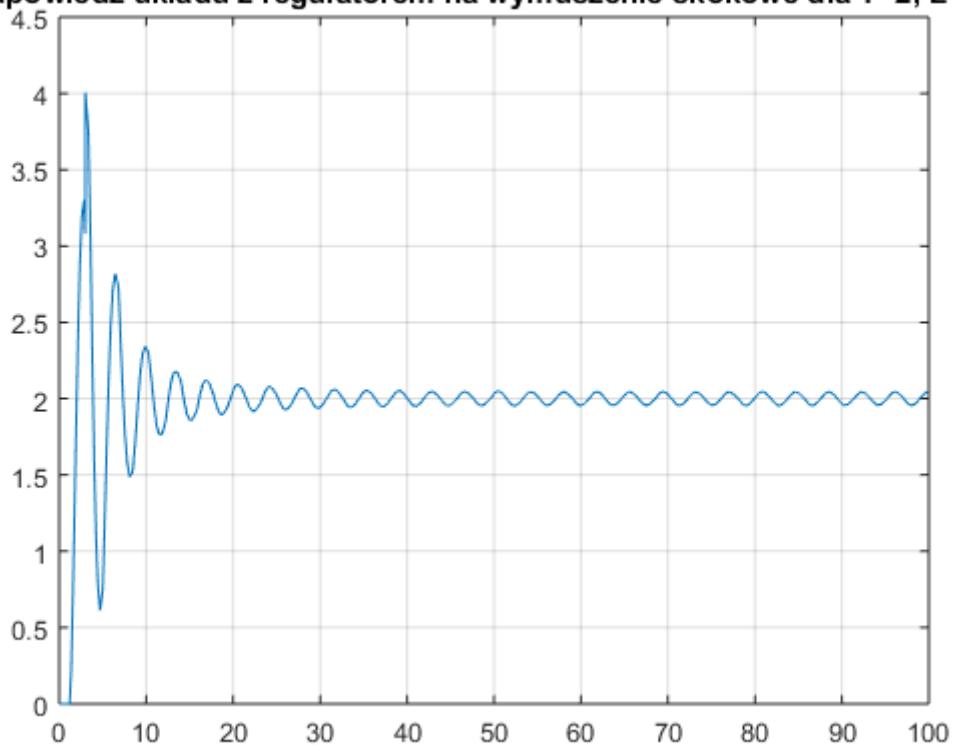




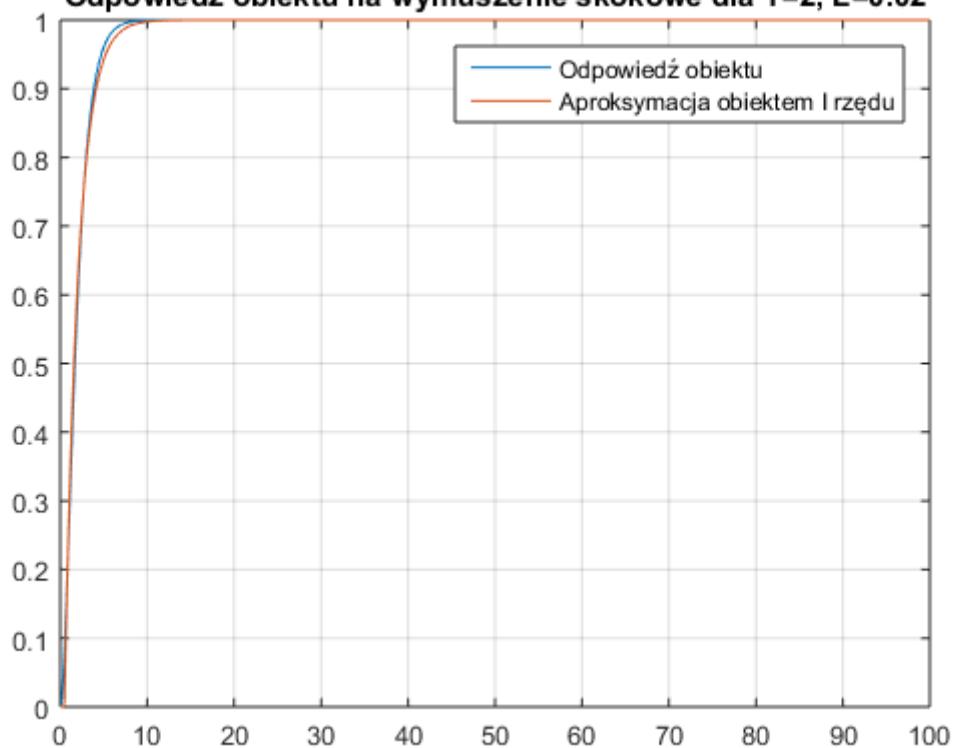
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.01$



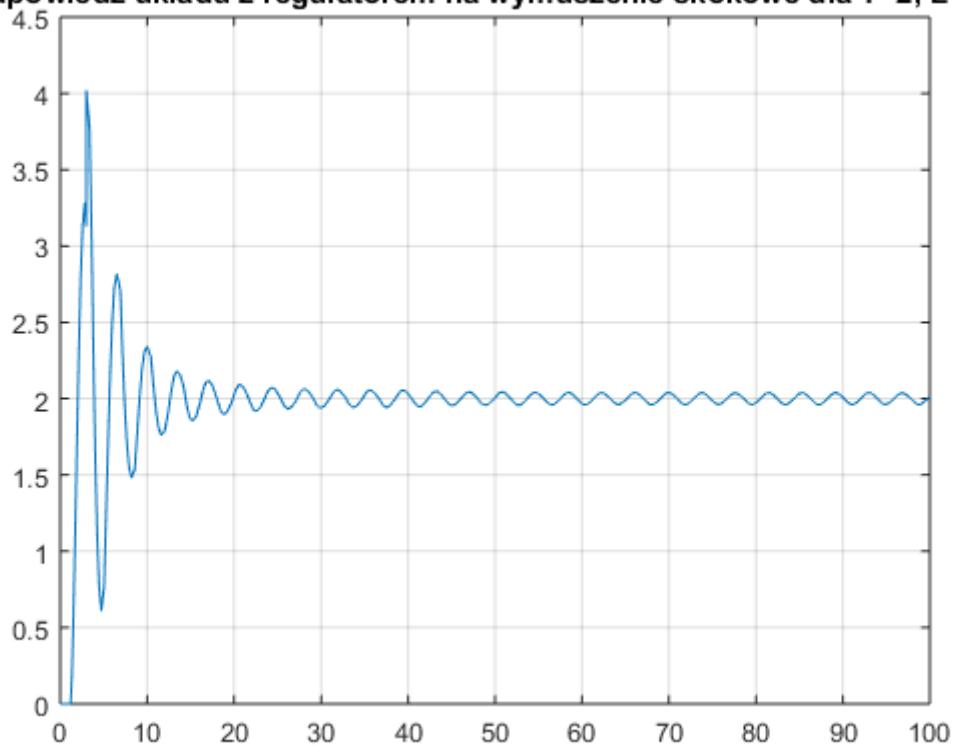
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.01$



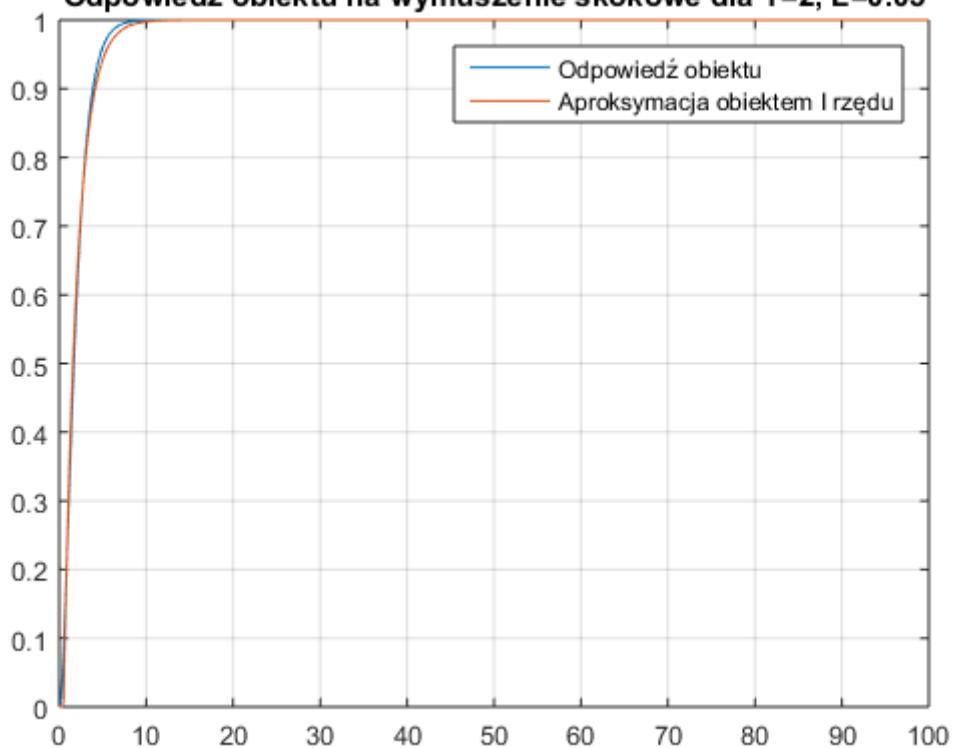
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.02$



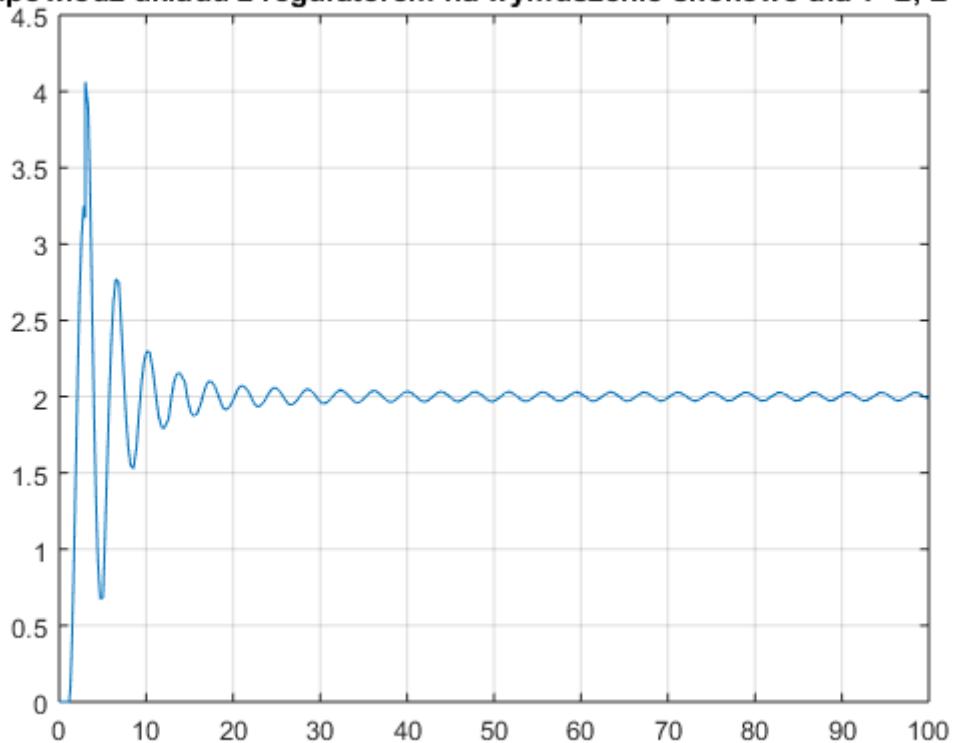
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.02$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.05$



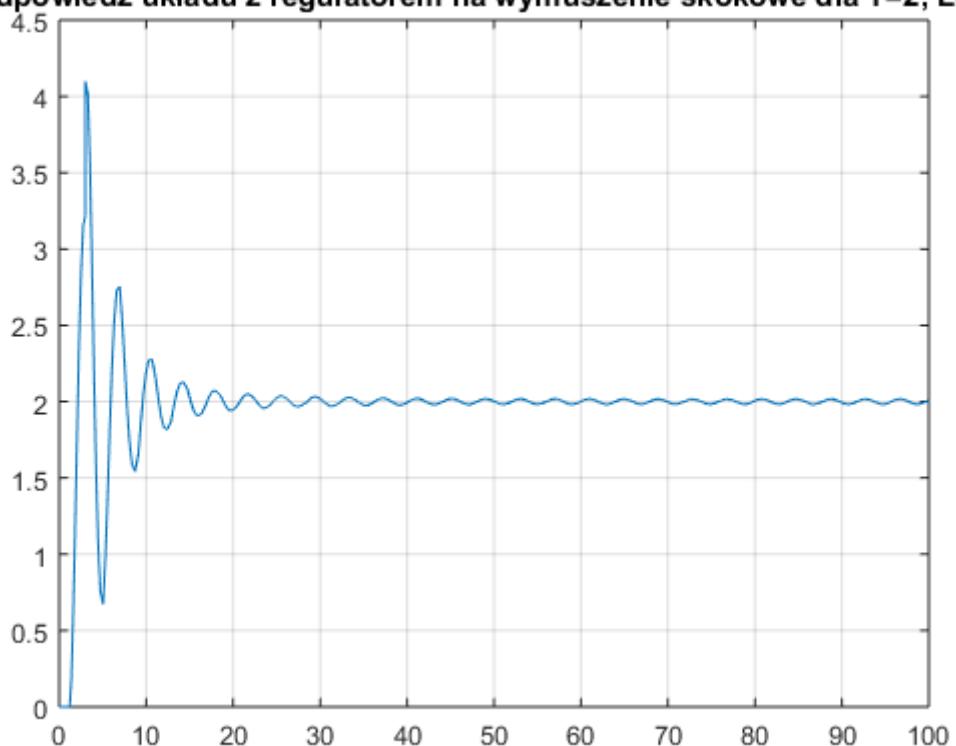
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.05$



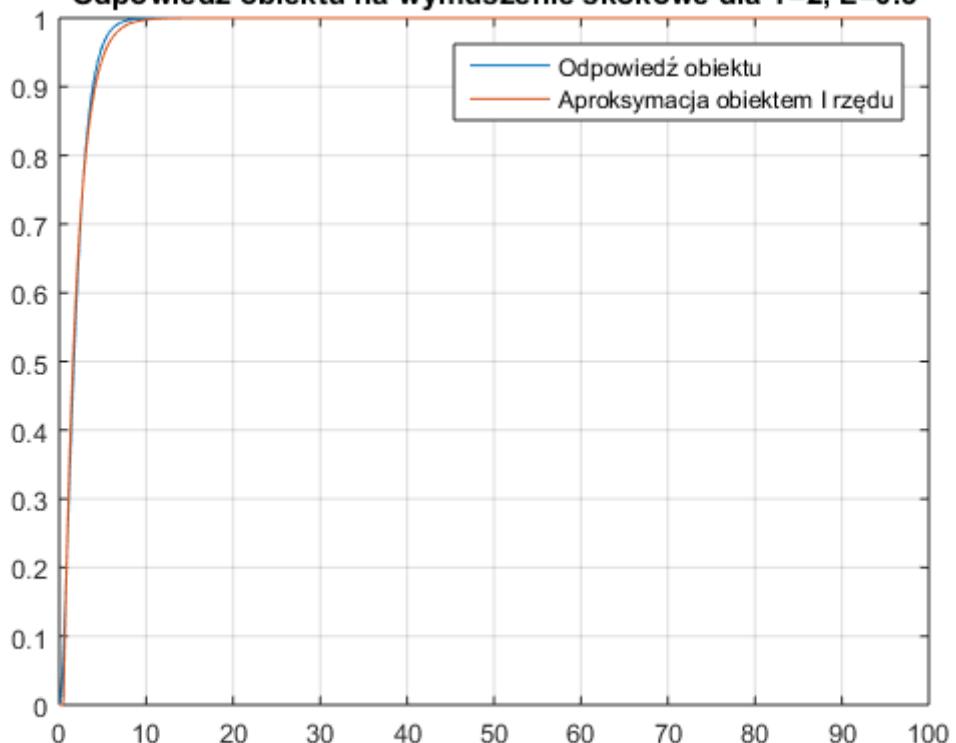
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.1$



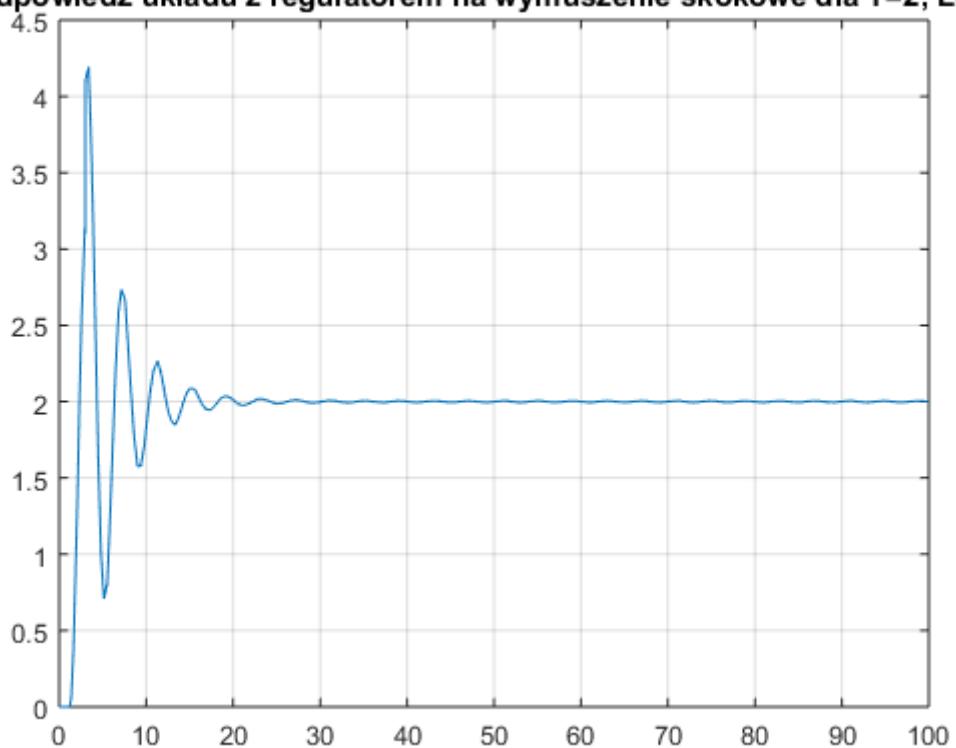
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.1$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.3$



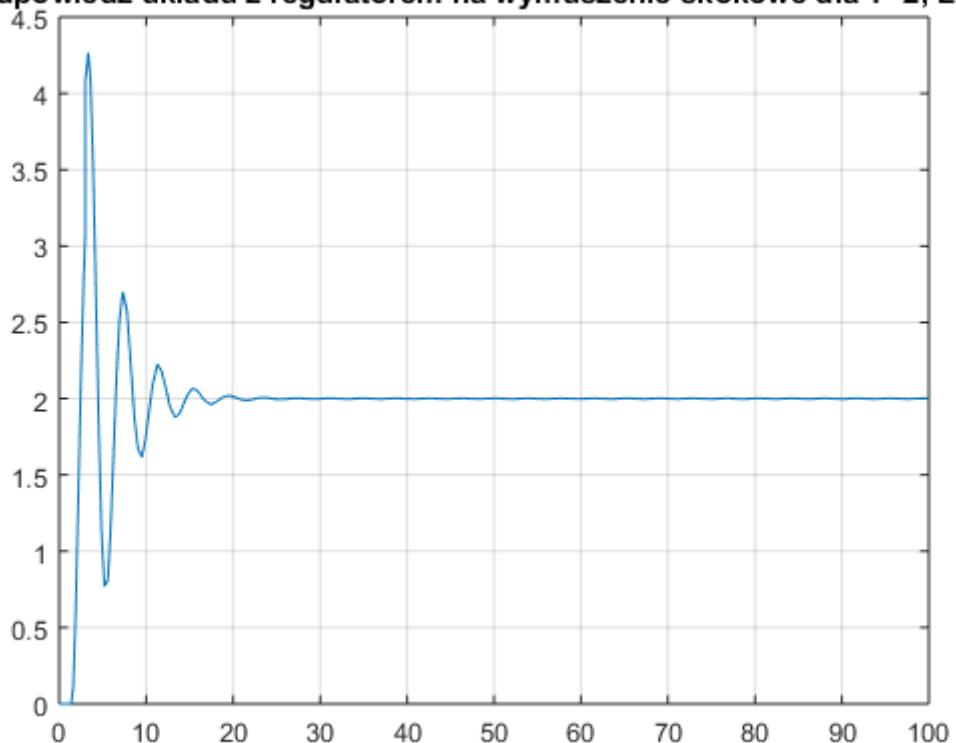
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.3$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.5$



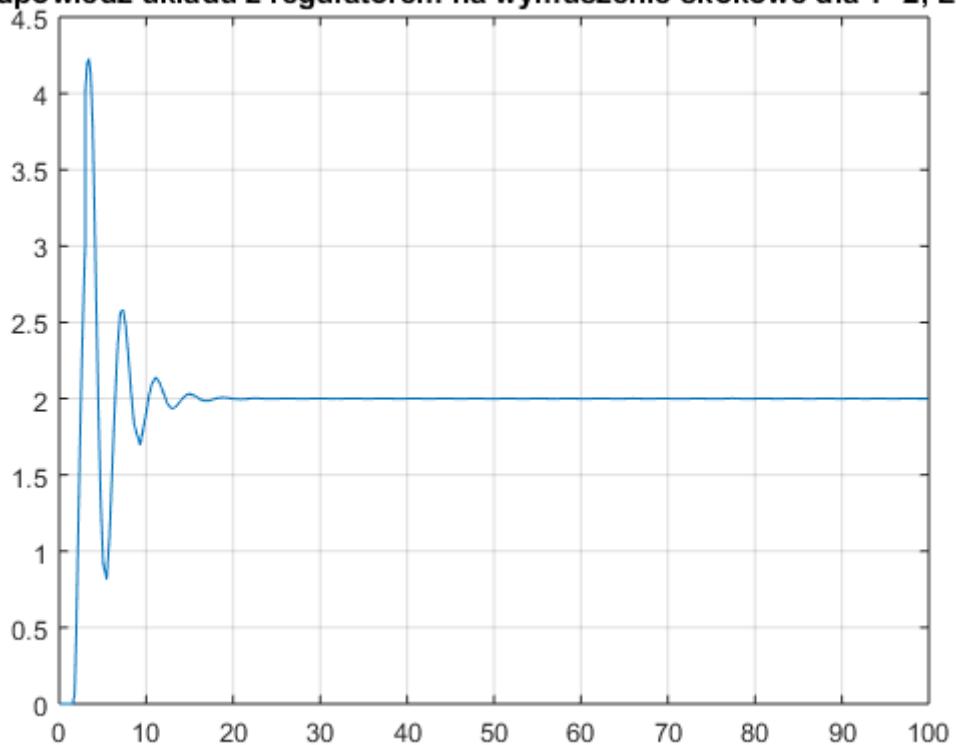
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.5$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.7$



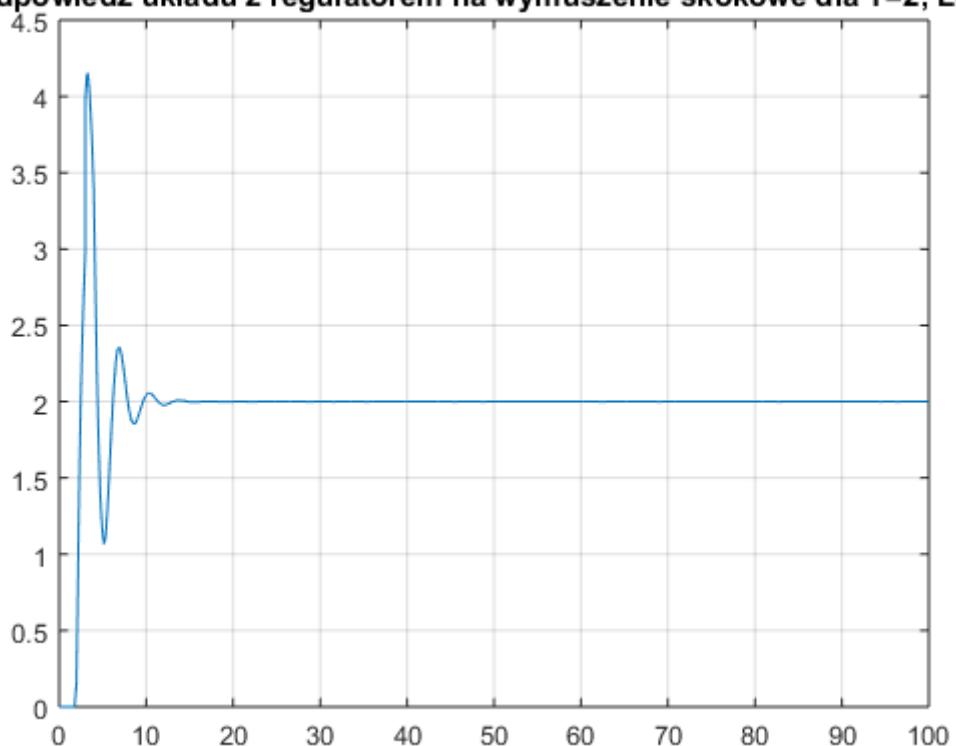
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.7$



