

Sterowanie procesami – projekt II, zadanie 2.40

Michał Stolarz

Proces dynamiczny opisany jest transmitancją:

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-T_0 s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

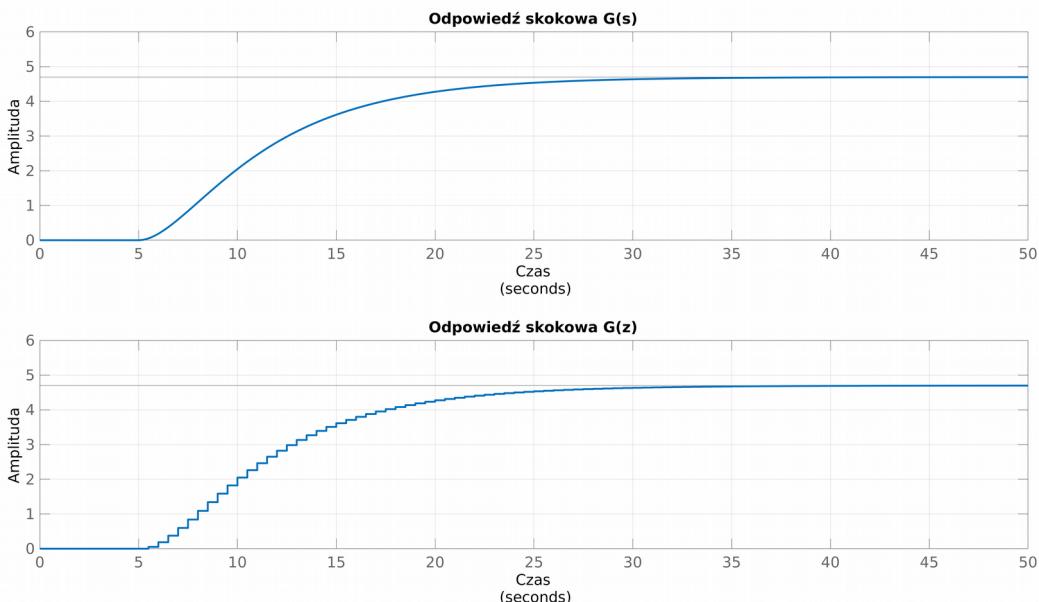
gdzie $K_0=4,7$, $T_0=5$, $T_1 = 1,89$, $T_2=5,27$

Zad nr 1

Wyznaczona (za pomocą ekstrapolatora zerowego rzędu) transmitancja dyskretna o okresie próbkowania 0,5s ma postać:

$$G(z) = z^{-10} \frac{0.0524z + 0.04649}{z^2 - 1.677z + 0.6981}$$

Odpowiedzi skokowe zarówno transmitancji dyskretnej jak i ciągłej są do siebie zbliżone:



Ilustracja 1: Odpowiedzi skokowe transmitancji ciągłej i dyskretnej

Jak widać na wykresach współczynniki wzmacniania zarówno transmitancji dyskretnej jak i ciągłej są takie same. Dla pewności jednak użyto funkcji : `dcgain()` . Jako argument przyjmuje transmitancję, a zwraca wzmacnianie statyczne. Dla obu transmitancji wzmacnianie statyczne wyniosło 4,7 . Wszelkie obliczenia zamieszczono w pliku zad1.m .

Zad nr 2

Wyznaczone równanie różnicowe na podstawie transmitancji dyskretnej, służące do obliczenia wielkości $y(k)$ na podstawie sygnałów wejściowych i wyjściowych z chwil poprzednich jest posataci:

$$y(k) = 1.677y(k-1) - 0.6981y(k-2) + 0.0524u(k-11) + 0.04649u(k-12)$$