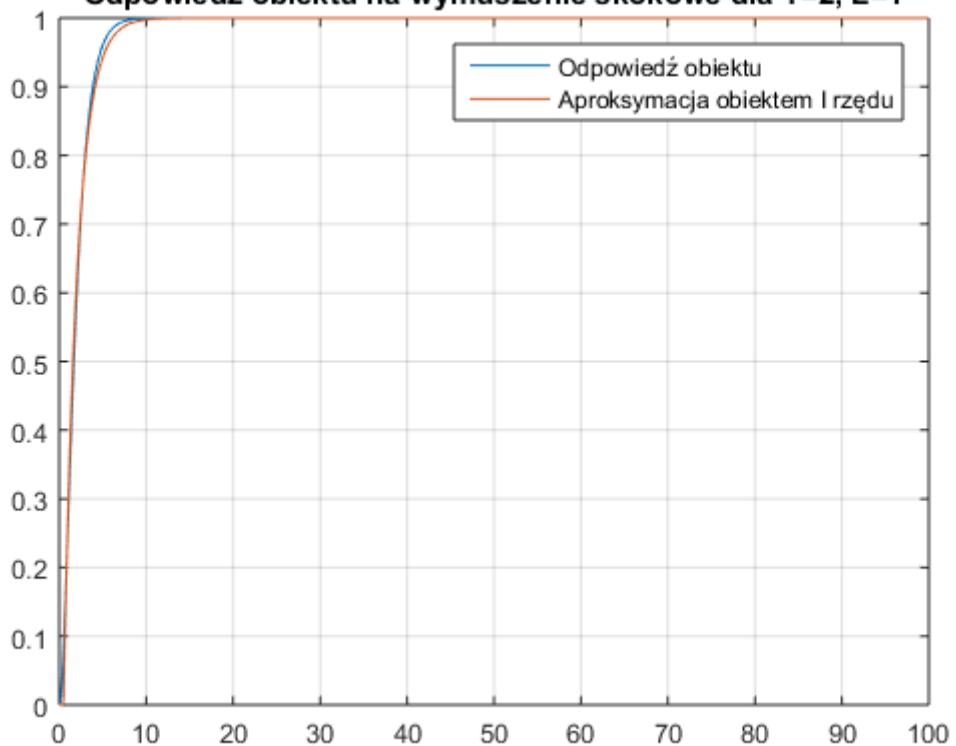
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.9$



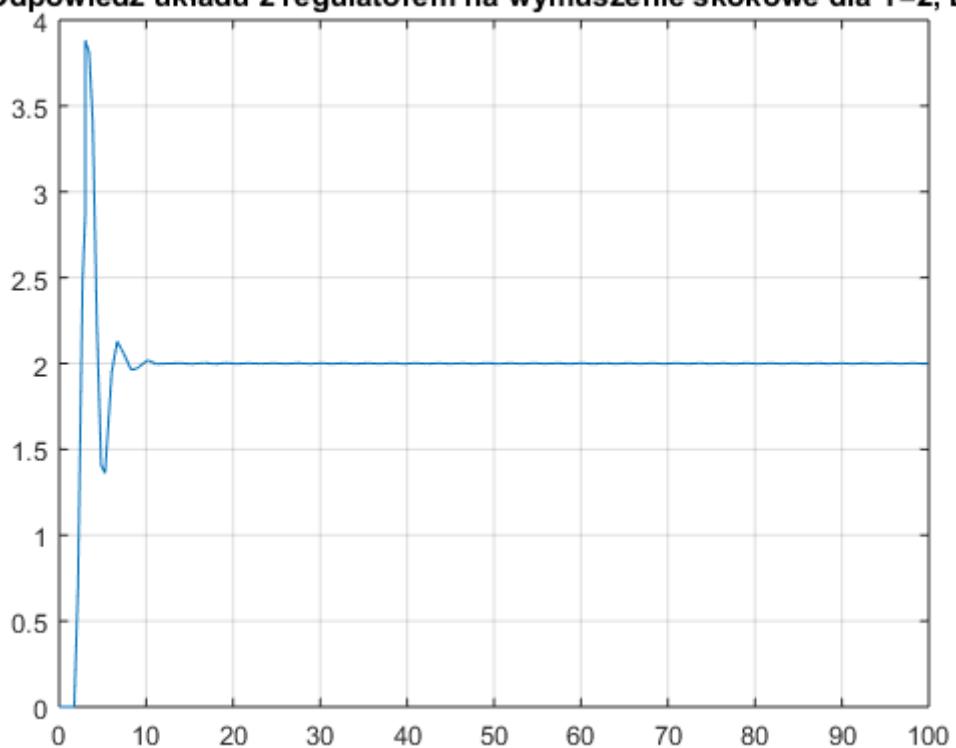
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=0.9$



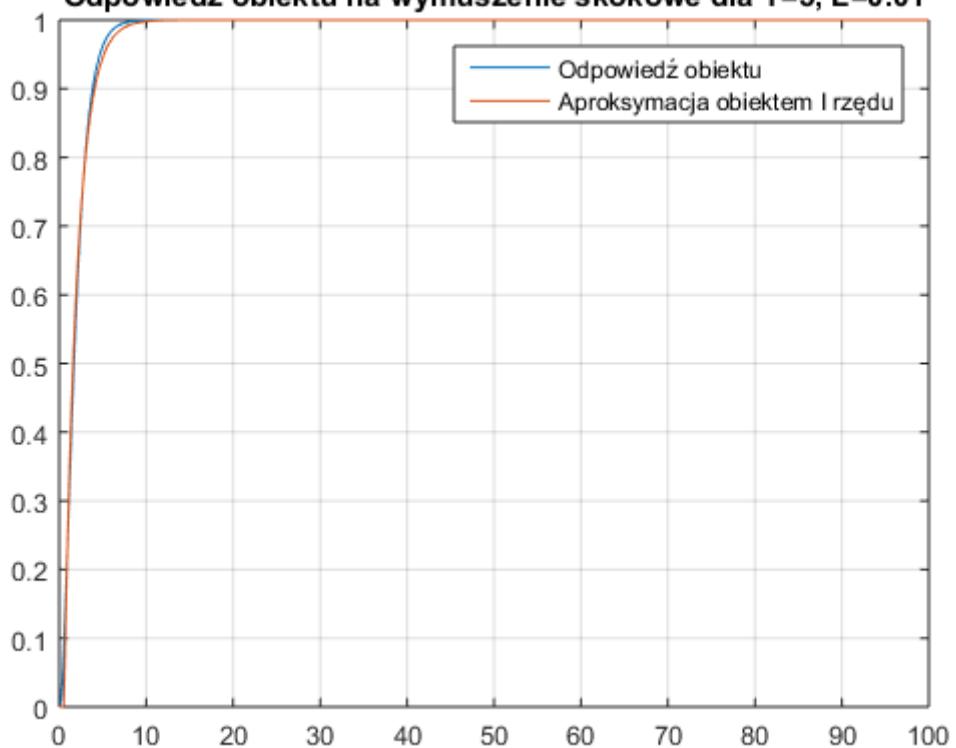
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=1$



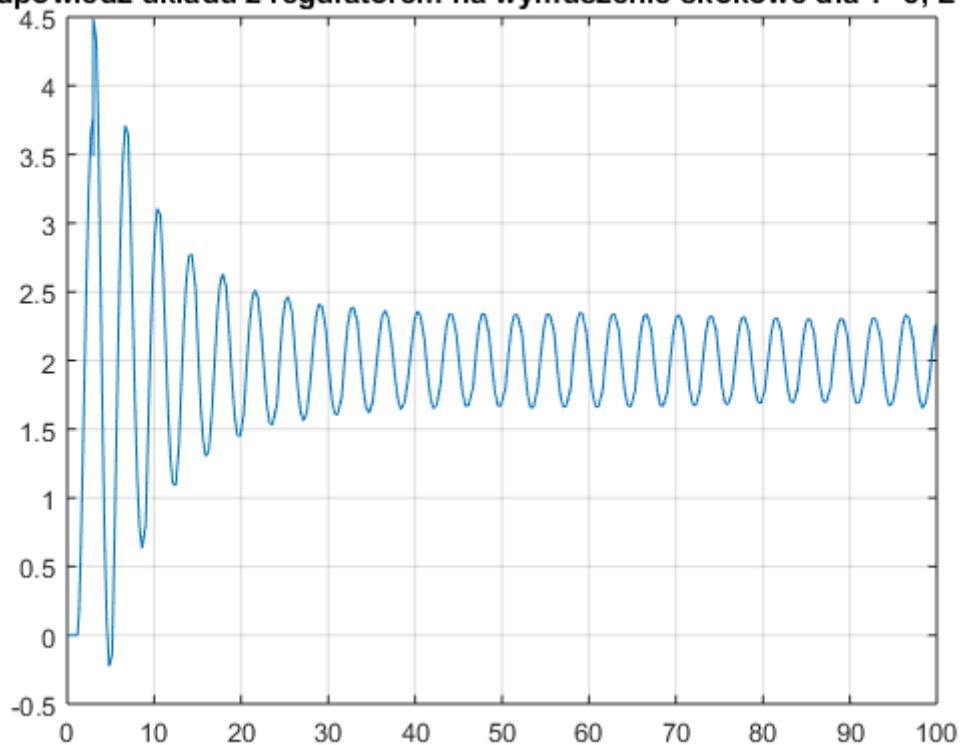
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=2$, $L=1$



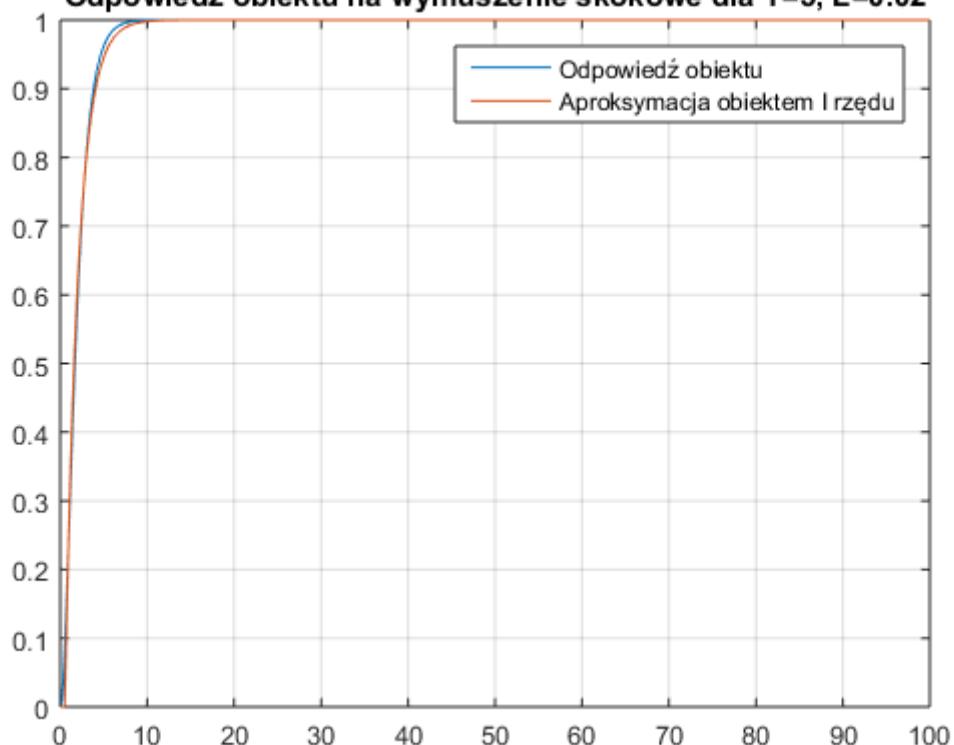
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.01$



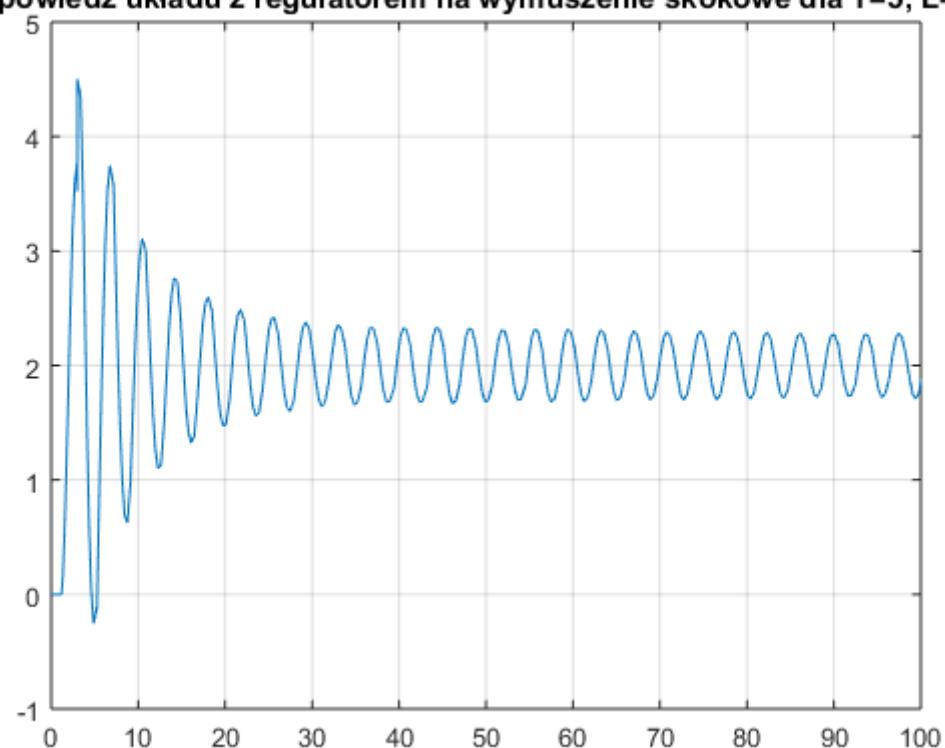
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.01$



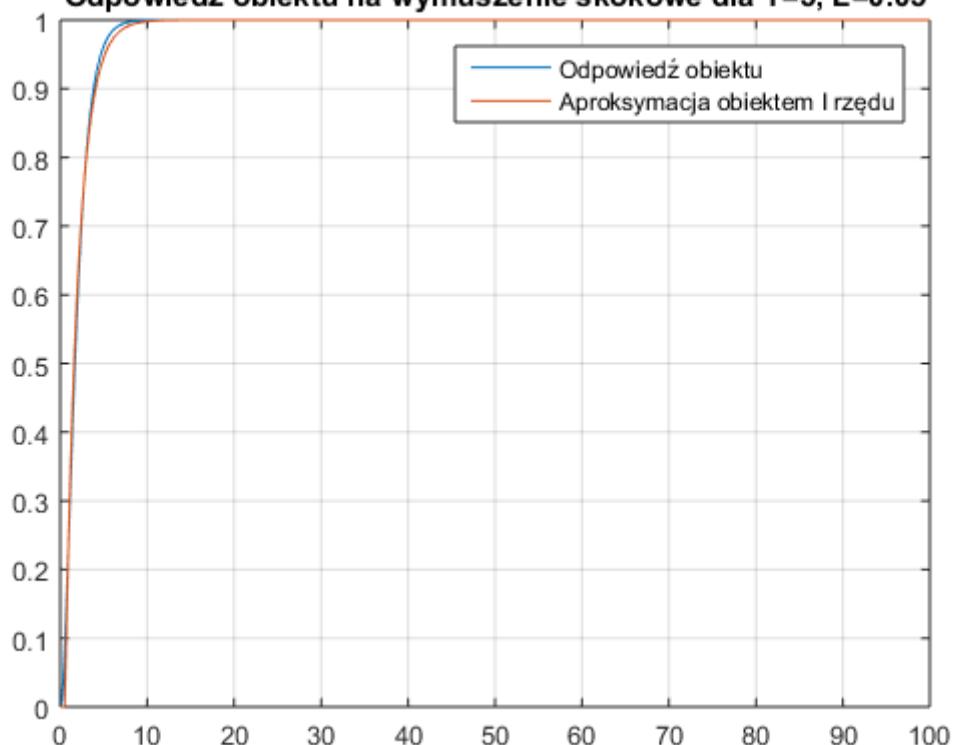
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.02$



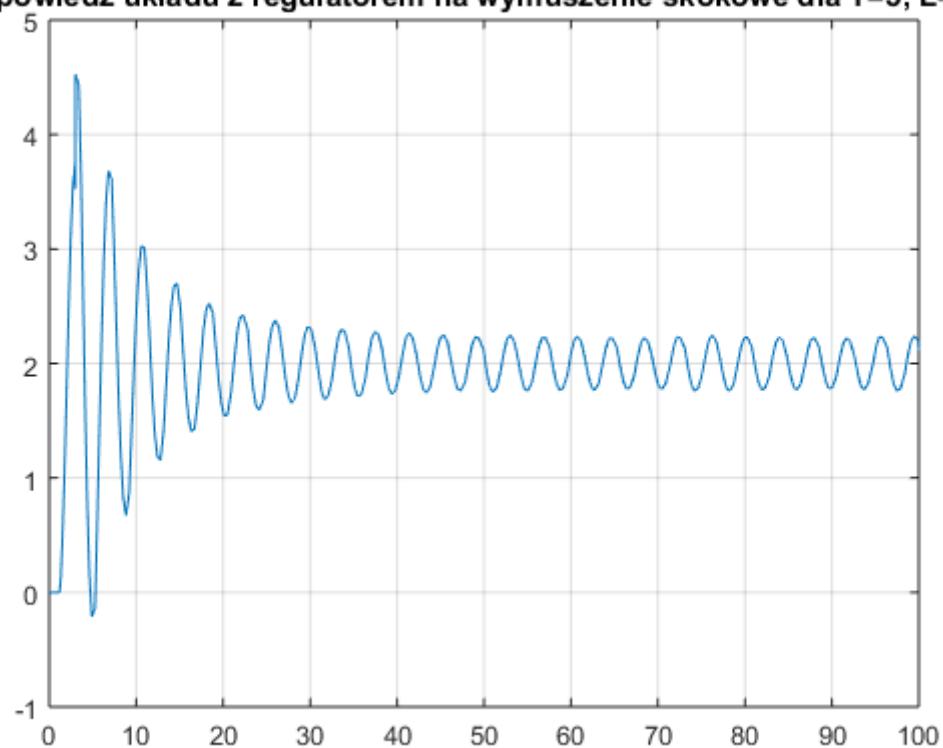
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.02$



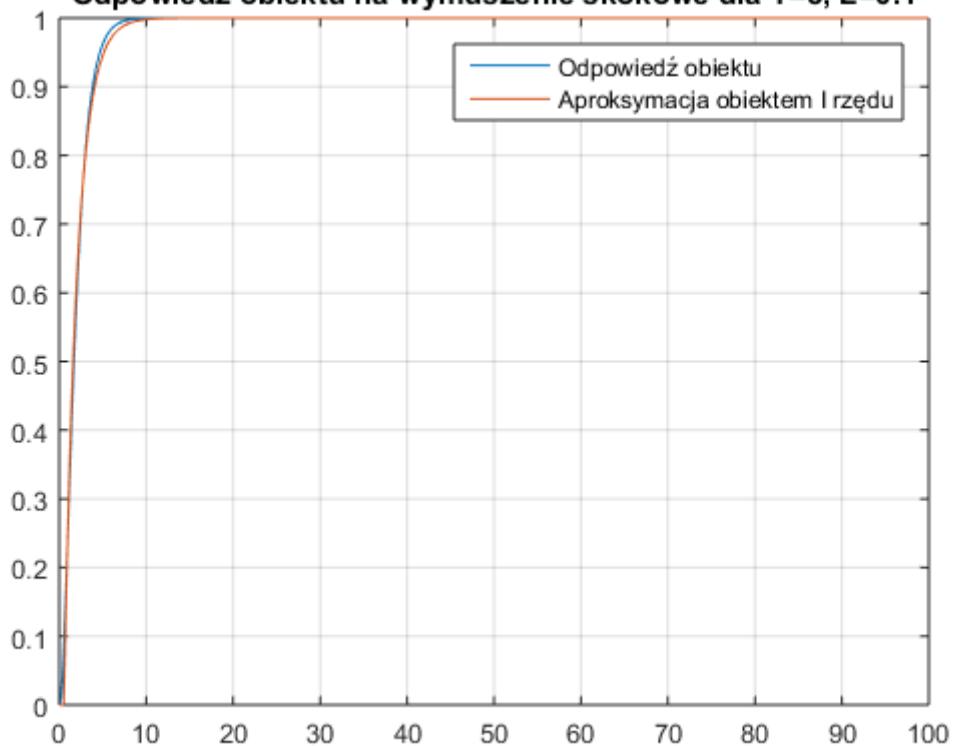
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.05$



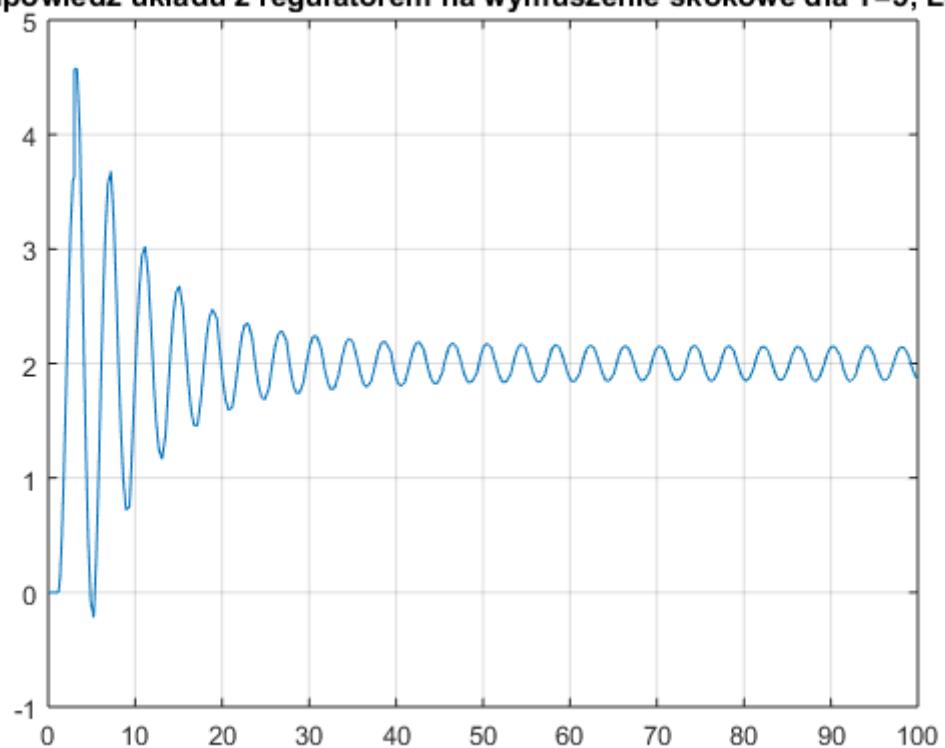
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.05$



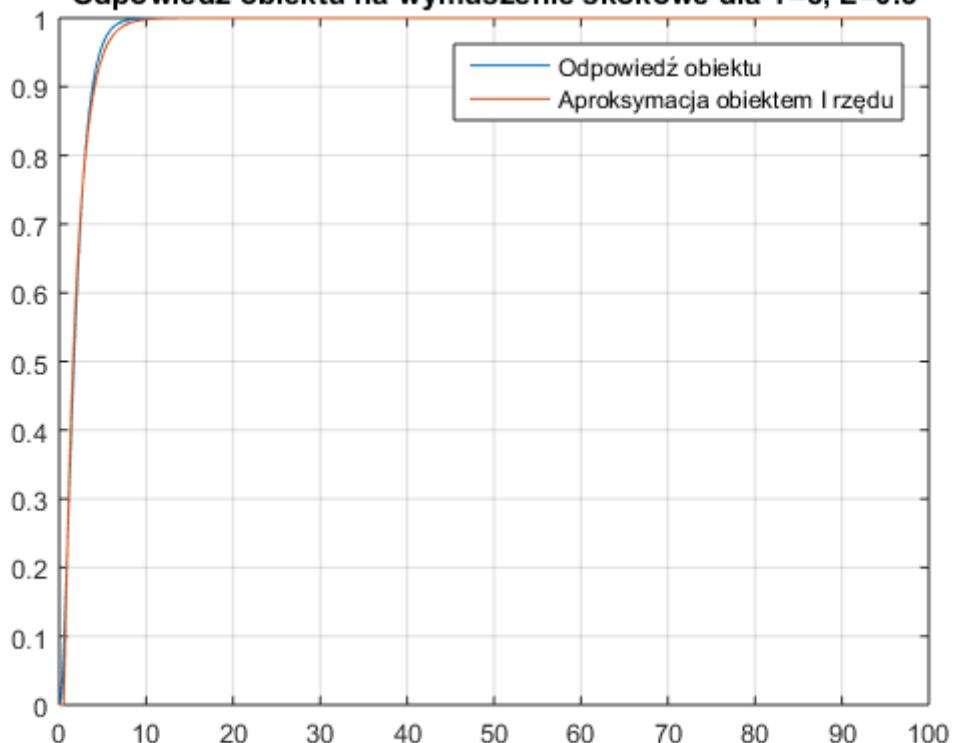
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.1$



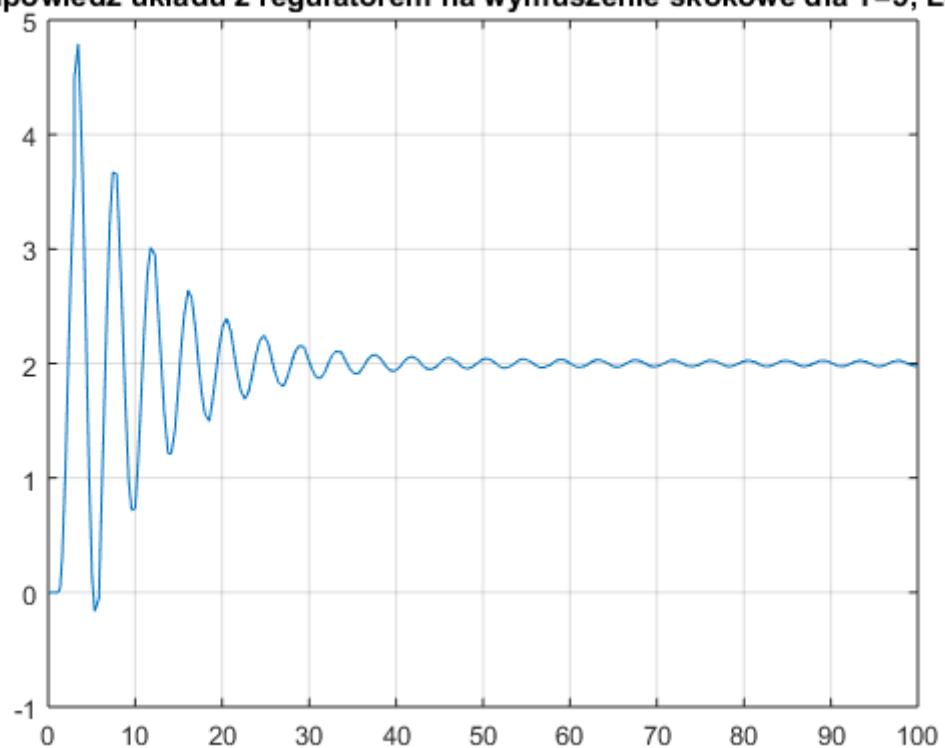
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.1$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.3$



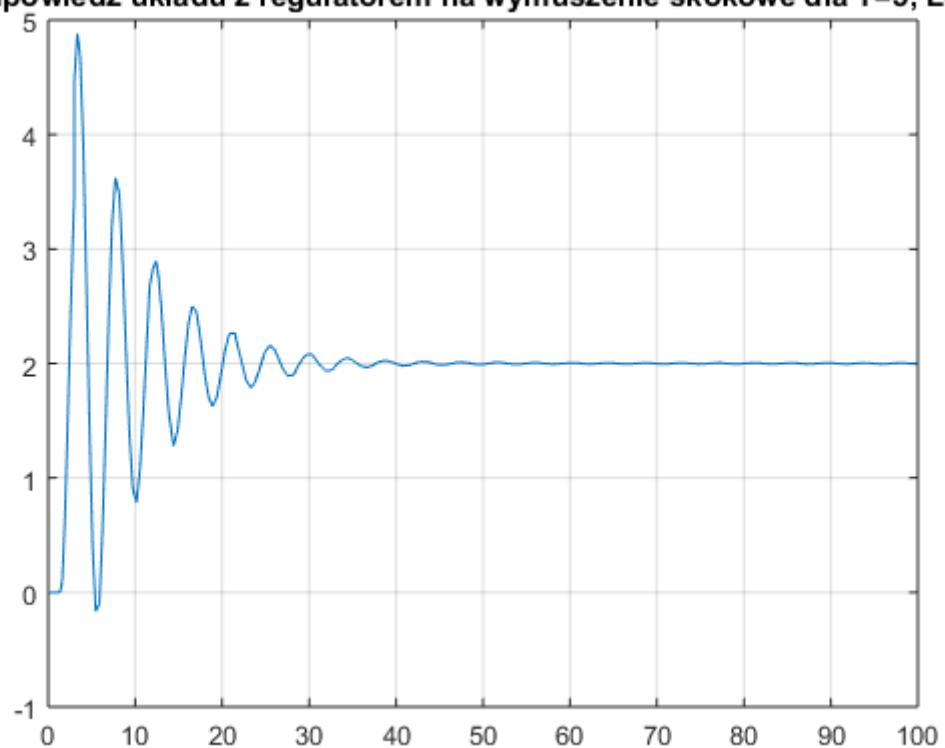
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.3$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.5$



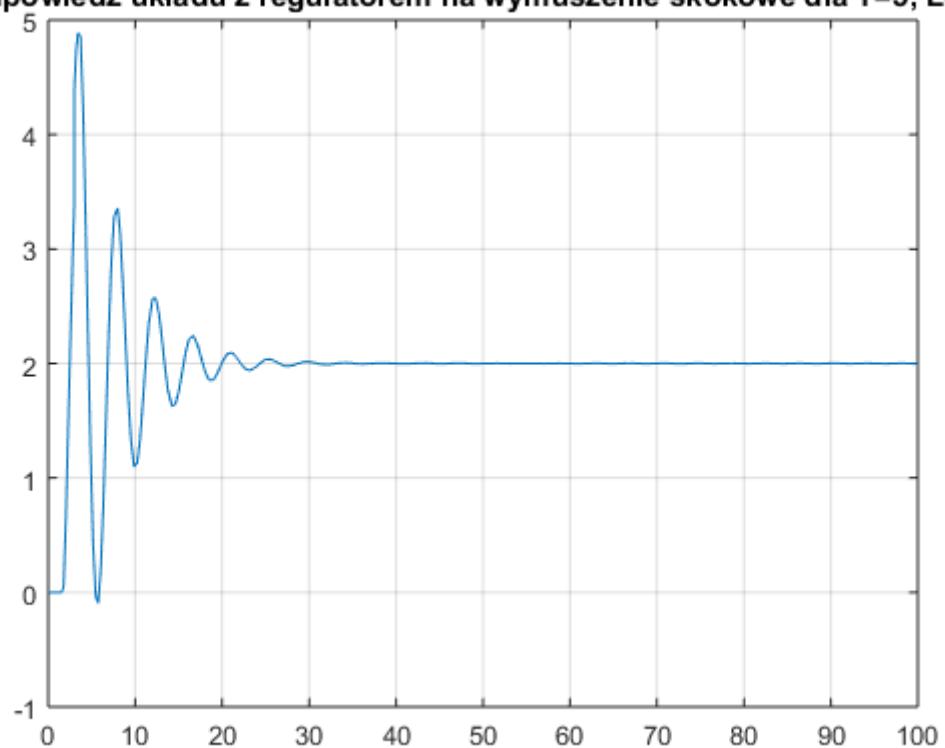
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.5$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.7$



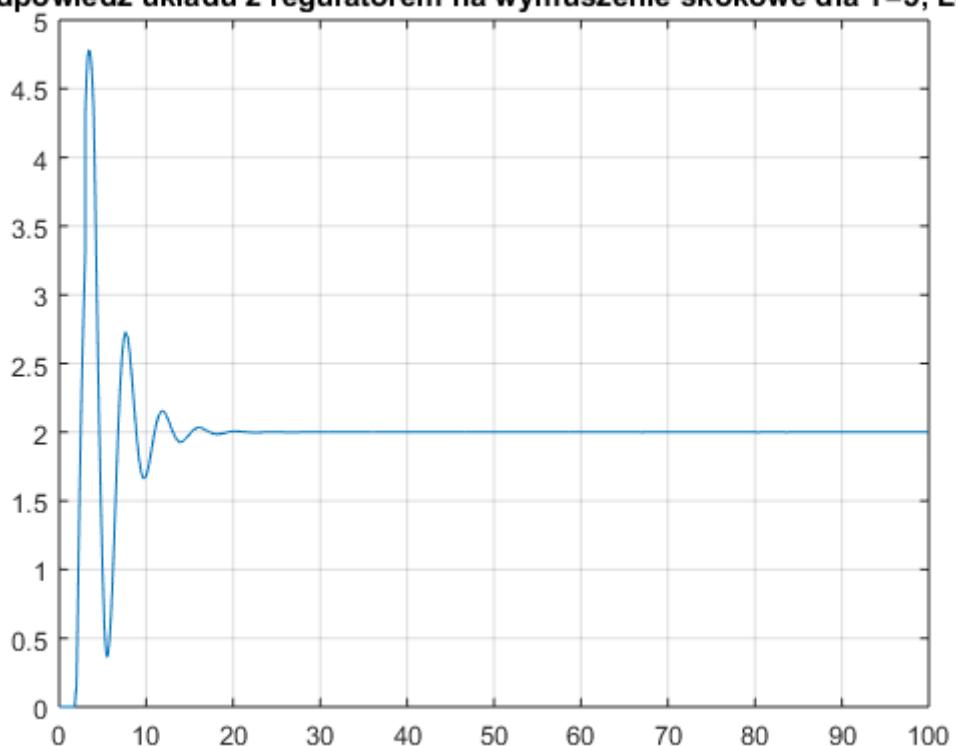
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.7$



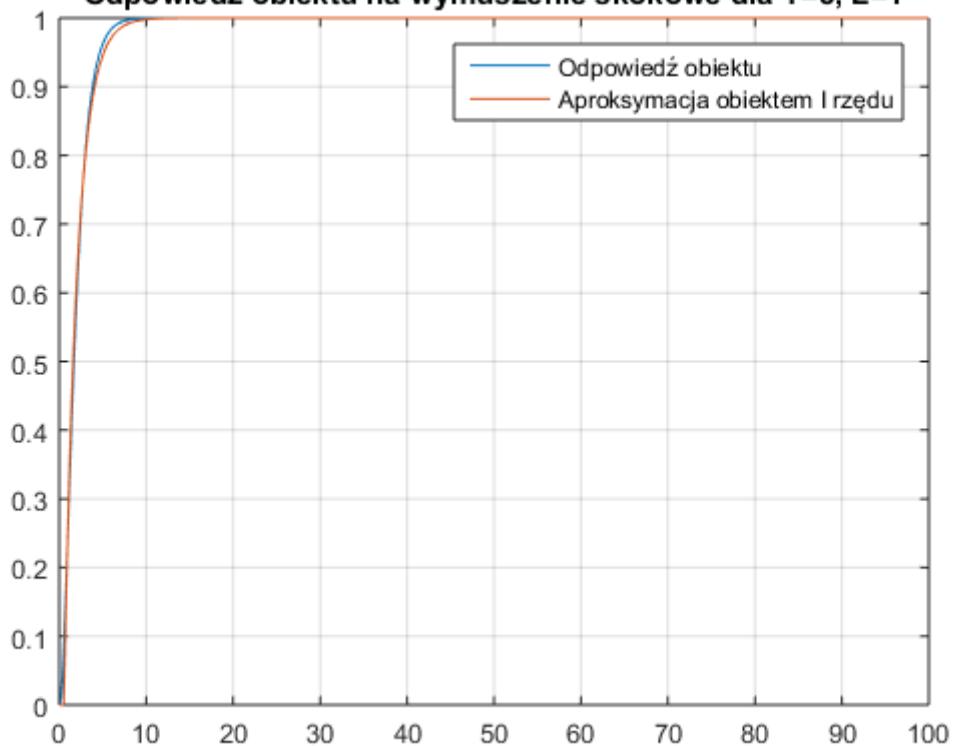
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.9$



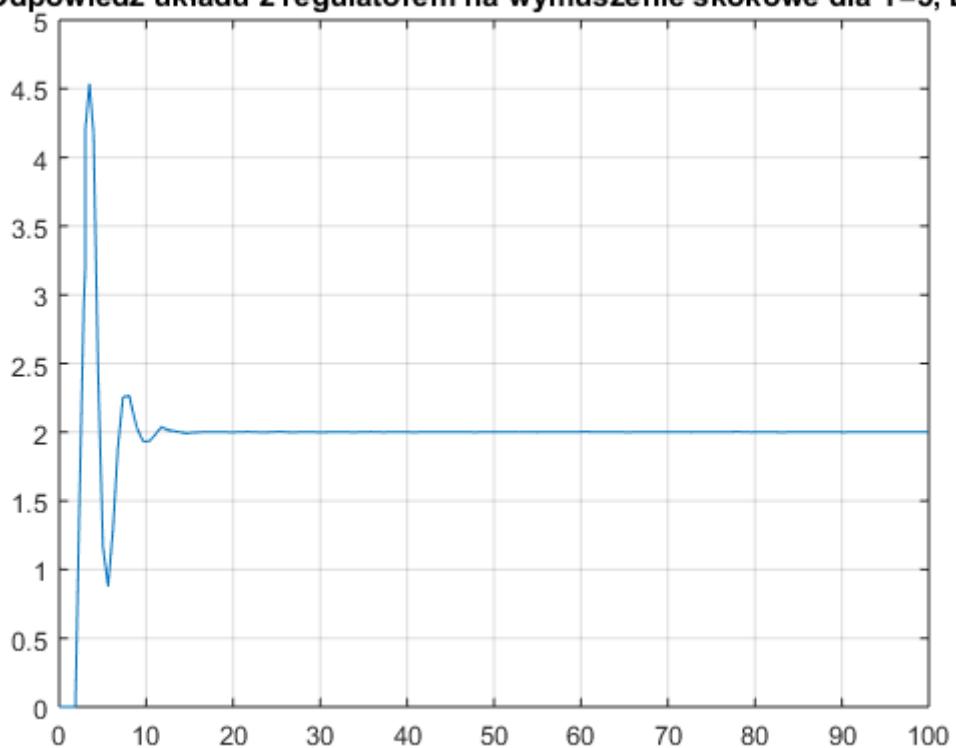
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=0.9$

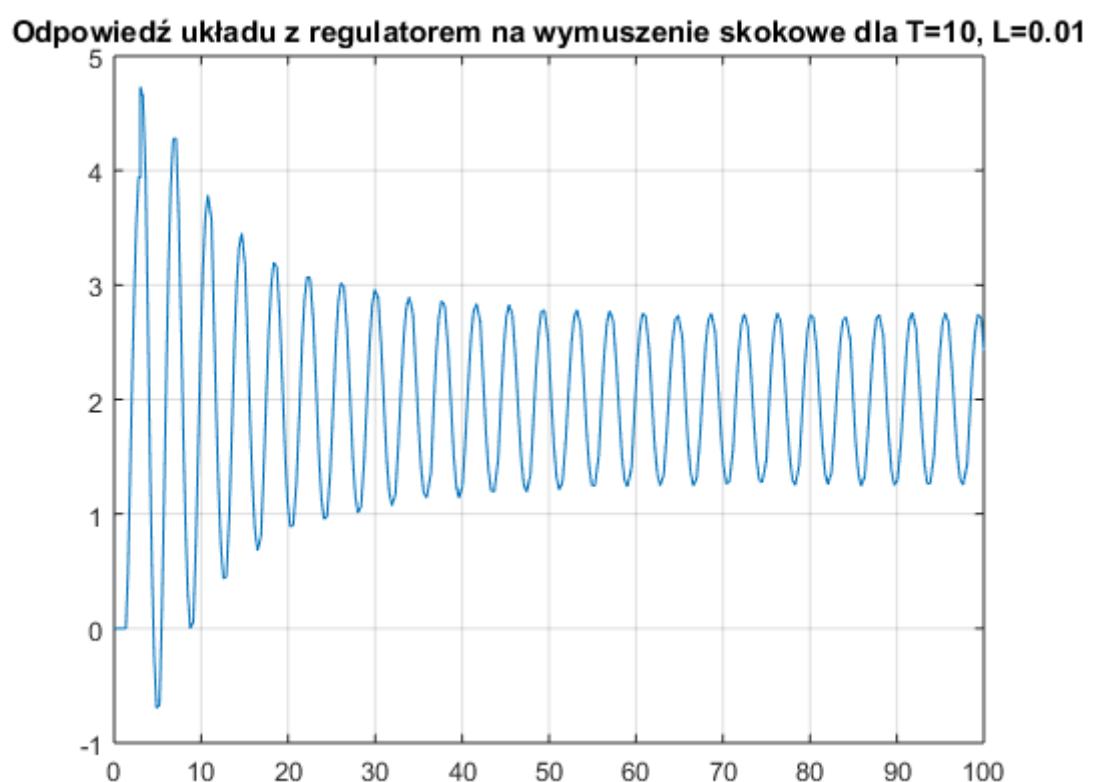
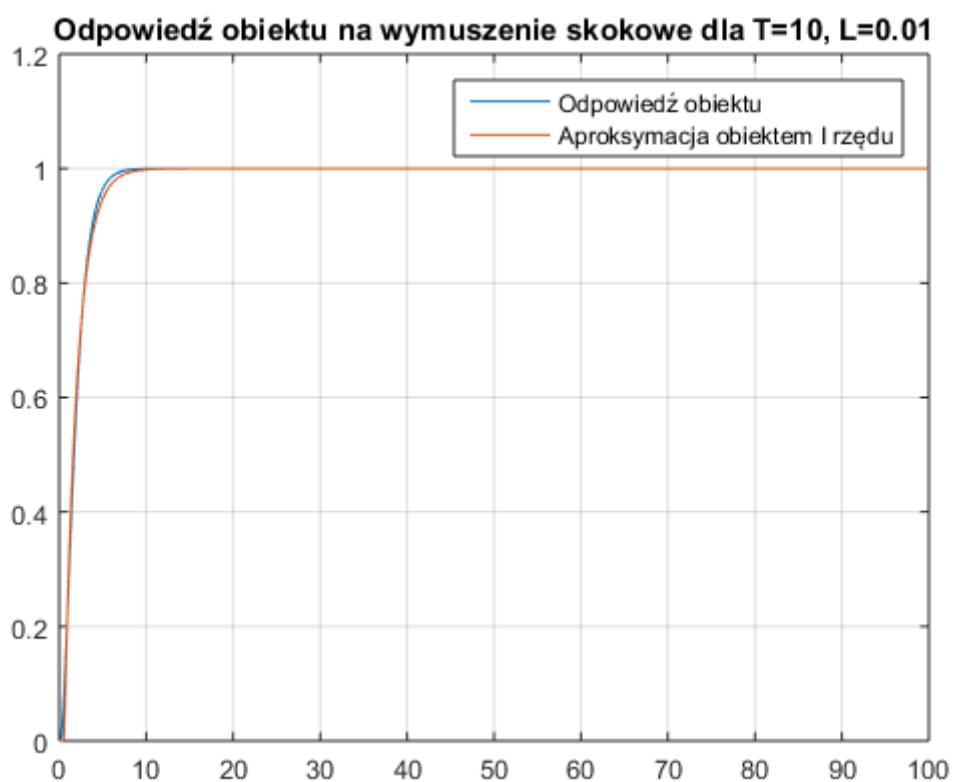


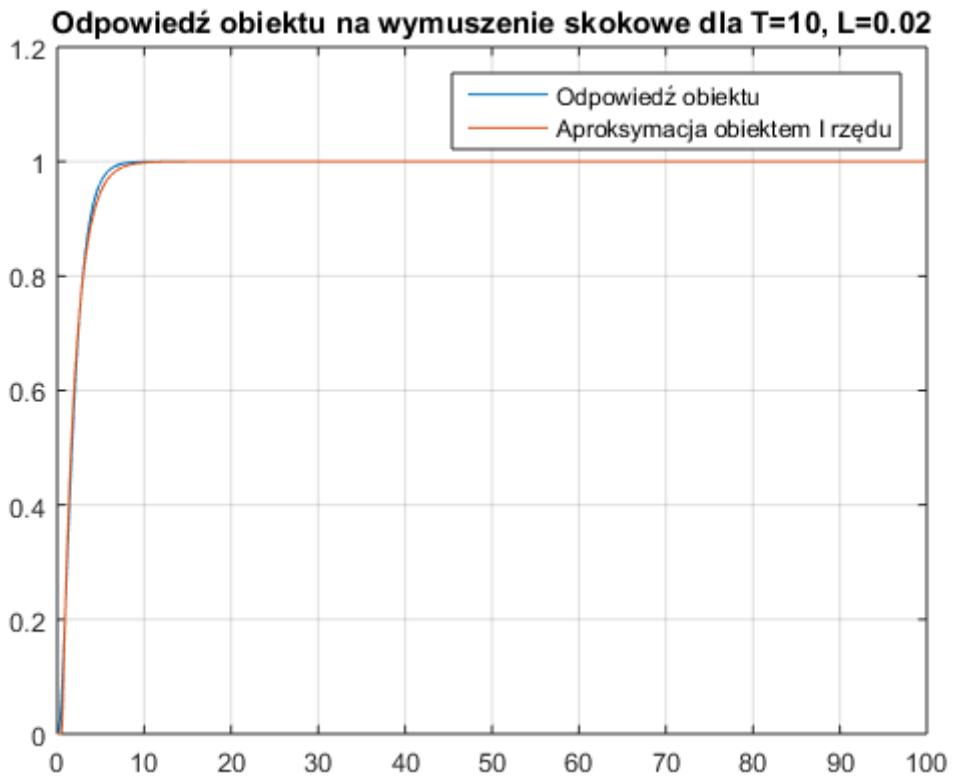
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=1$

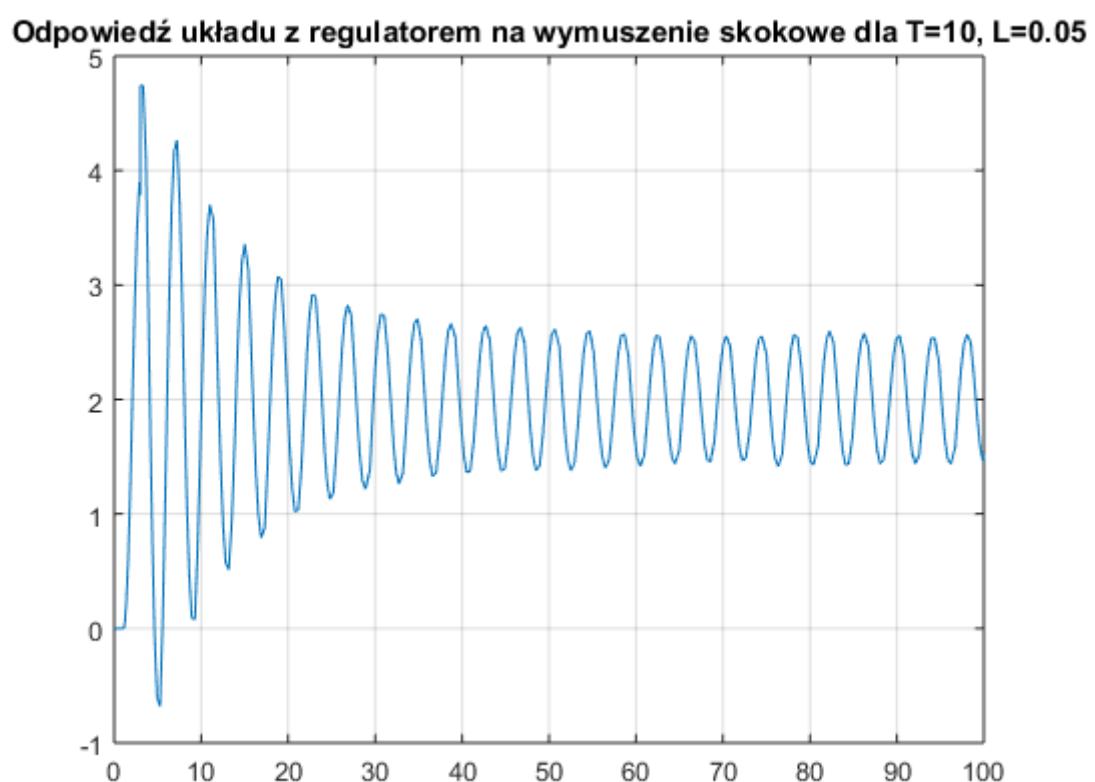
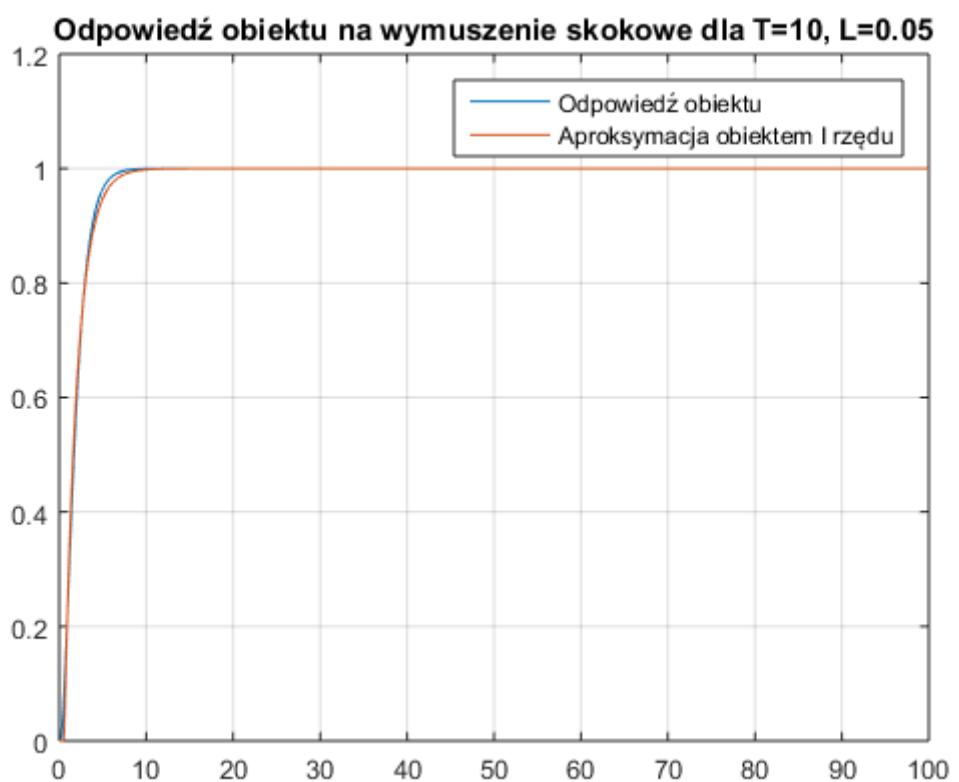


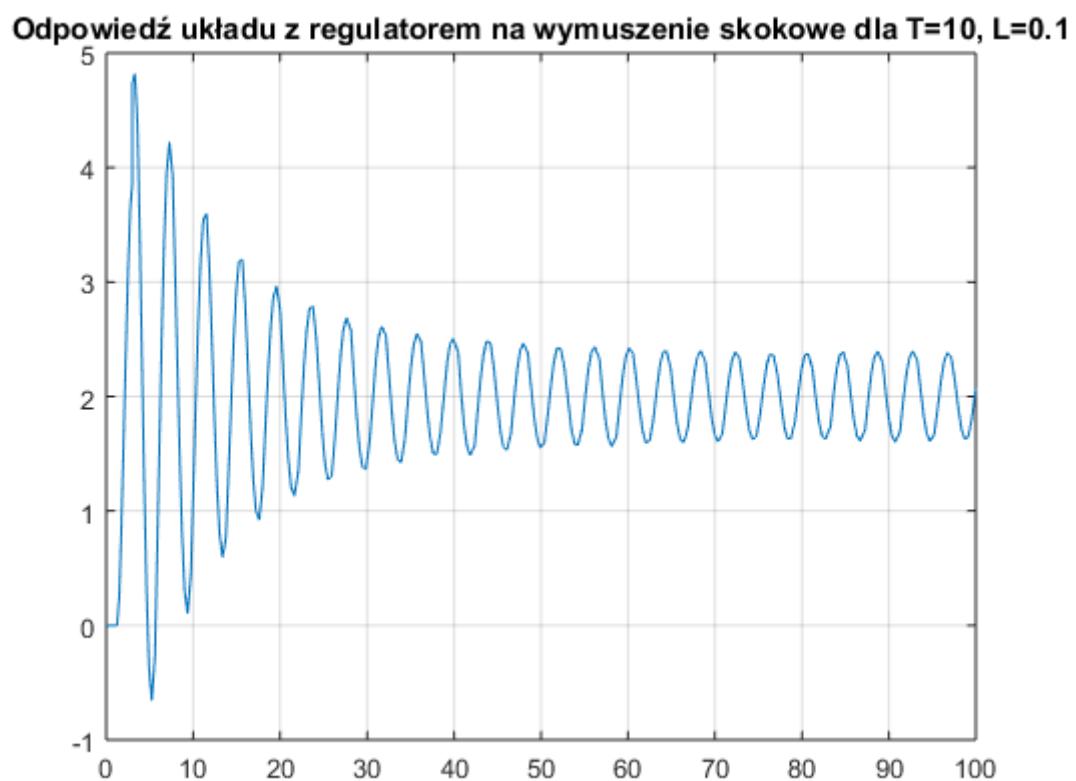
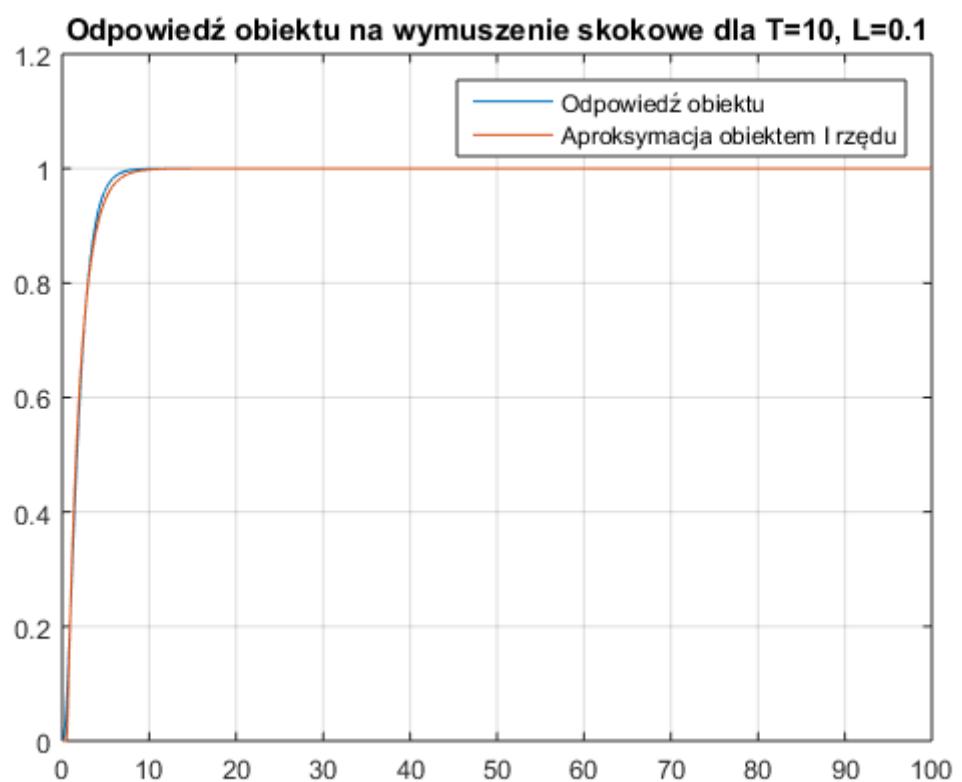
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T=5$, $L=1$

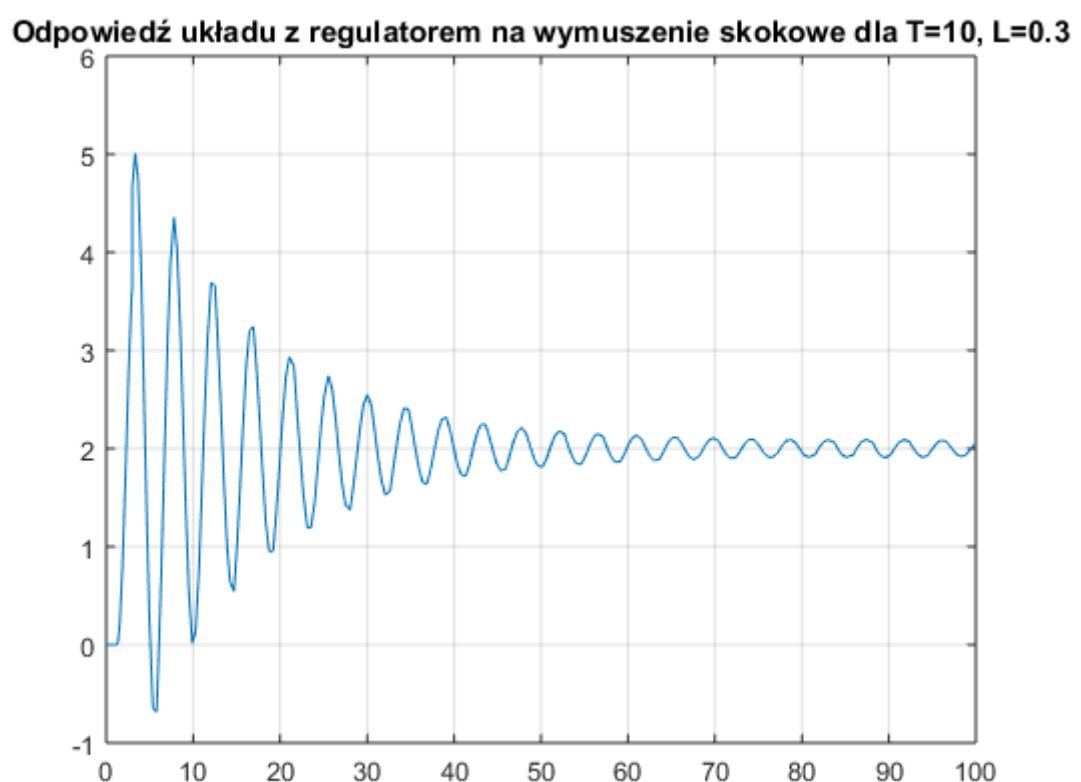
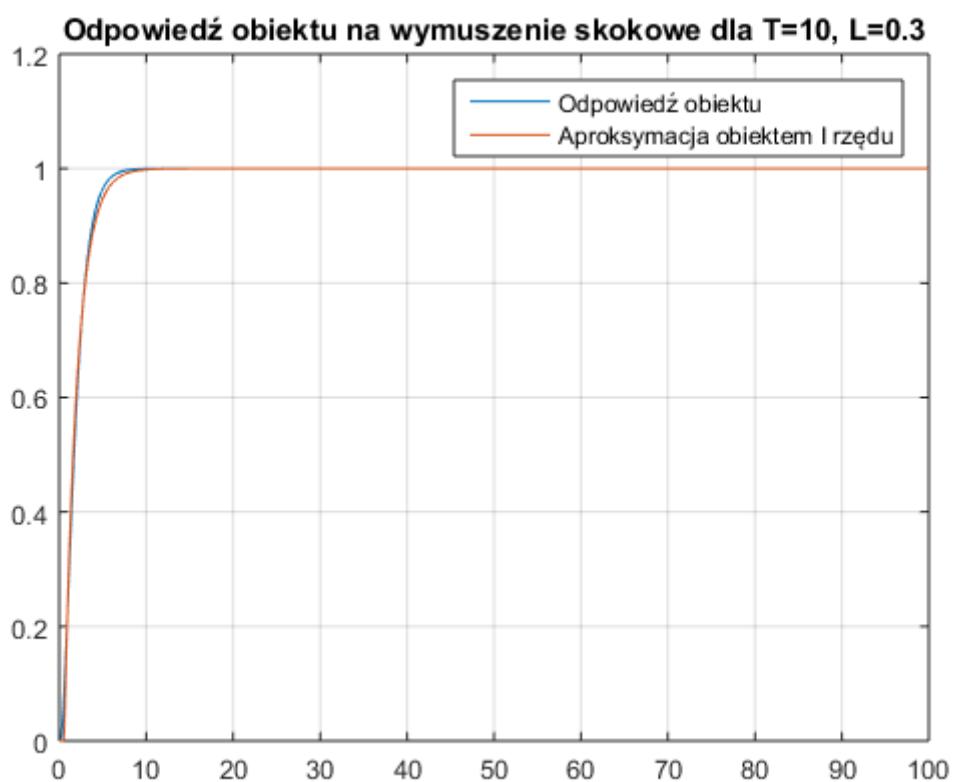


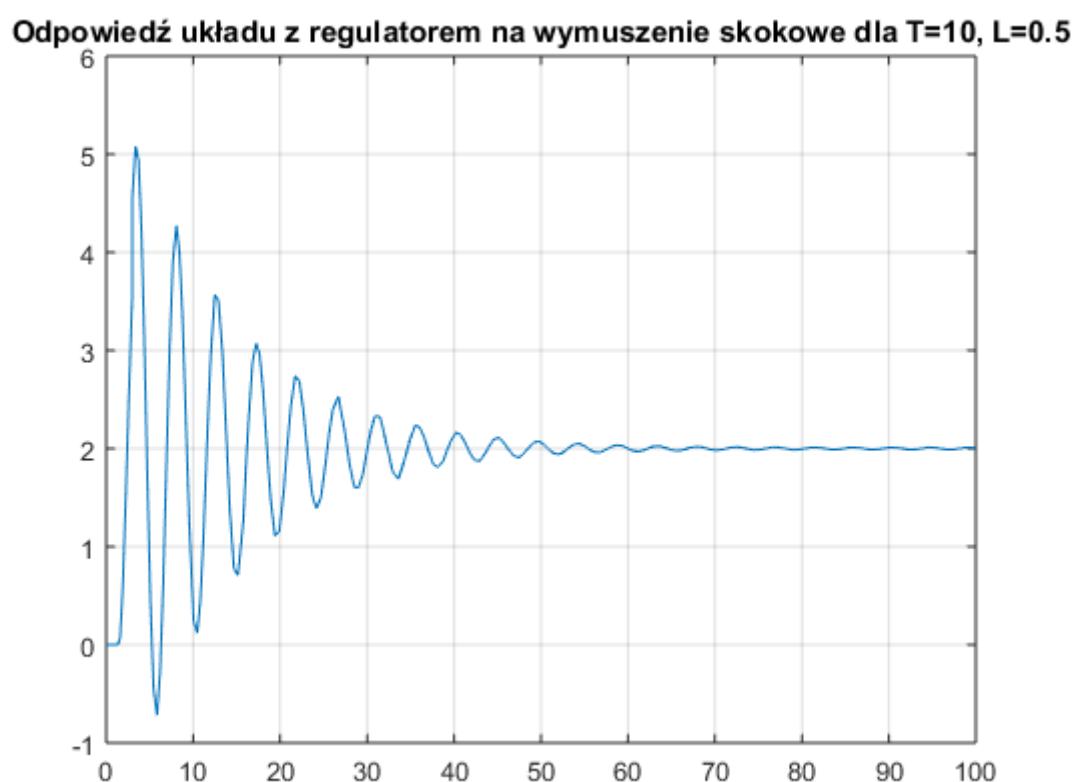
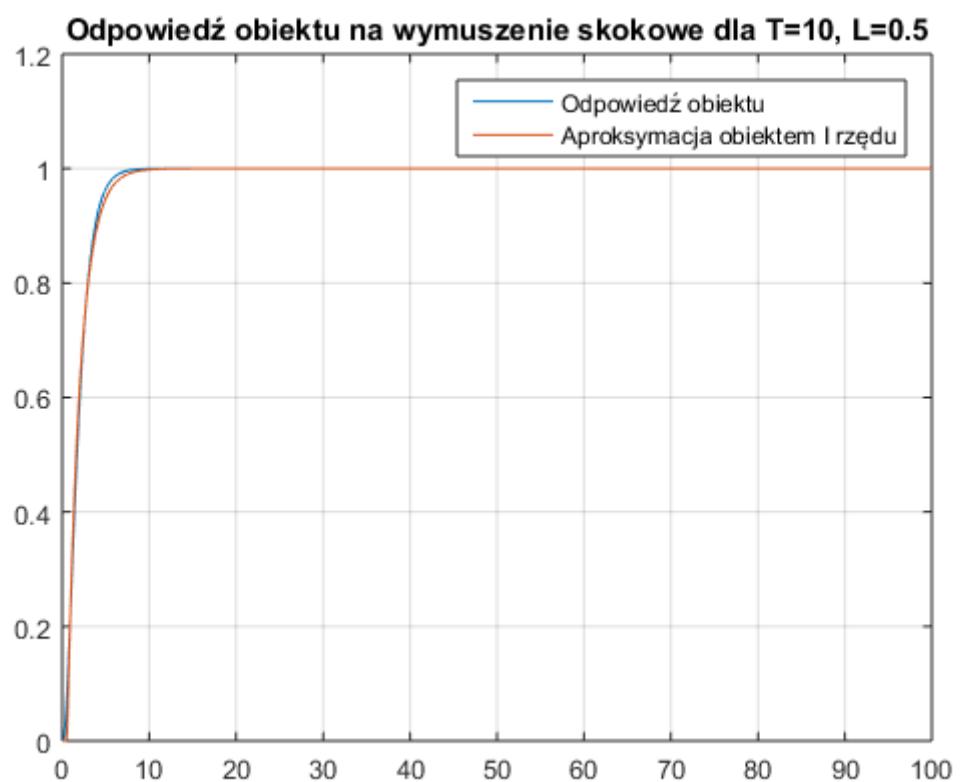


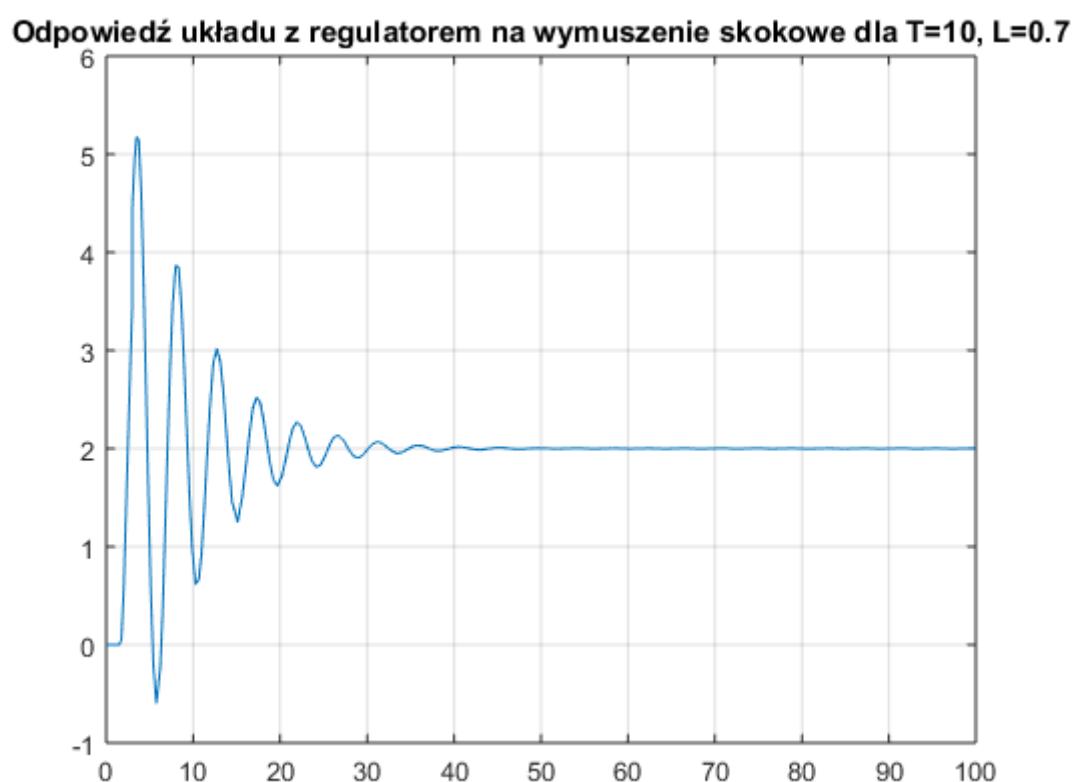
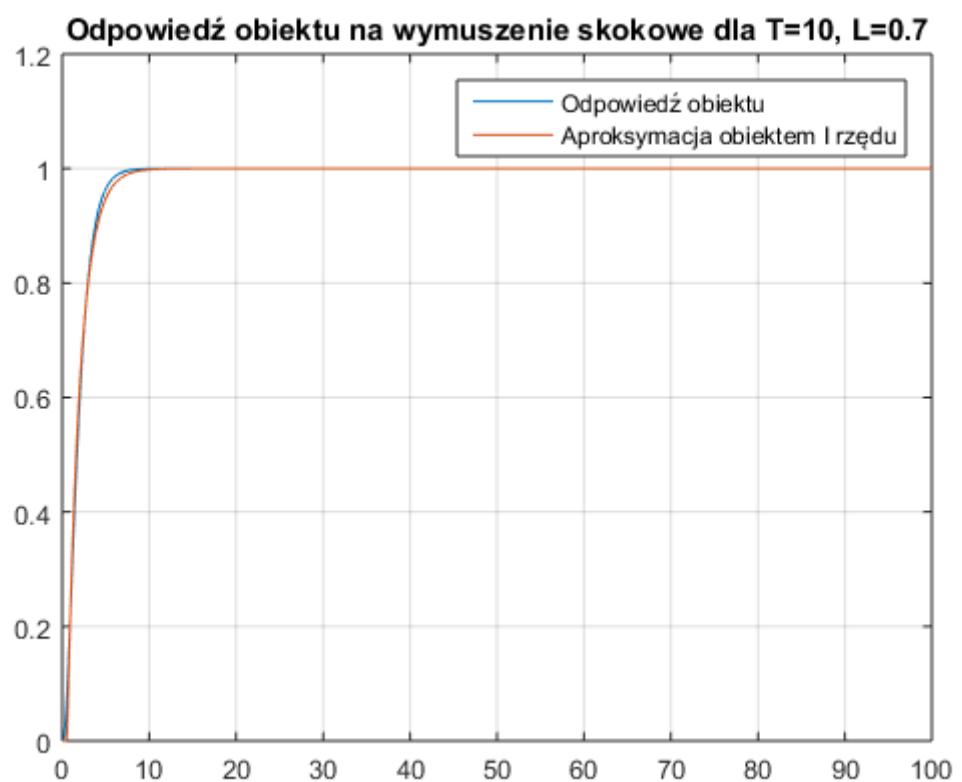


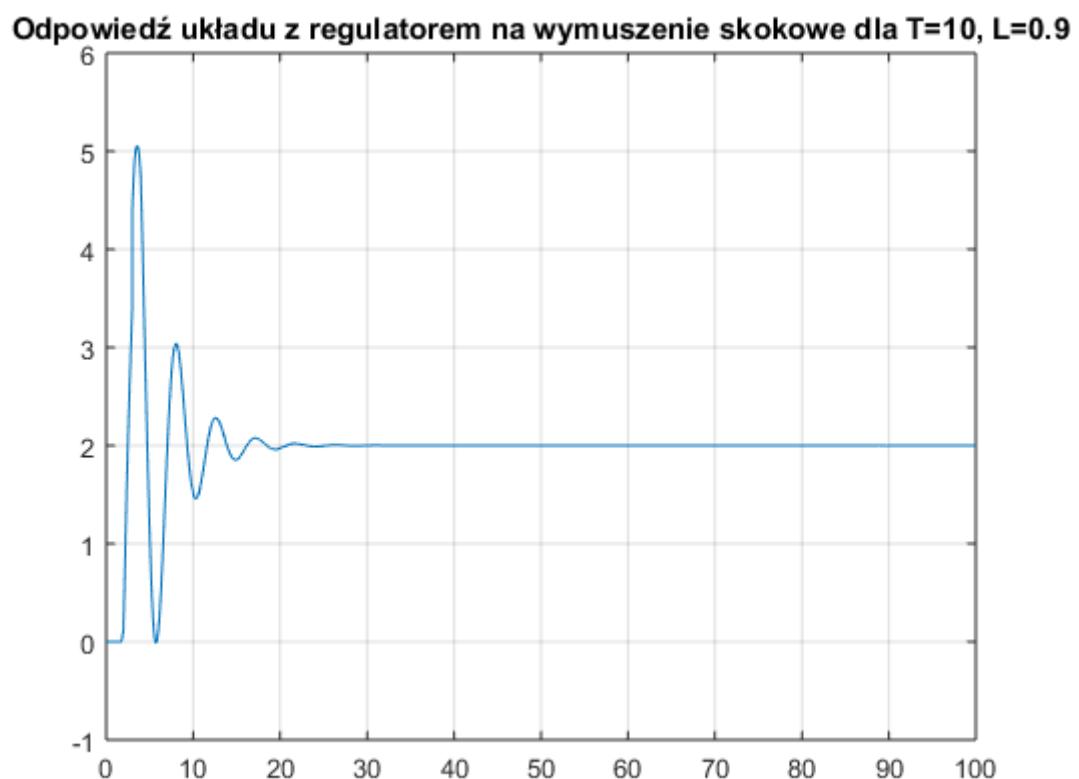
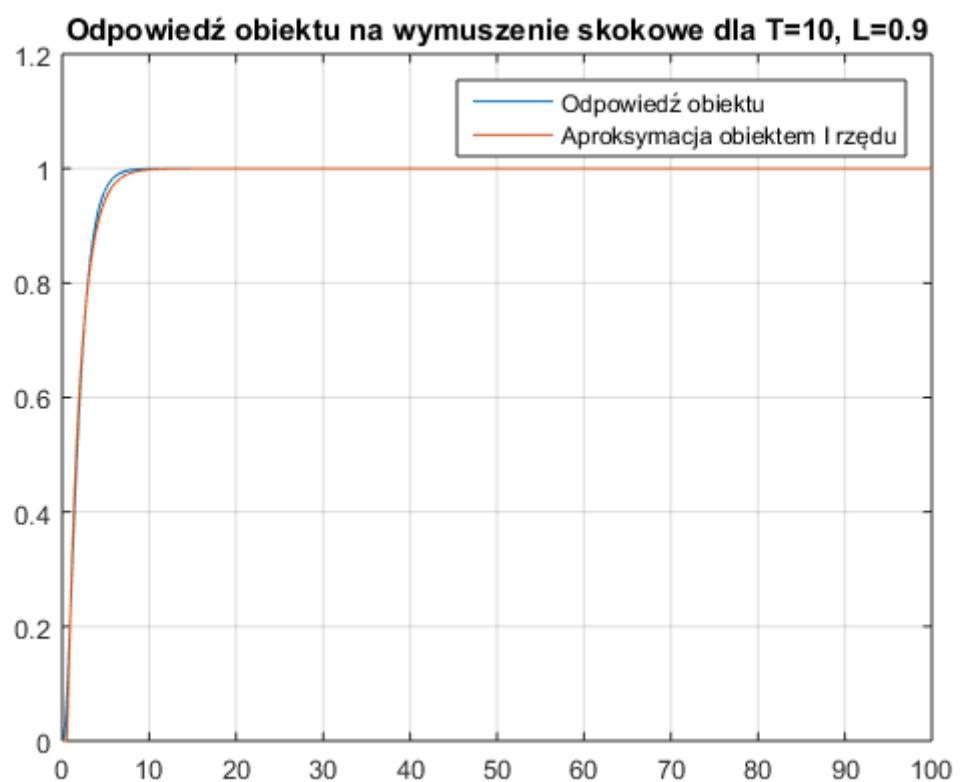


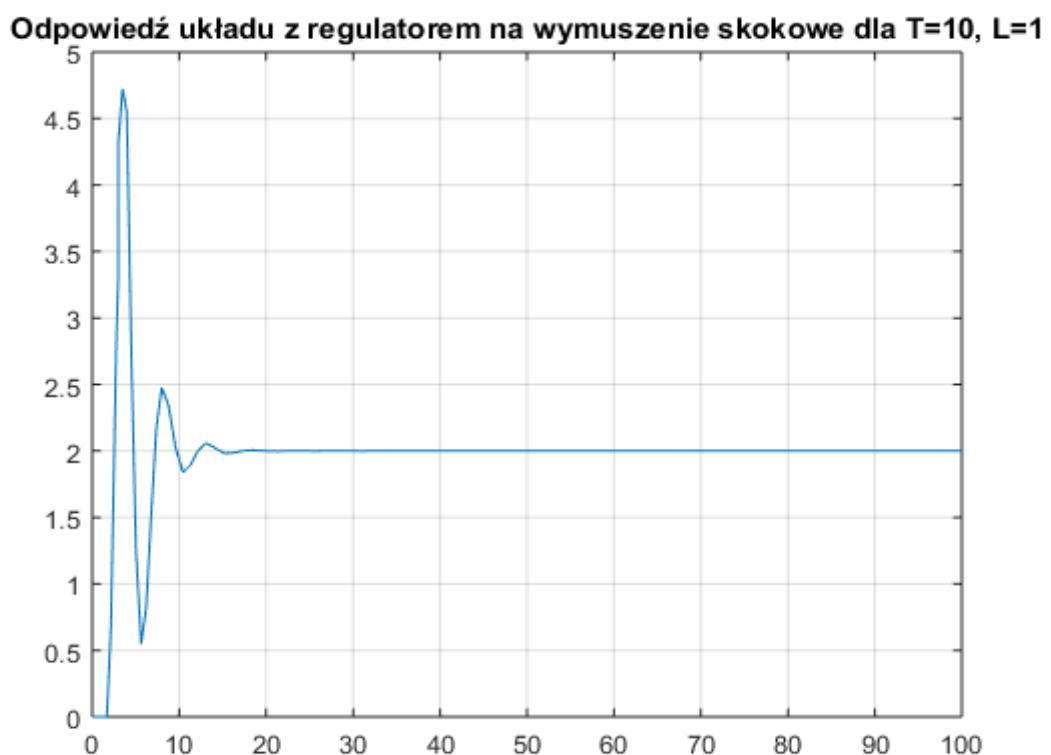
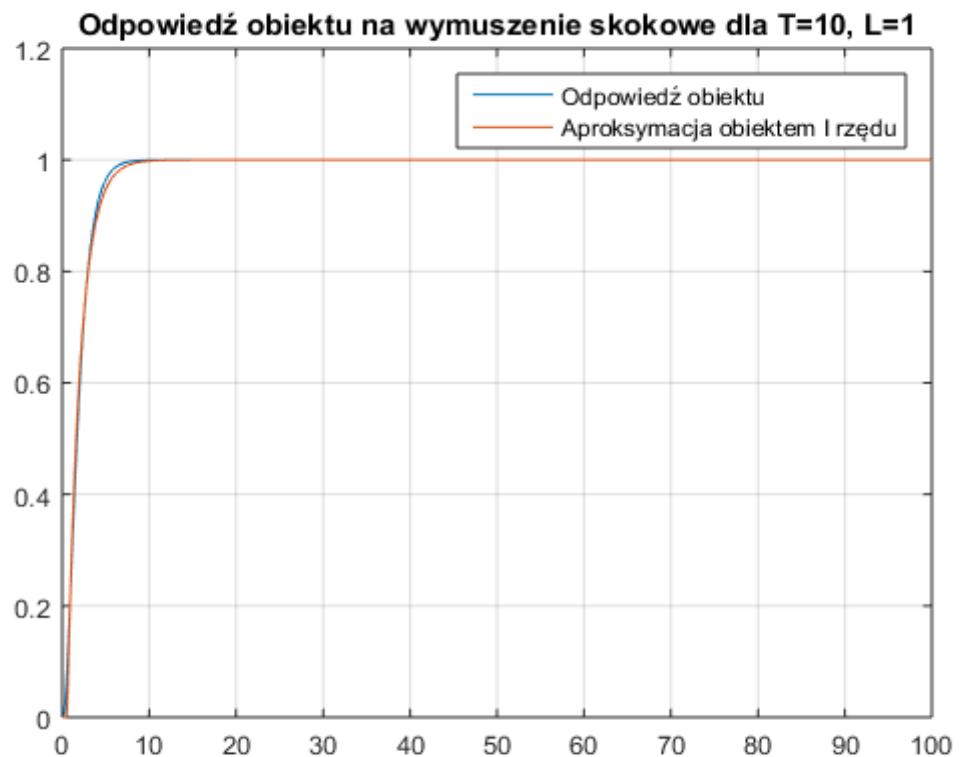












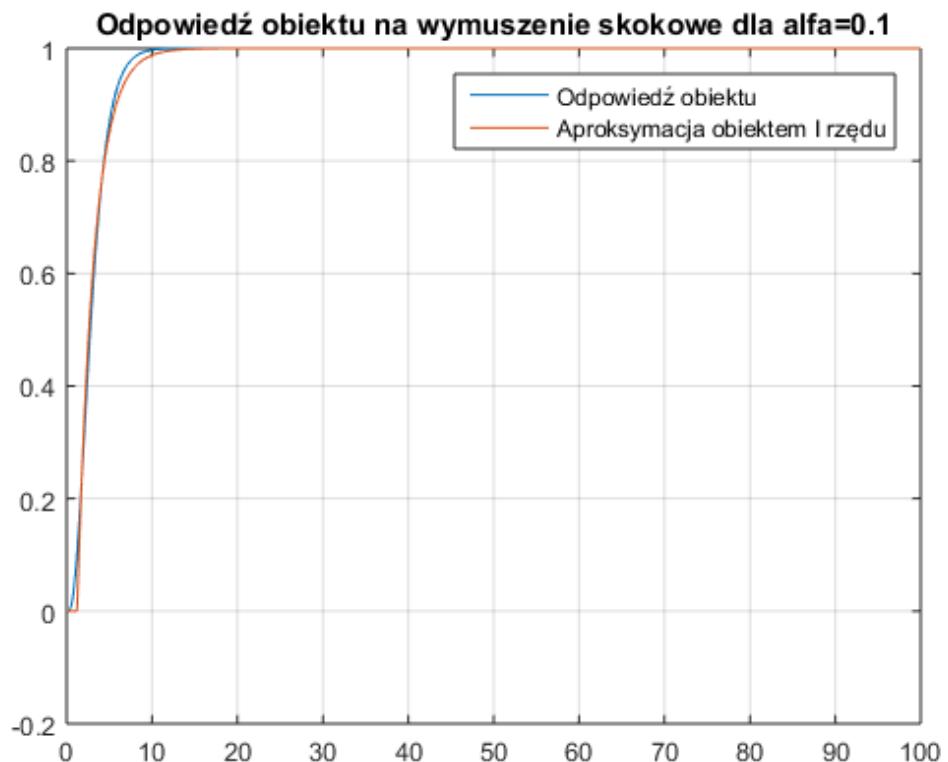
W układzie z regulatorem, zwiększanie późnienia L_1 powoduje zmniejszanie stałej czasowej T_1 , która w naszym obiekcie jest stała. Dla $L_1 = 1$ stała czasowa $T_1 = 0$, co powoduje, że zwiększanie opóźnienia zmniejsza oscylację odpowiedzi. Można również zauważyć, że zwiększanie stałej czasowej T powoduje zwiększenie oscylacji przy małej wartości opóźnienia L_1 , regulator kompensuje początkowo duże przeregulowania, lecz oscylacje pozostają za wyjątkiem gdy opóźnienie $L_1 = 1$.

11. Symulacje dla obiektu G_8 .

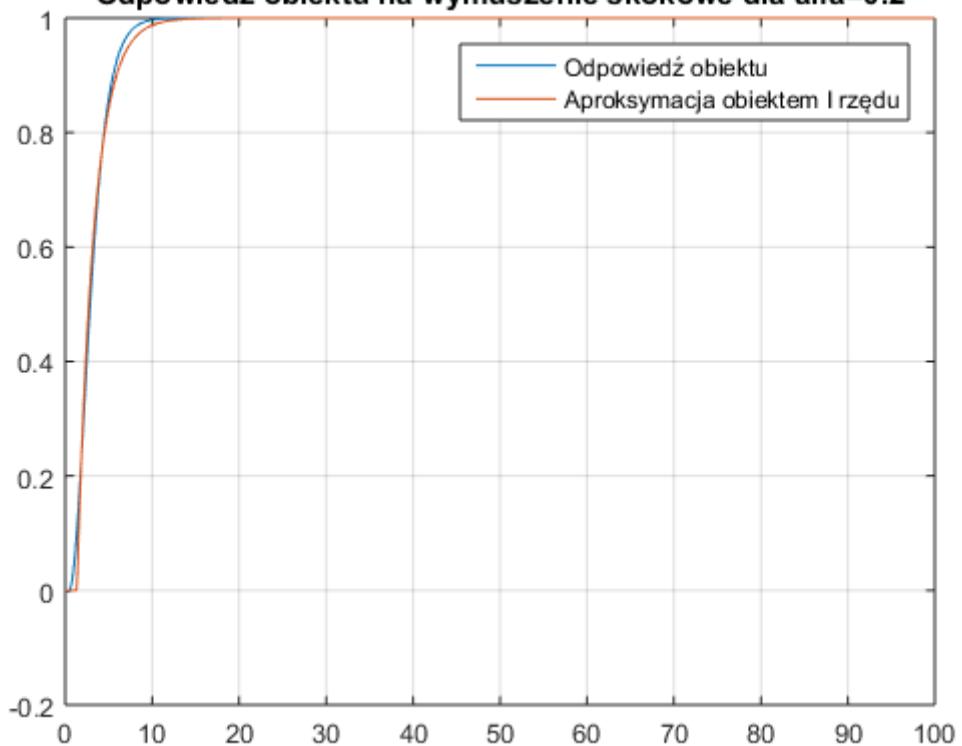
$$G_8 = \frac{1 - \alpha s}{(s + 1)^3}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając parametr α w następujący sposób:

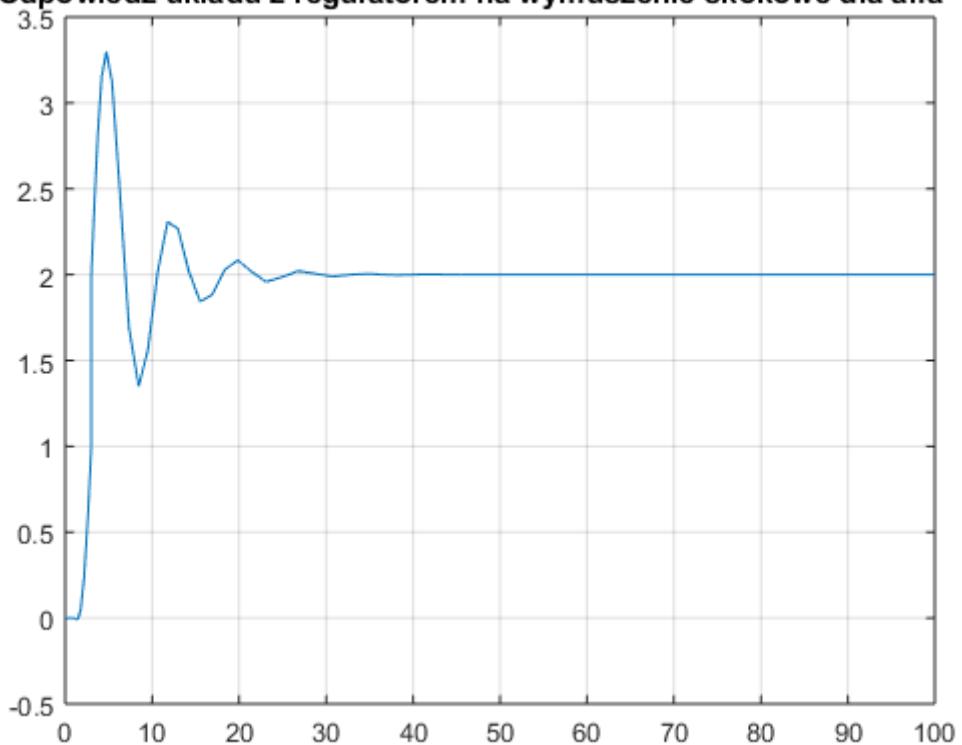
$\alpha = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1$



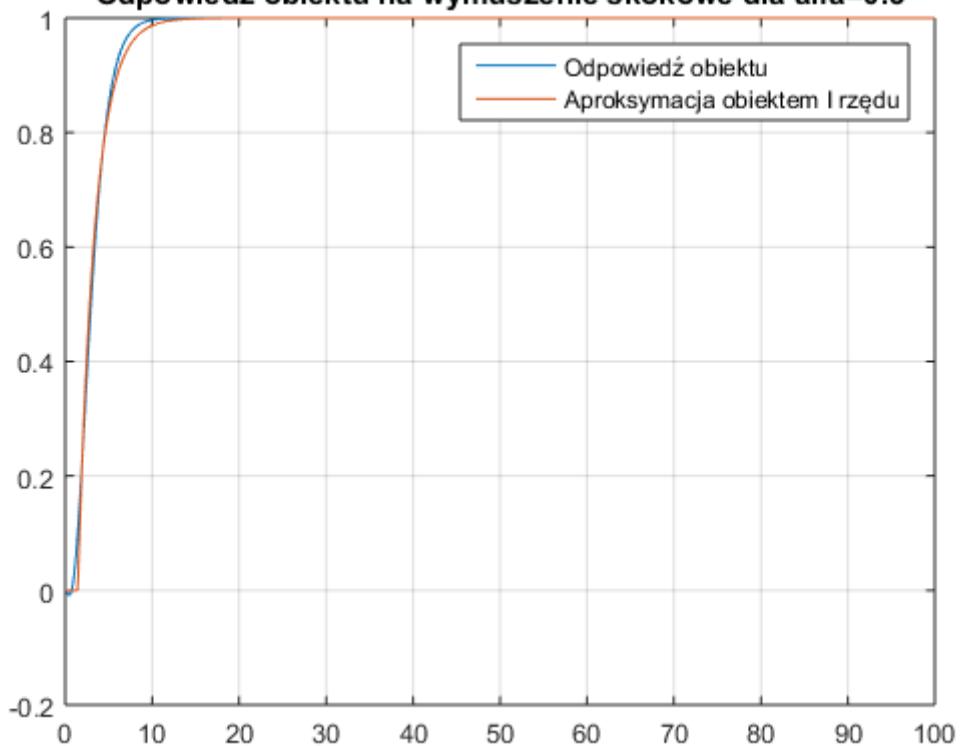
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.2



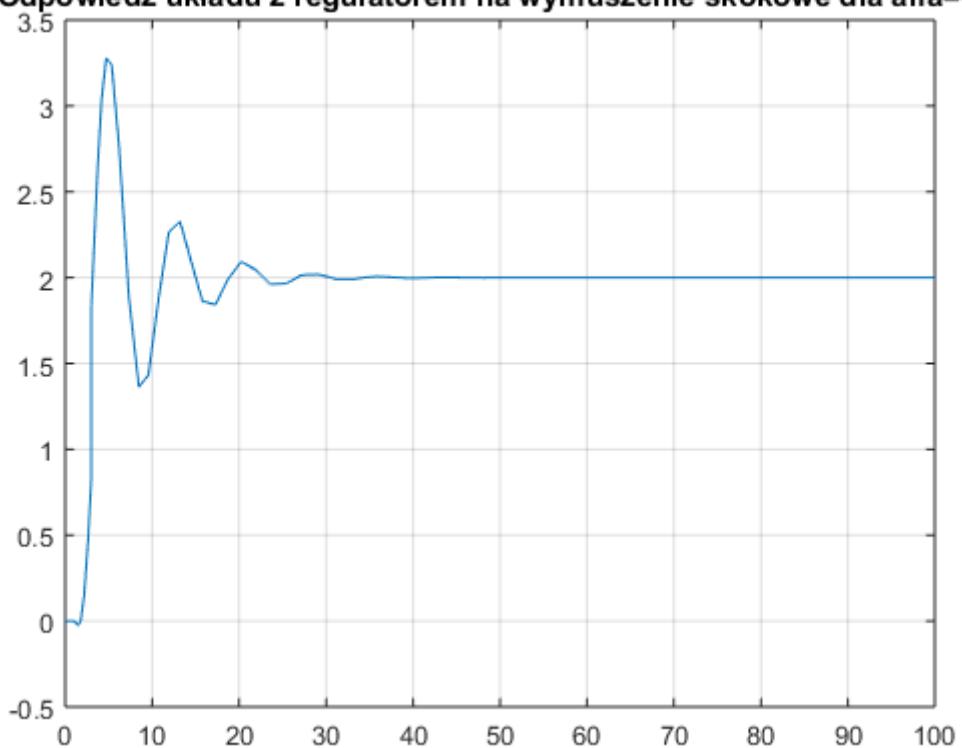
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.2



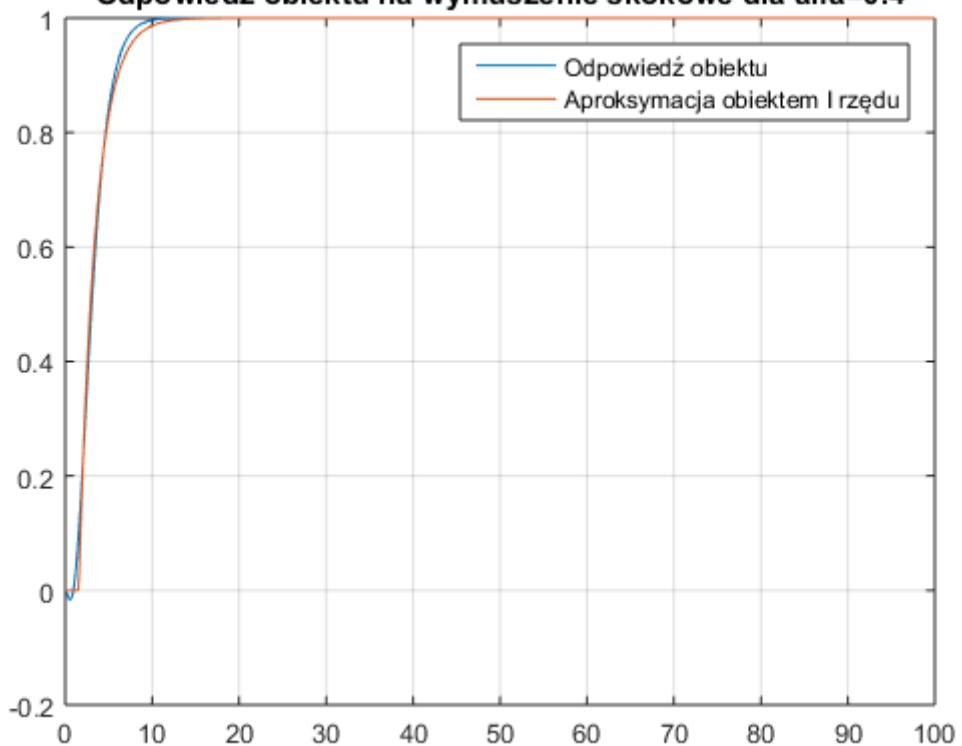
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.3



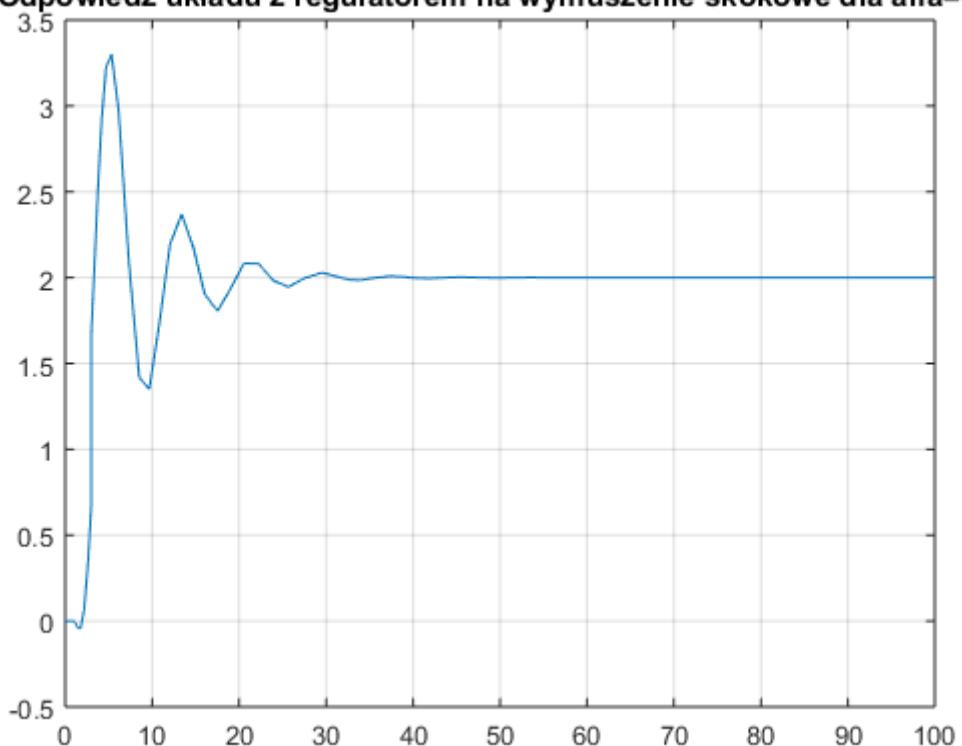
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.3



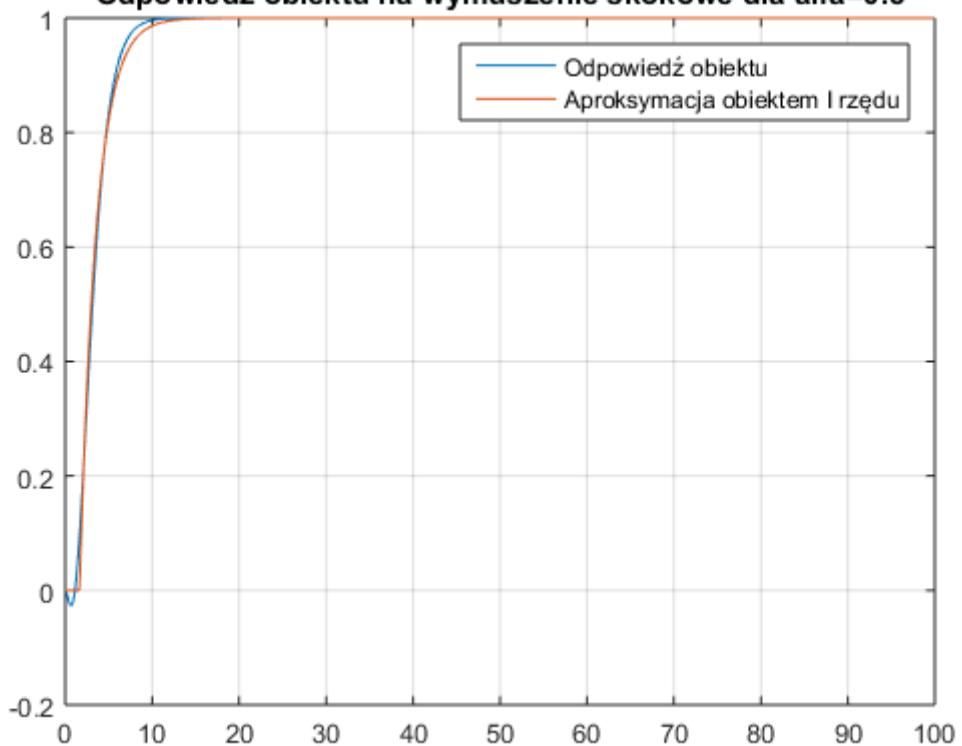
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.4



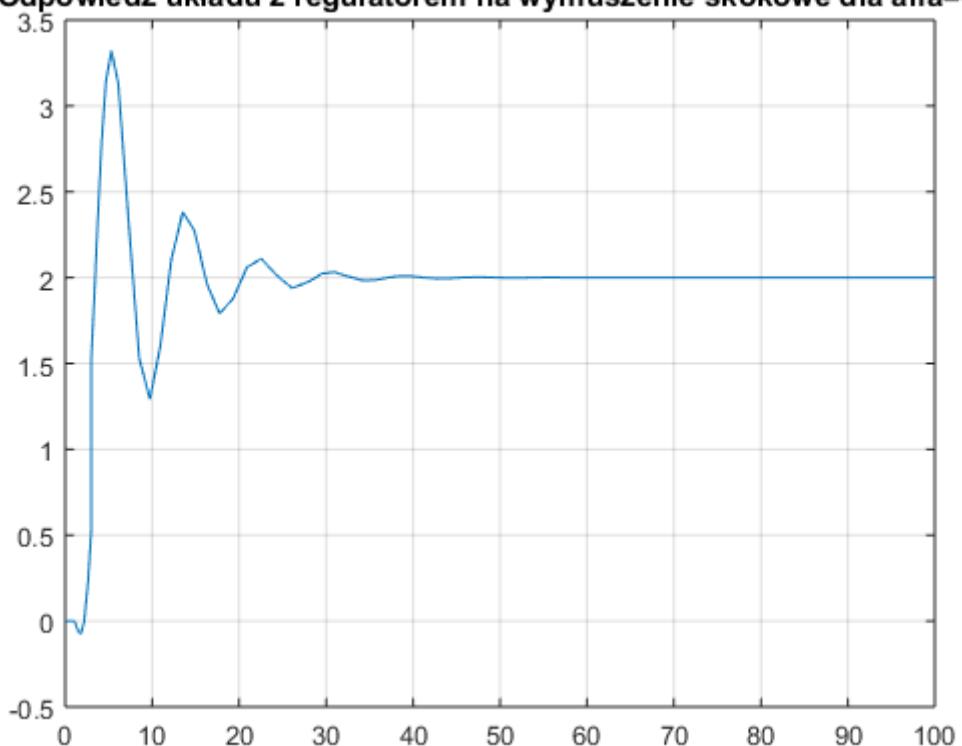
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.4



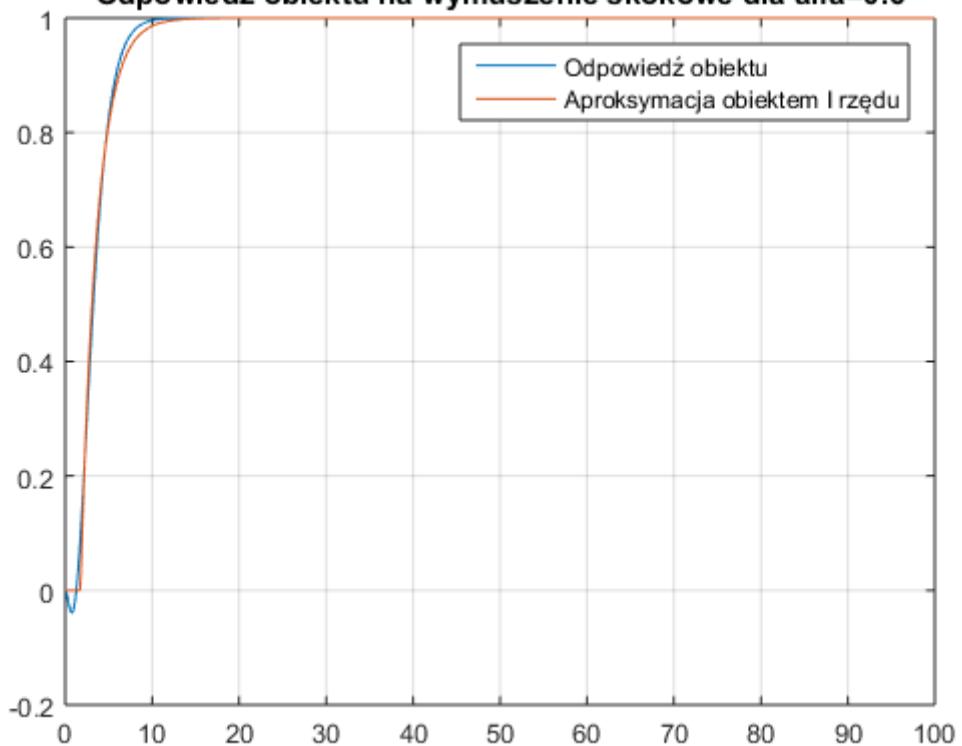
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.5



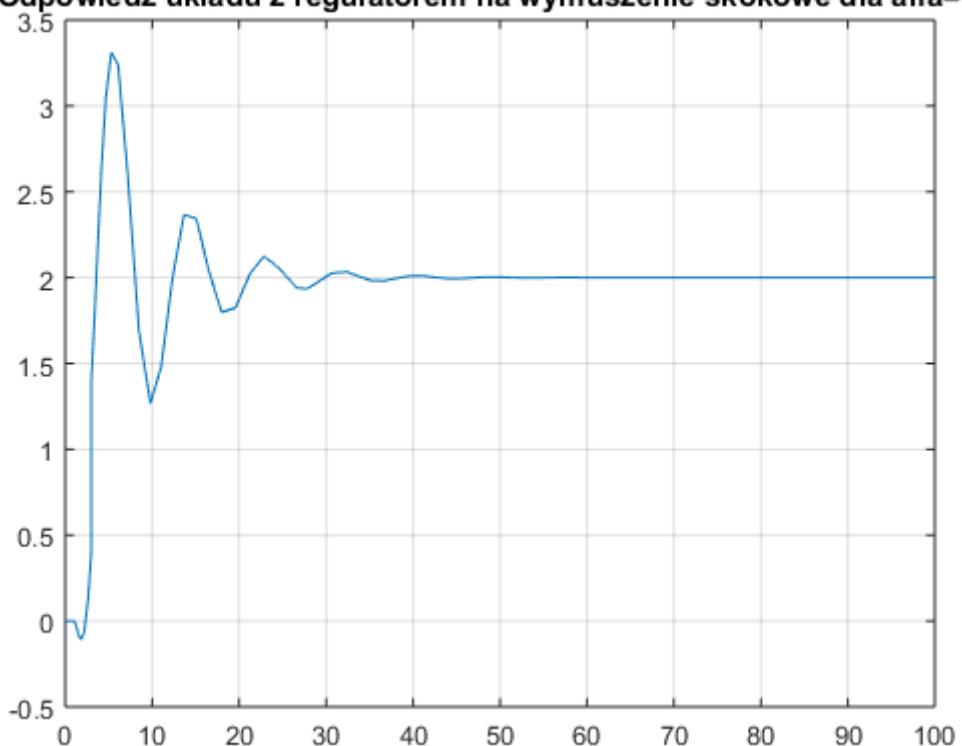
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.5



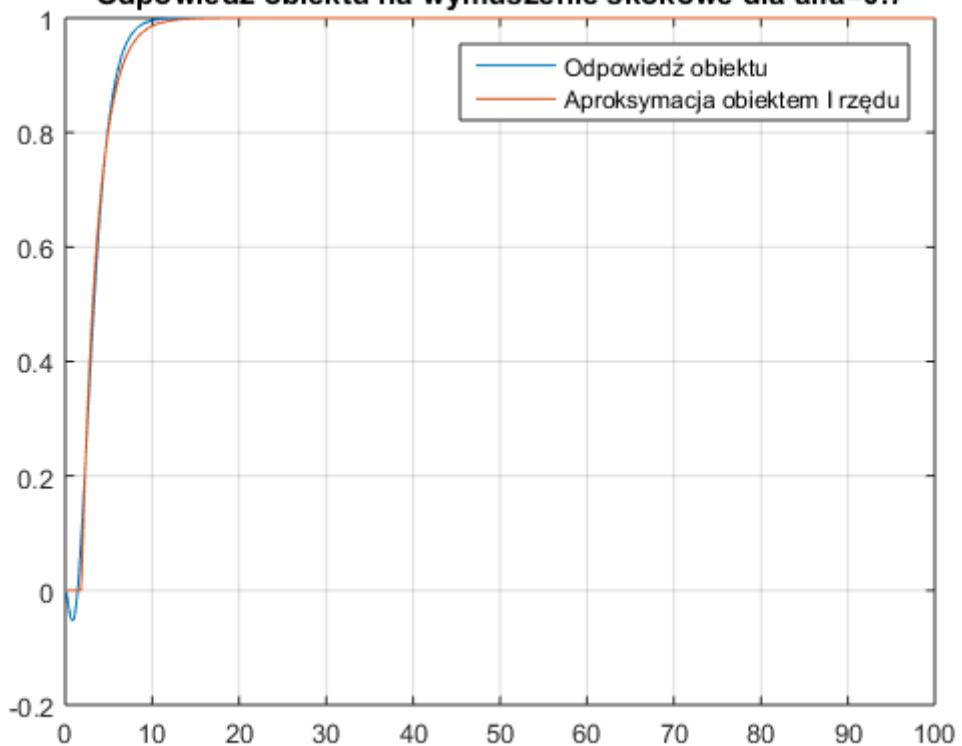
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.6



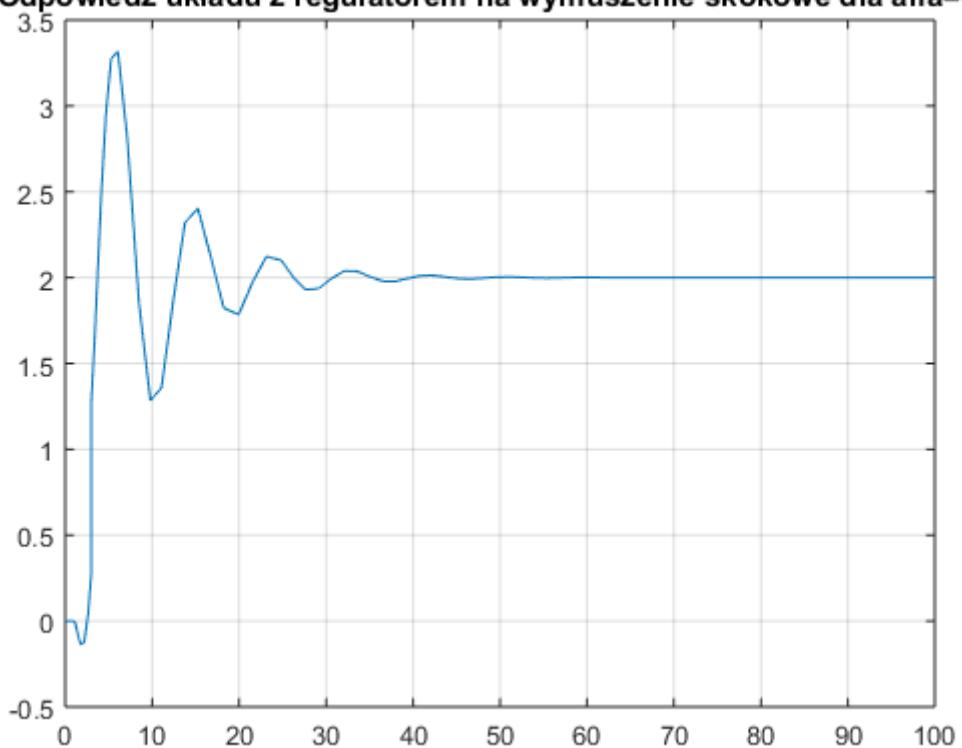
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.6



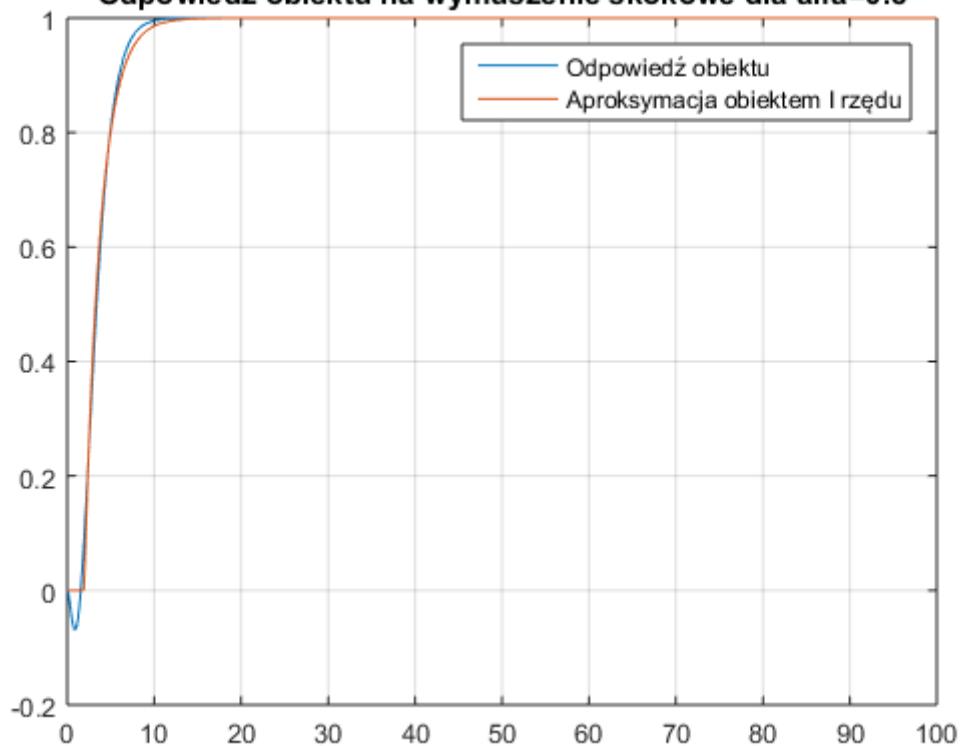
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.7



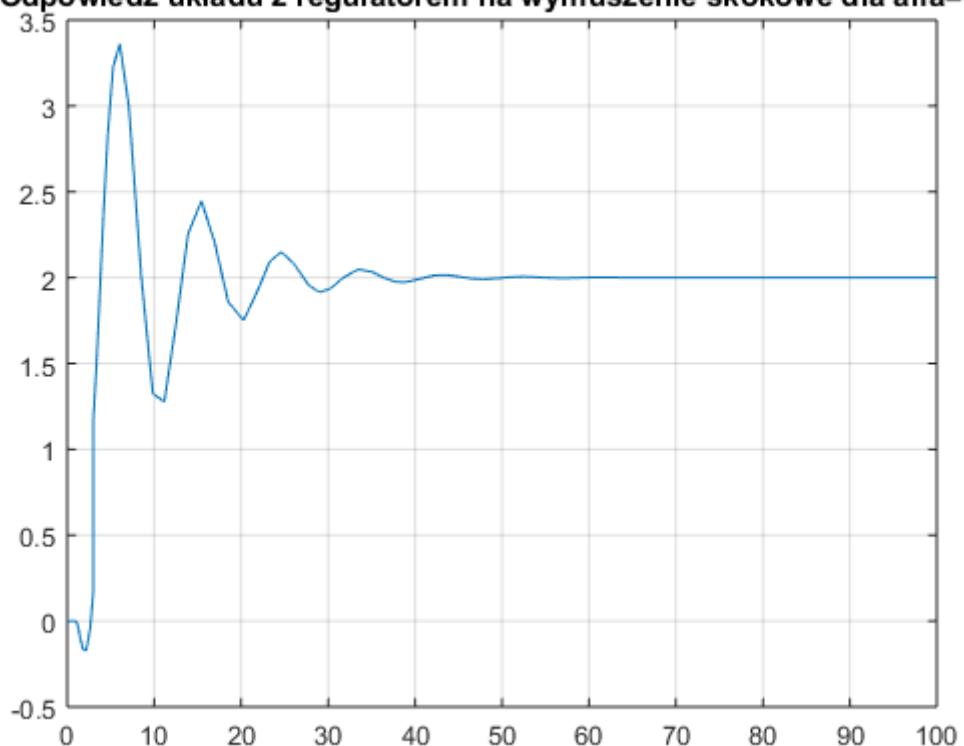
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.7



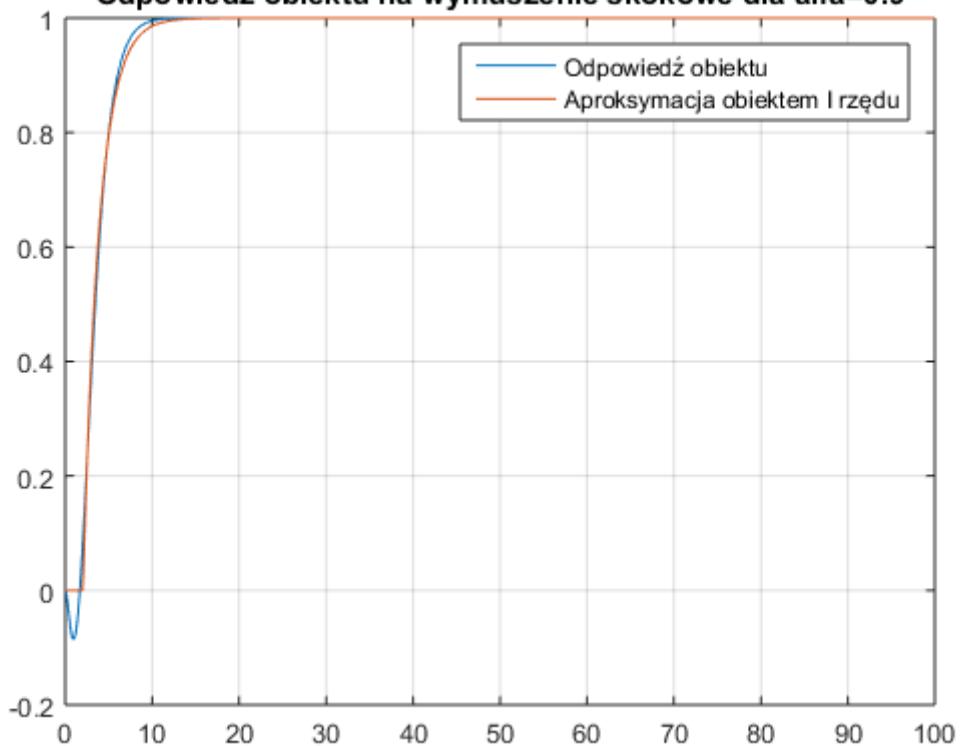
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.8



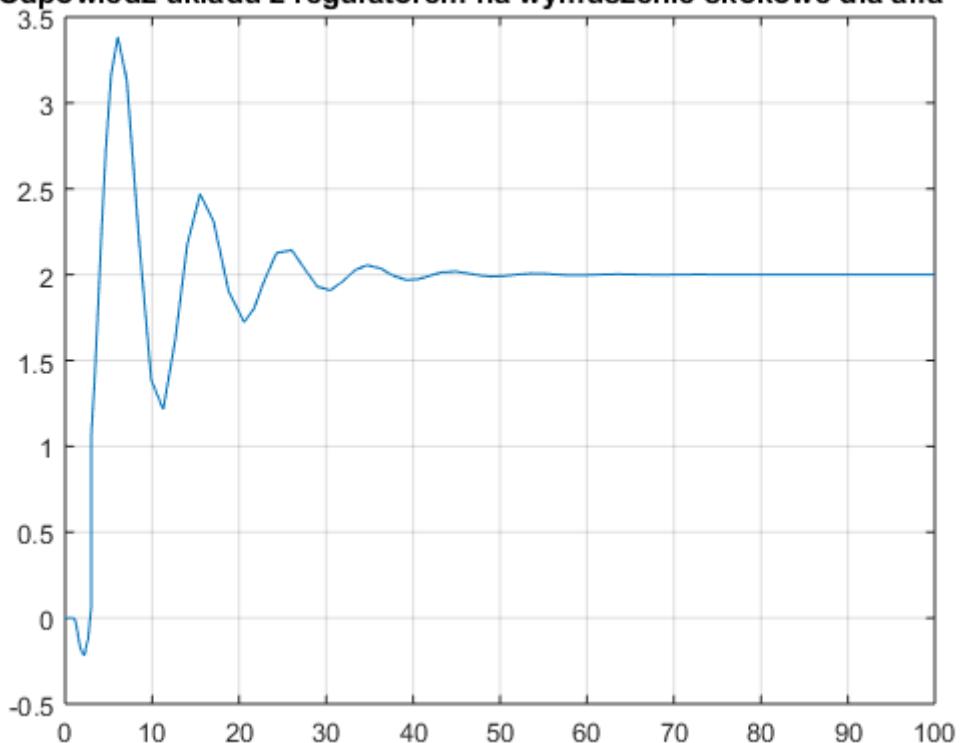
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.8



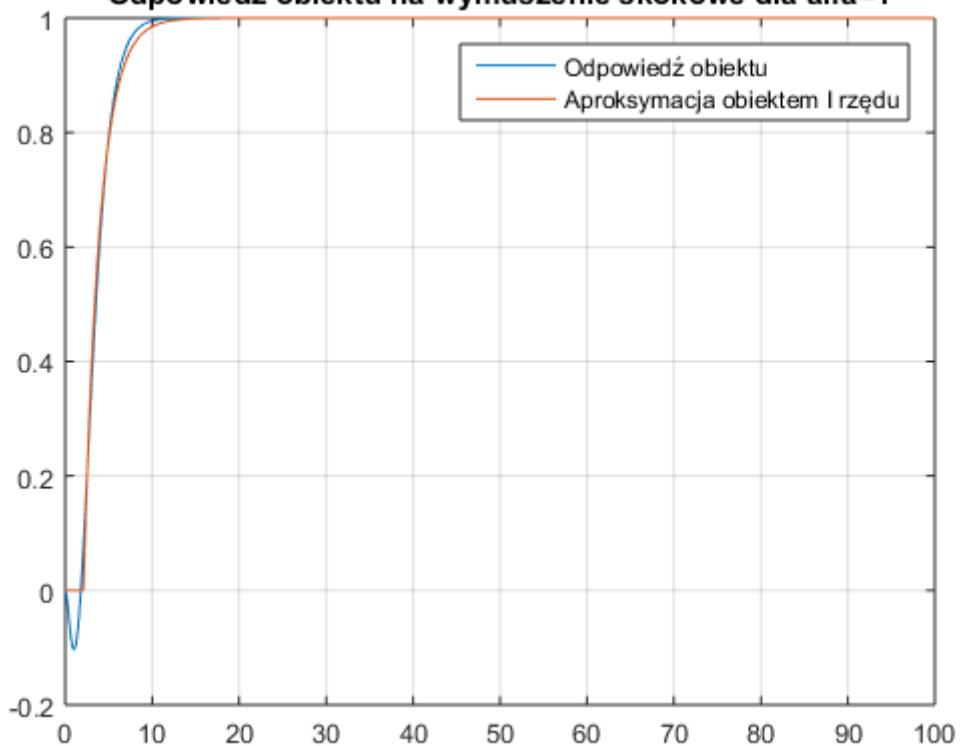
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=0.9



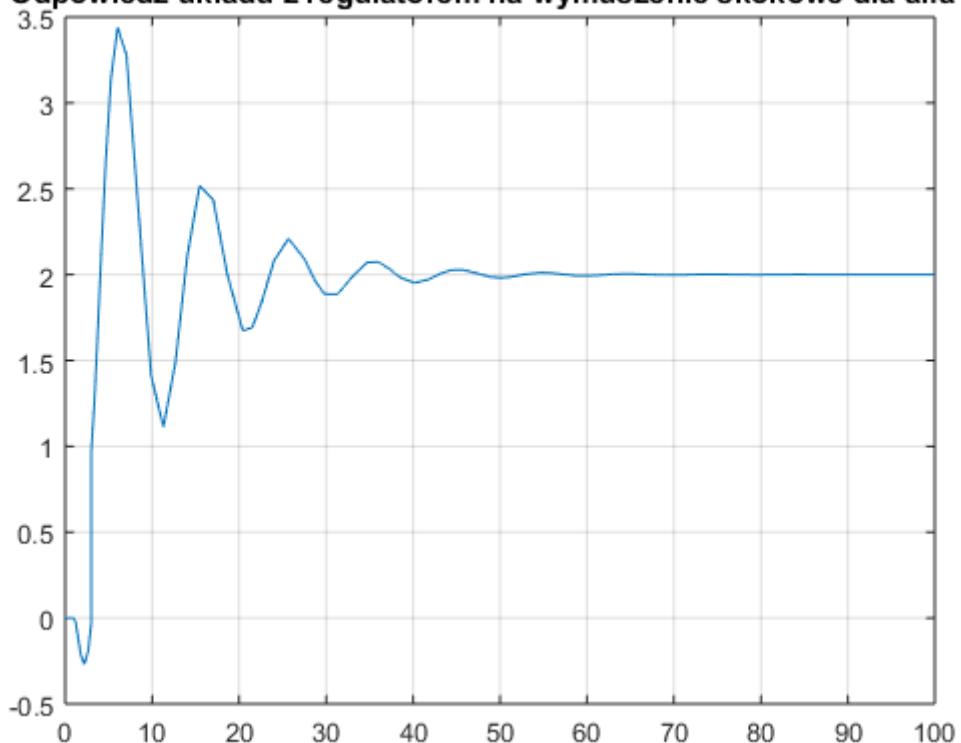
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=0.9



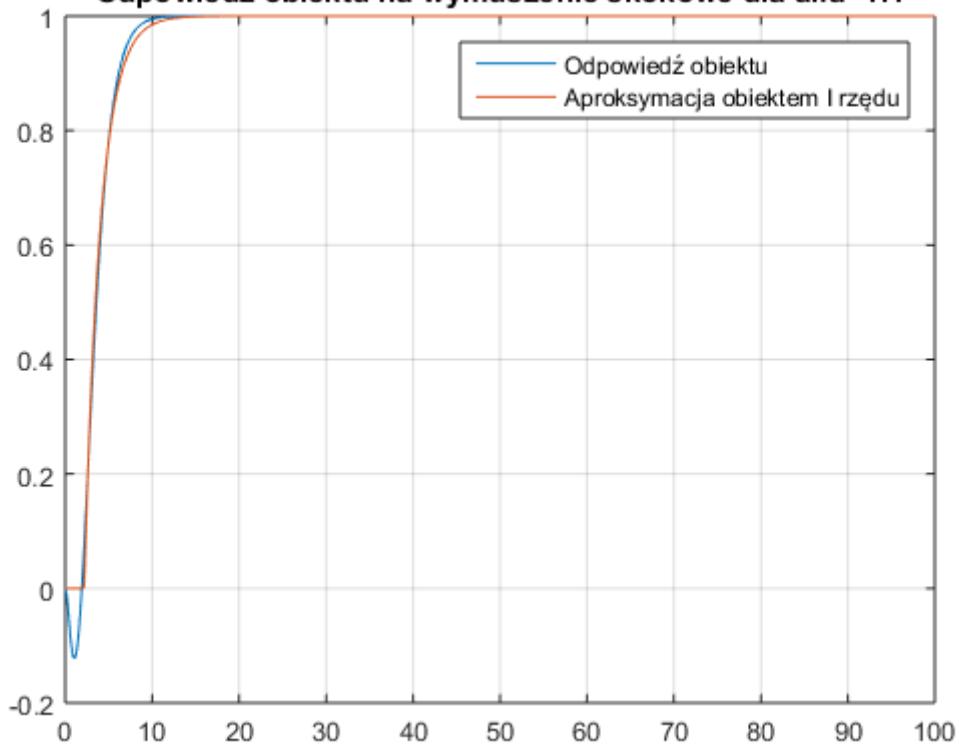
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla alfa=1



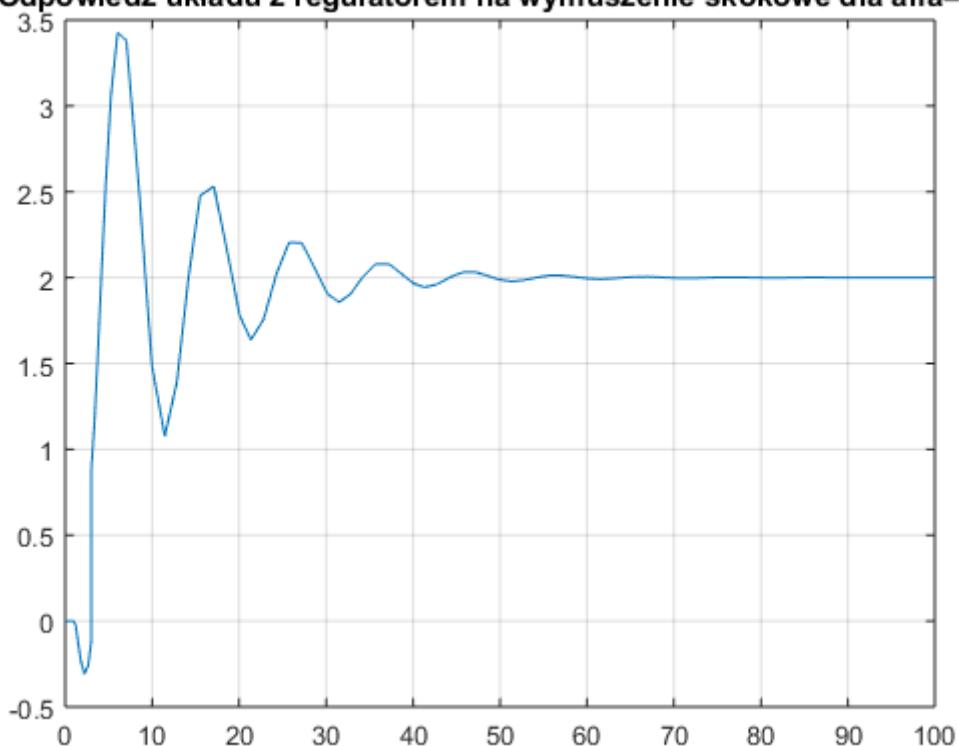
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla alfa=1



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $\alpha=1.1$



Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $\alpha=1.1$



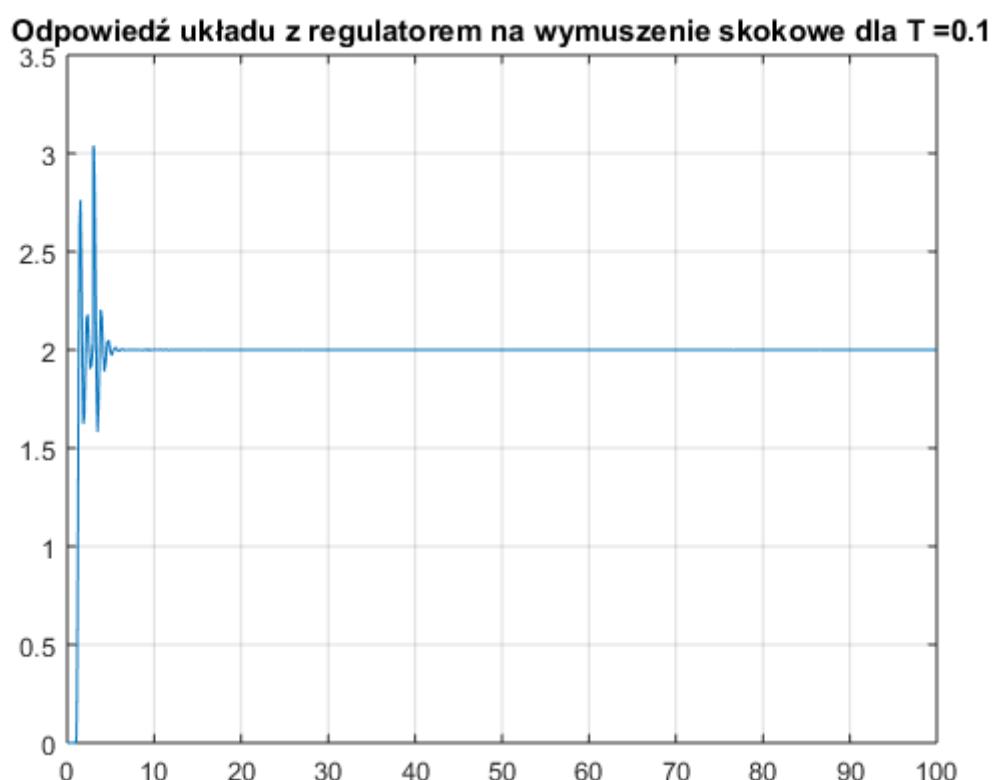
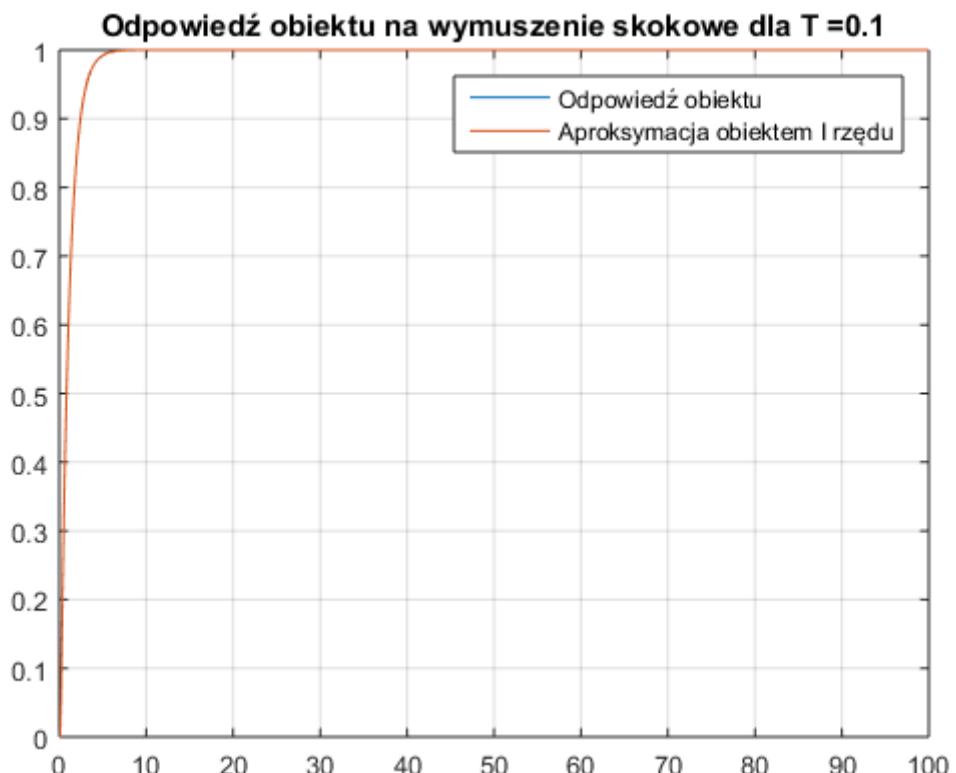
Obiektem ósmym jest obiekt minimalnofazowy. Regulator sprowadza system do wartości zadanej i stabilnie go w niej utrzymuje. Wraz ze zwiększeniem parametru α wydłuża się czas regulacji, zwiększa się ilość przeregulowań oraz zwiększa się początkowy spadek poniżej zera odpowiedzi układu, co jest charakterystyczne dla tego typu obiektu.

12. Symulacja dla obiektu G_9 .

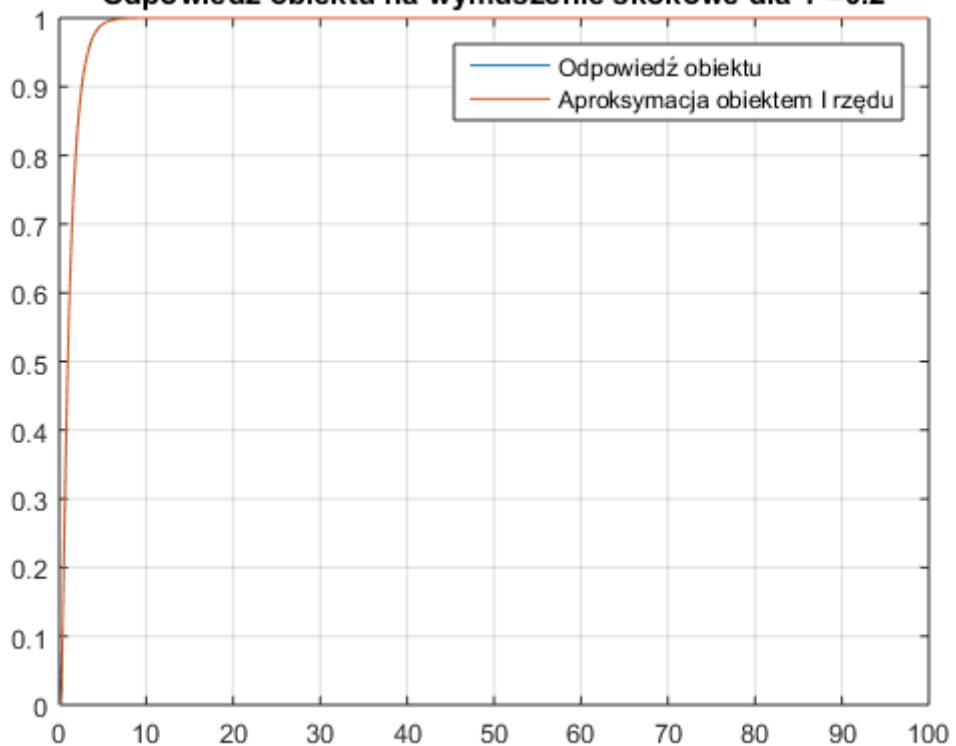
$$G_9 = \frac{1}{(s+1)((sT)^2 + 1.4sT + 1)}$$

Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając stałą czasową w następujący sposób:

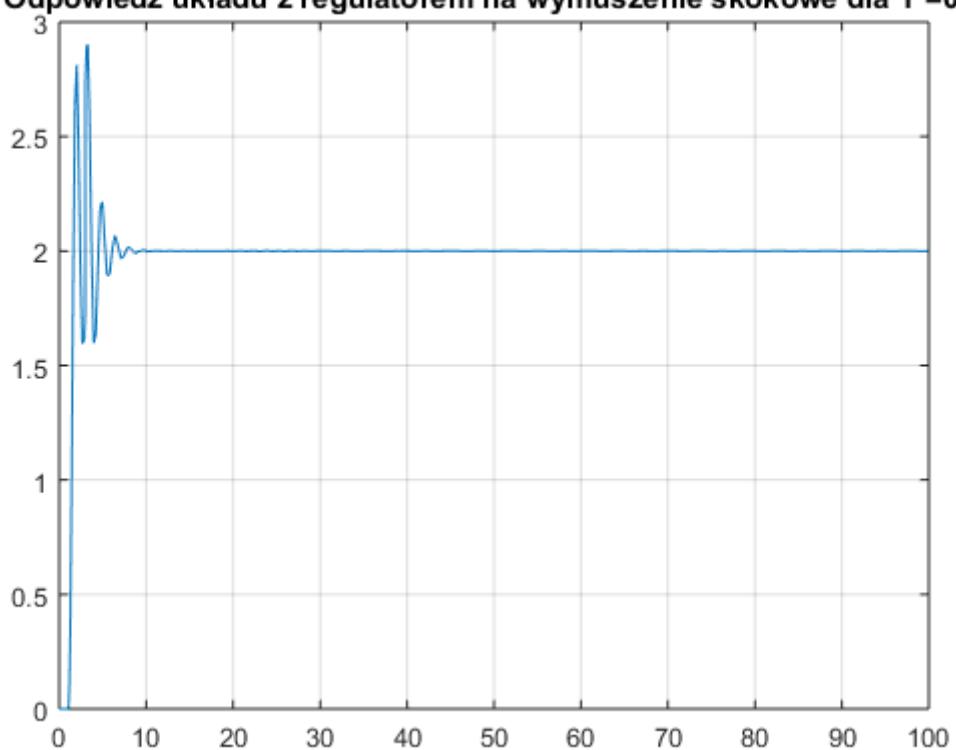
$T = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$



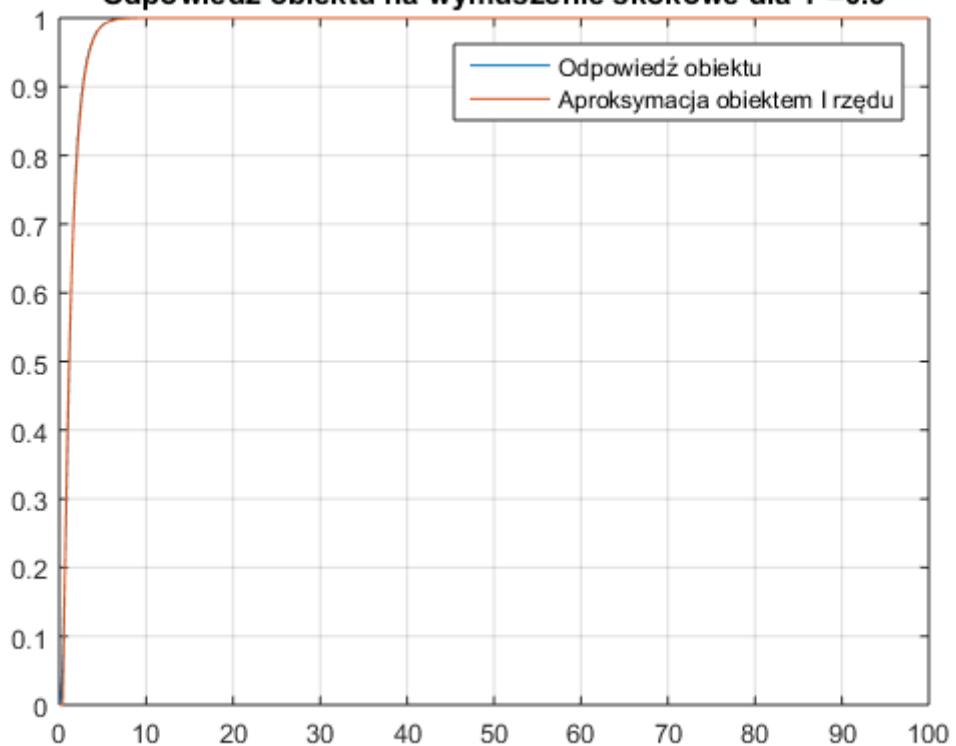
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



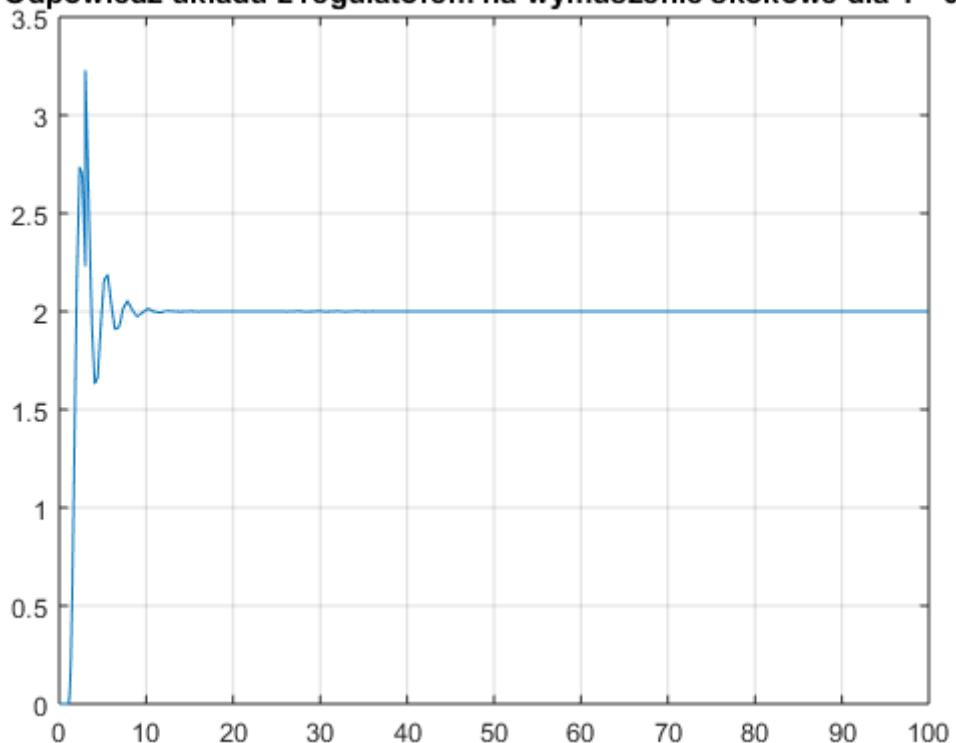
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.2$



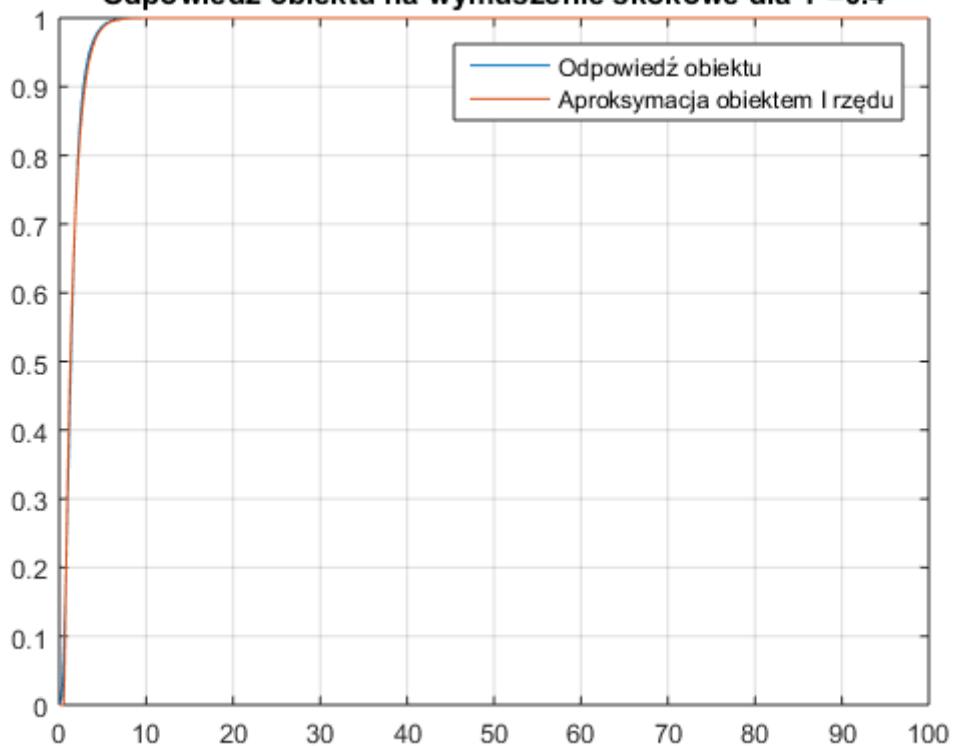
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.3$



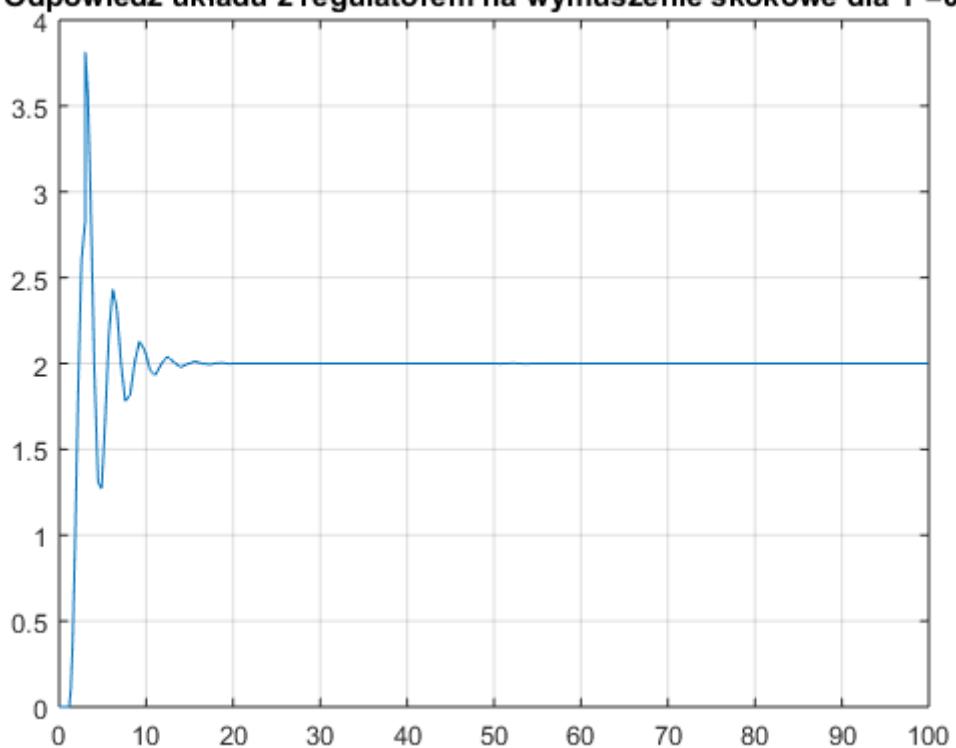
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.3$



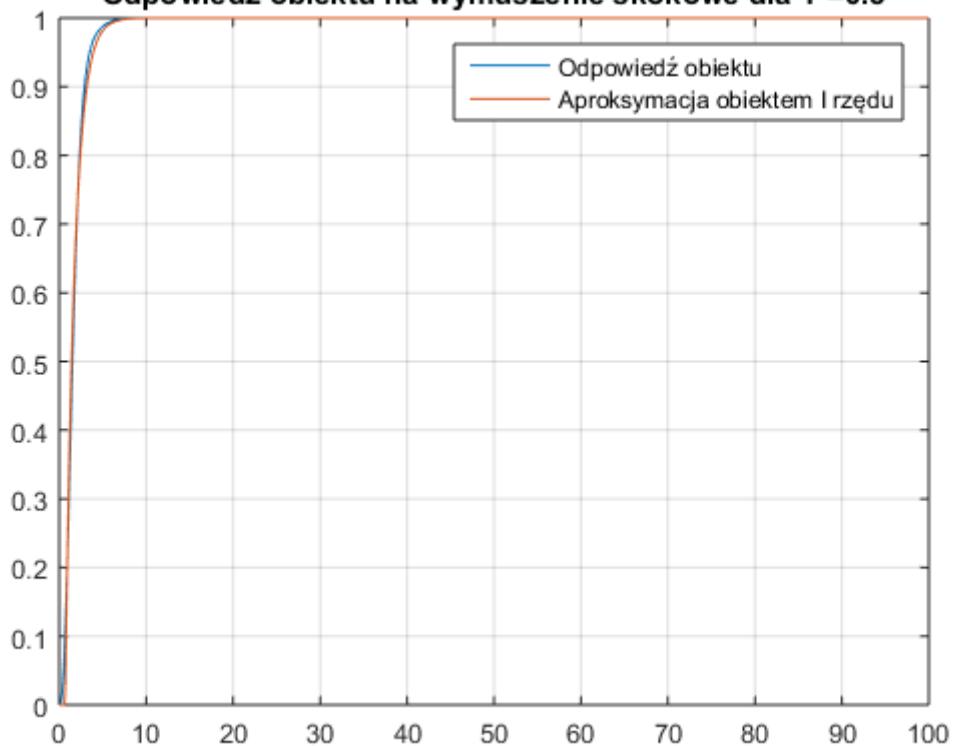
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.4$



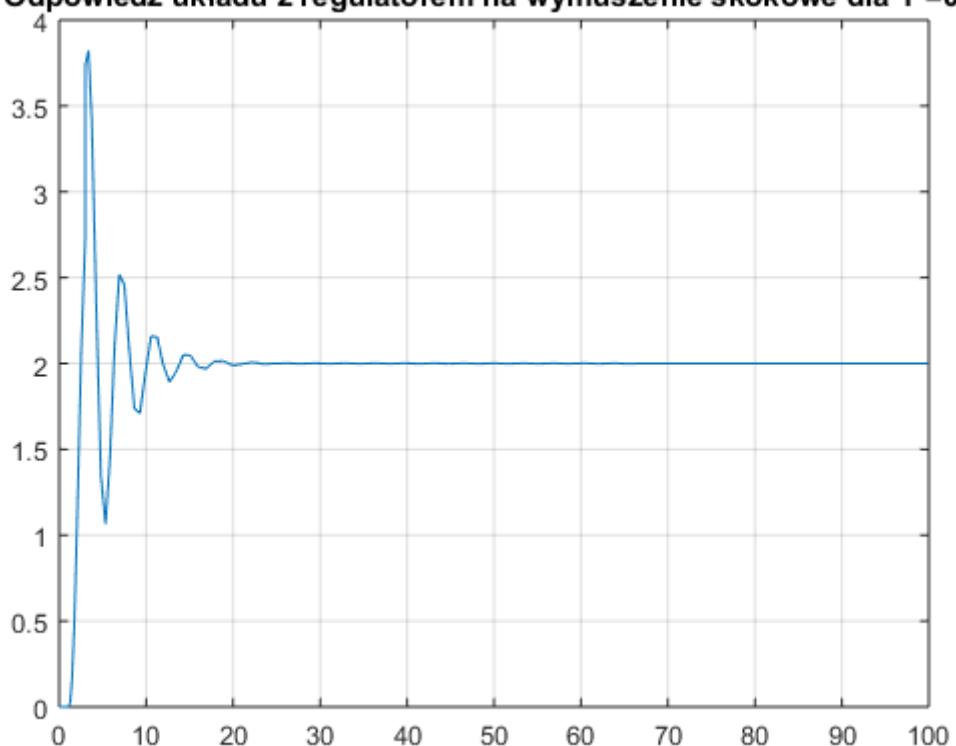
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.4$



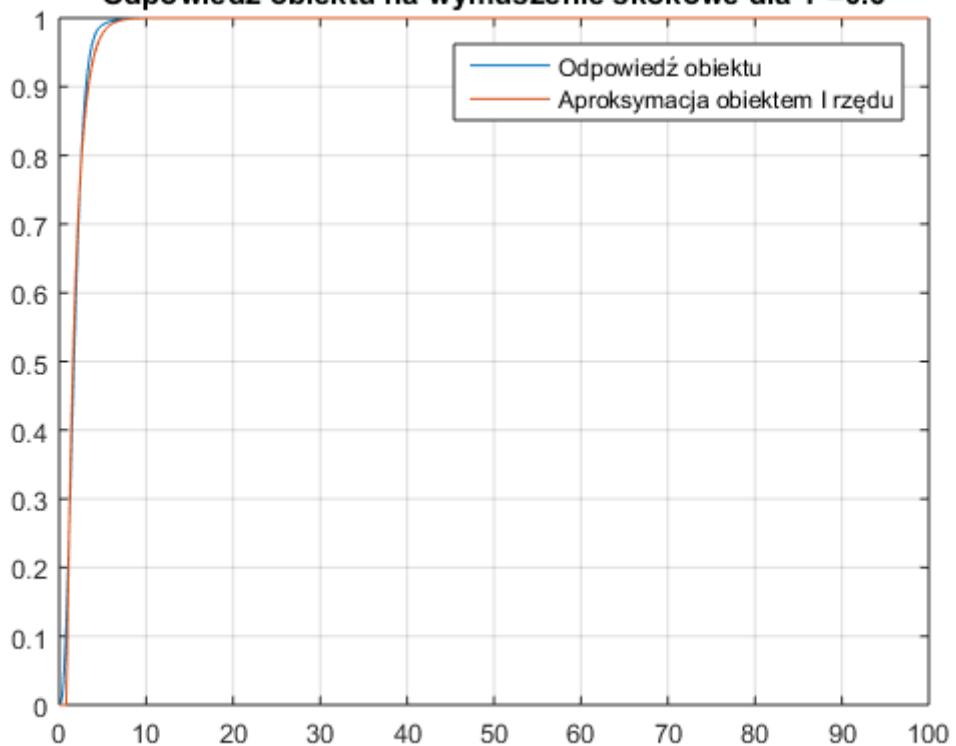
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



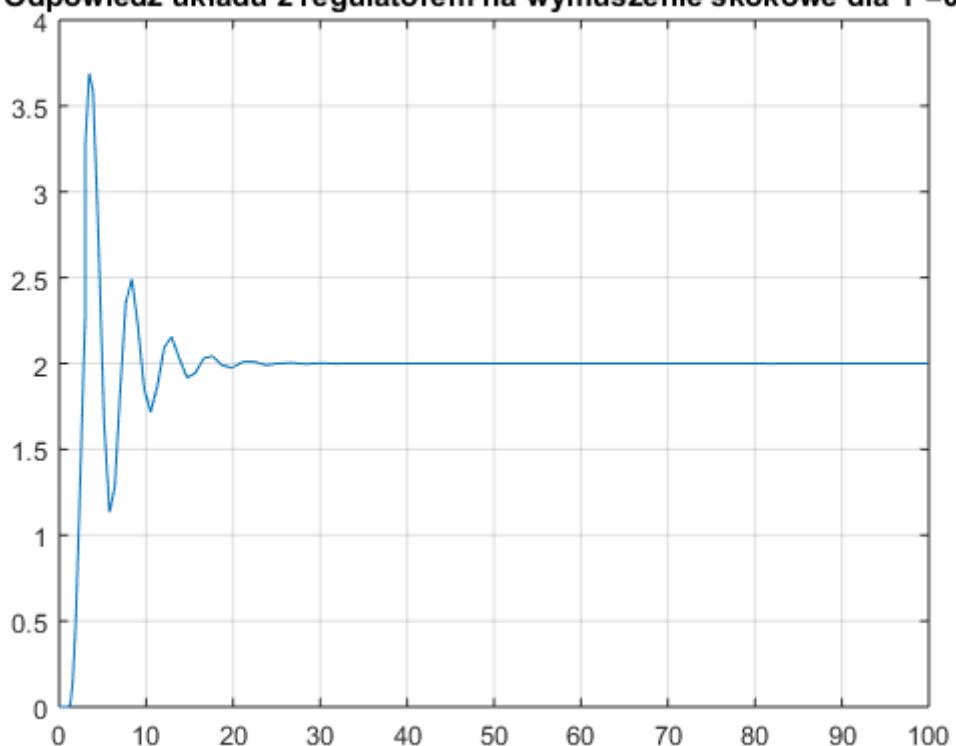
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.5$



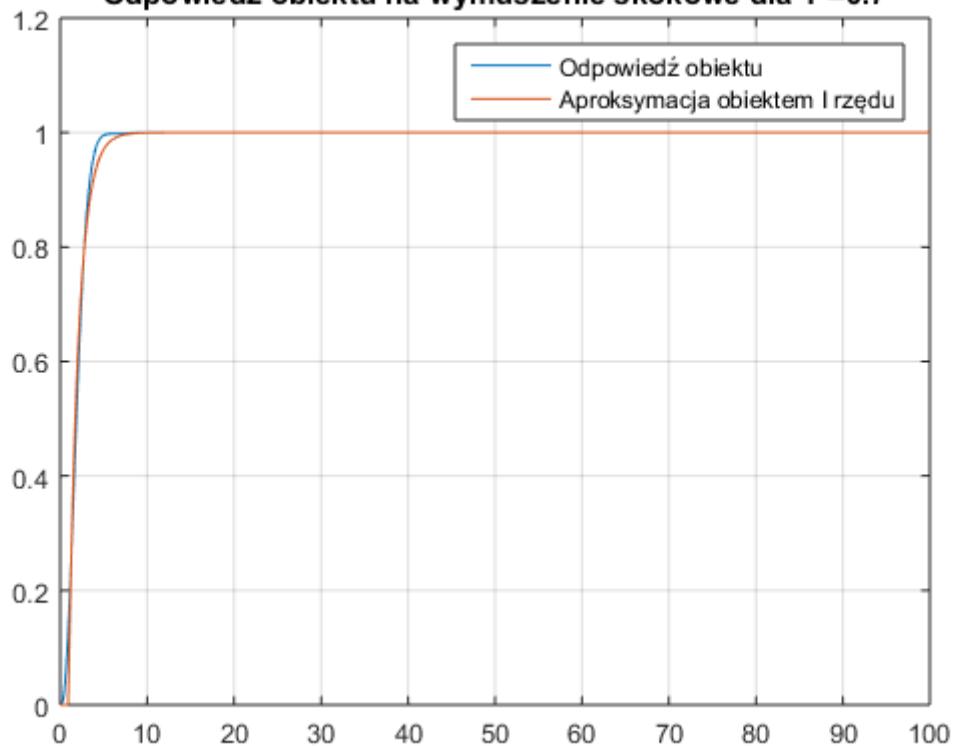
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.6$



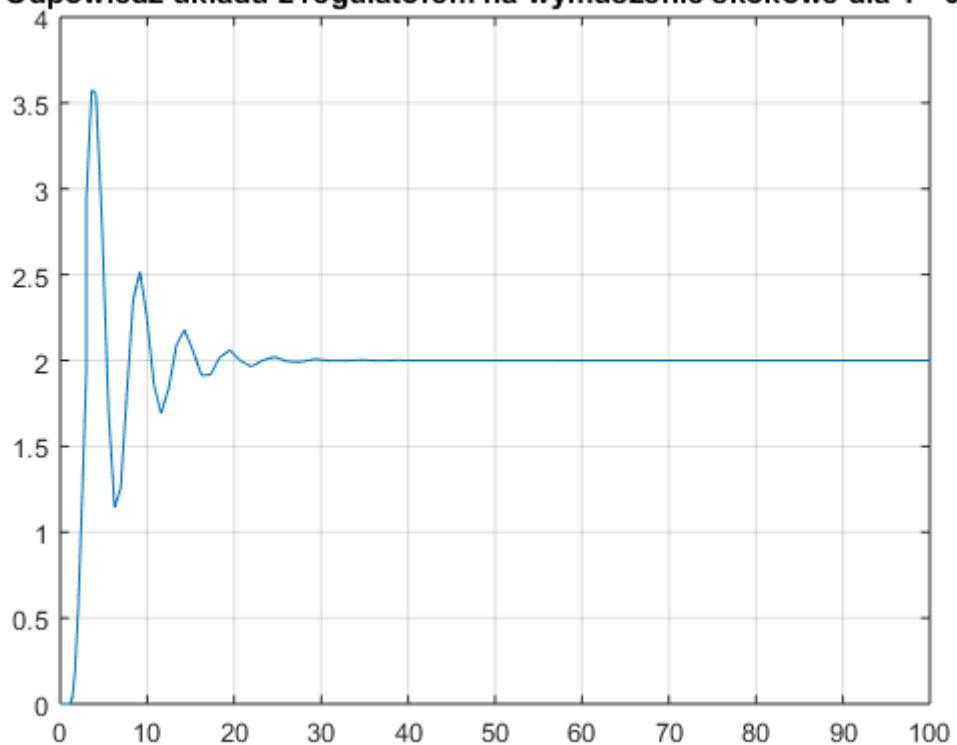
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.6$



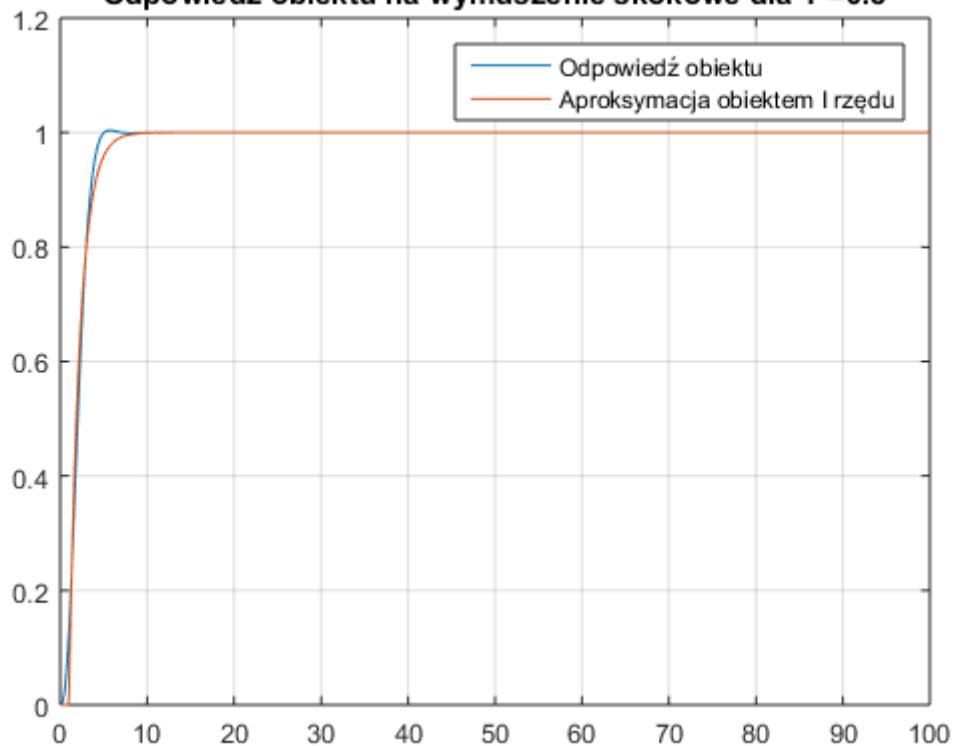
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.7$



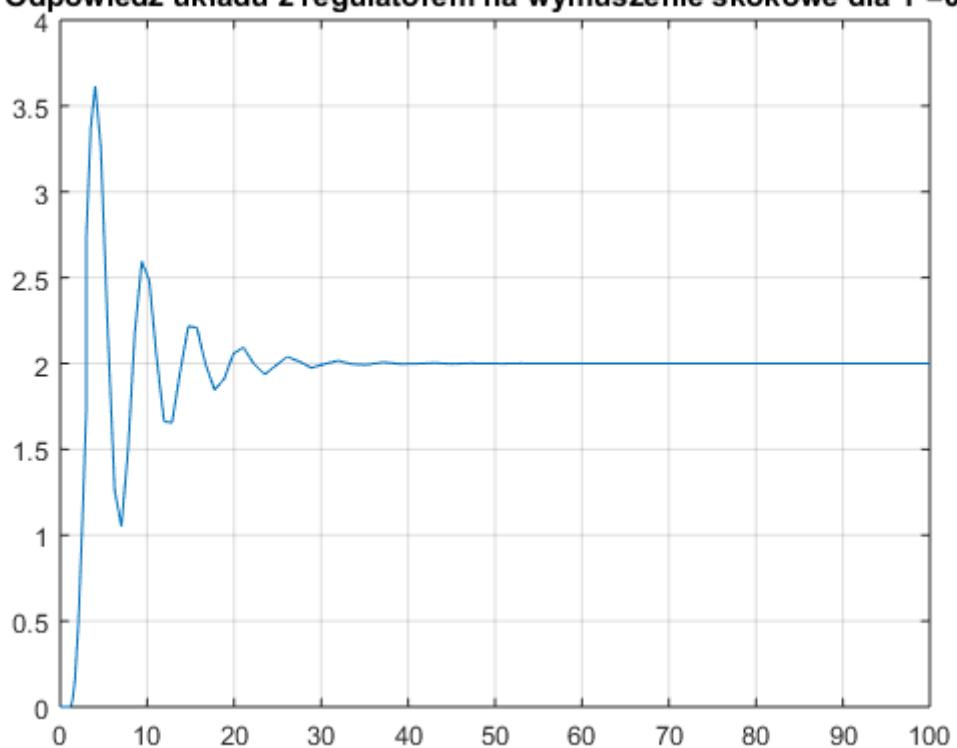
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.7$



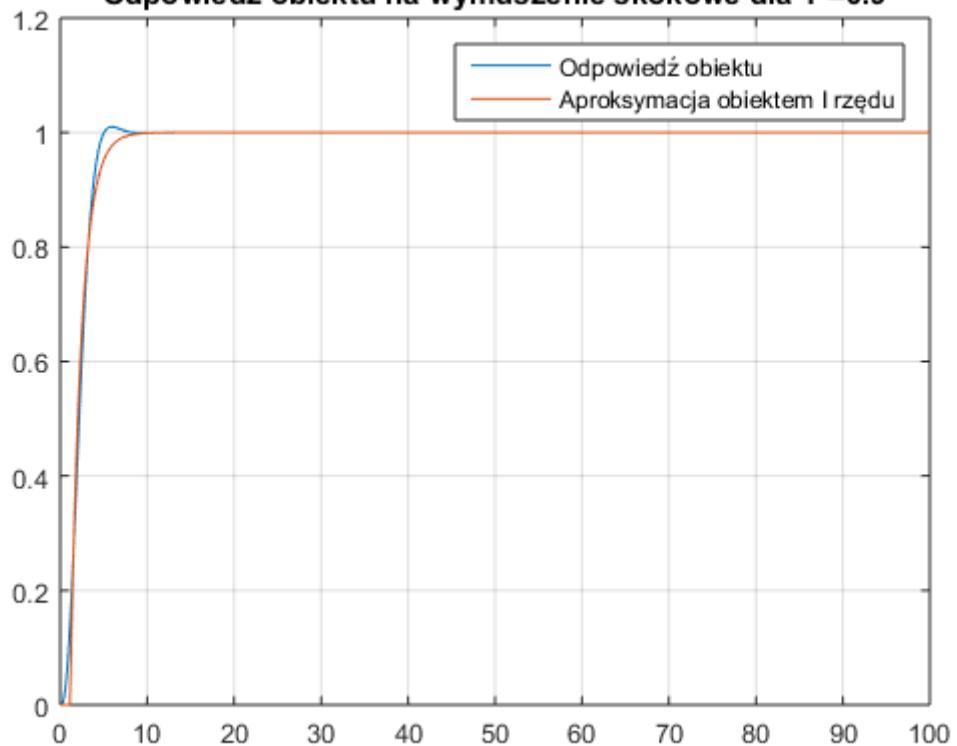
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.8$



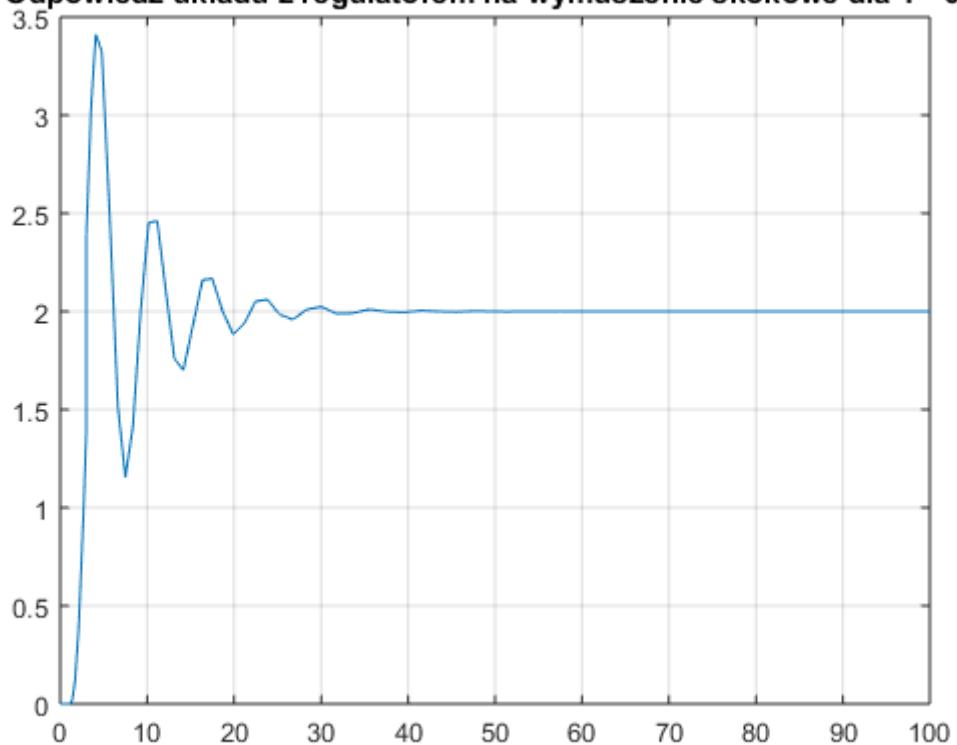
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.8$



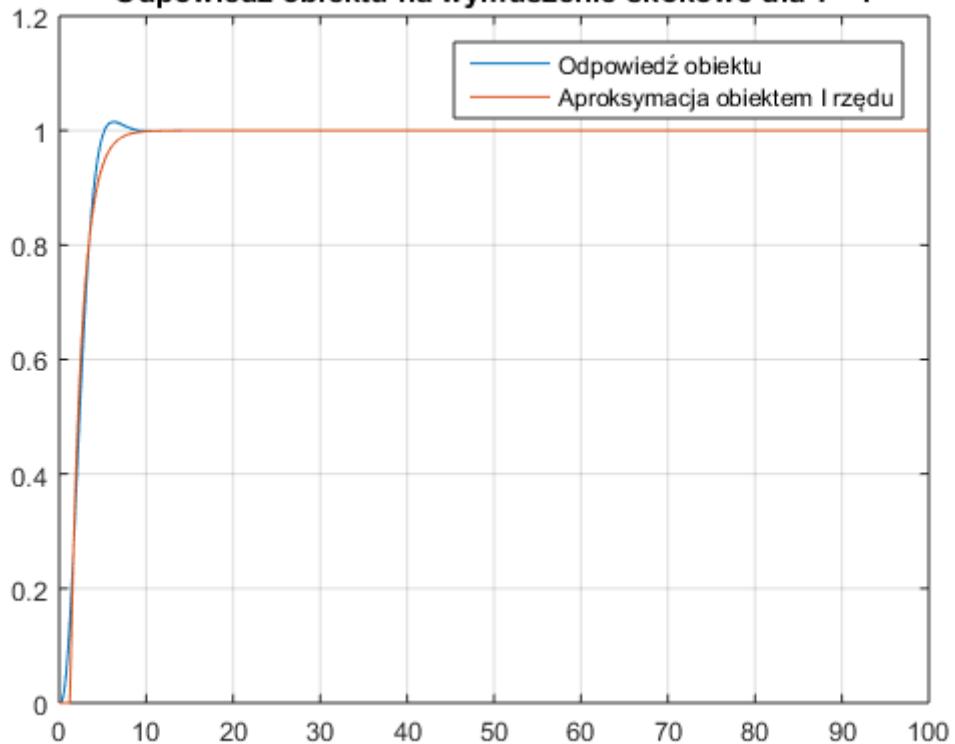
Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 0.9$



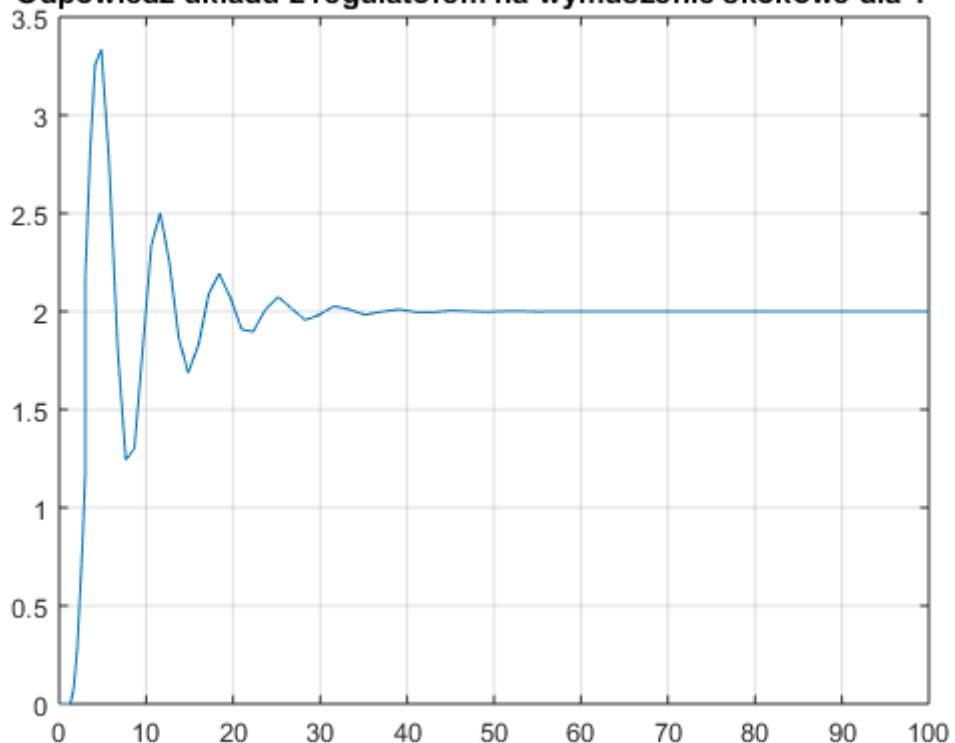
Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 0.9$



Odpowiedź obiektu na wymuszenie skokowe dla $T = 1$



Odpowiedź układu z regulatorem na wymuszenie skokowe dla $T = 1$



Ostatni badany obiekt zachowuje się podobnie jak kilka jego poprzedników. Układ z regulatorem stabilizuje system do wartości zadanej. Zwiększanie stałej czasowej wydłuża czas regulacji, zwiększa ilość przeregulowania i zmniejsza dynamikę układu.

13. Wnioski

Po wykonaniu licznych symulacji można stwierdzić, iż regulator PI stworzony w oparciu o metodę Internal Model Control bardzo dobrze radzi sobie ze stabilizacją różnorakich systemów. Regulator stworzone w oparciu o metodę IMC znajdują zastosowanie jedynie dla obiektów stabilnych co pokazał nam przykład układu G_6 . Przeprowadzone symulacje dowiodły, że przybliżenie obiektu układem inercyjnym I rzędu z opóźnieniem i dobranie na jego podstawie parametrów regulatora PI daje bardzo dobre rezultaty, co uproszcza znacznie projektowanie układu regulacji automatycznej.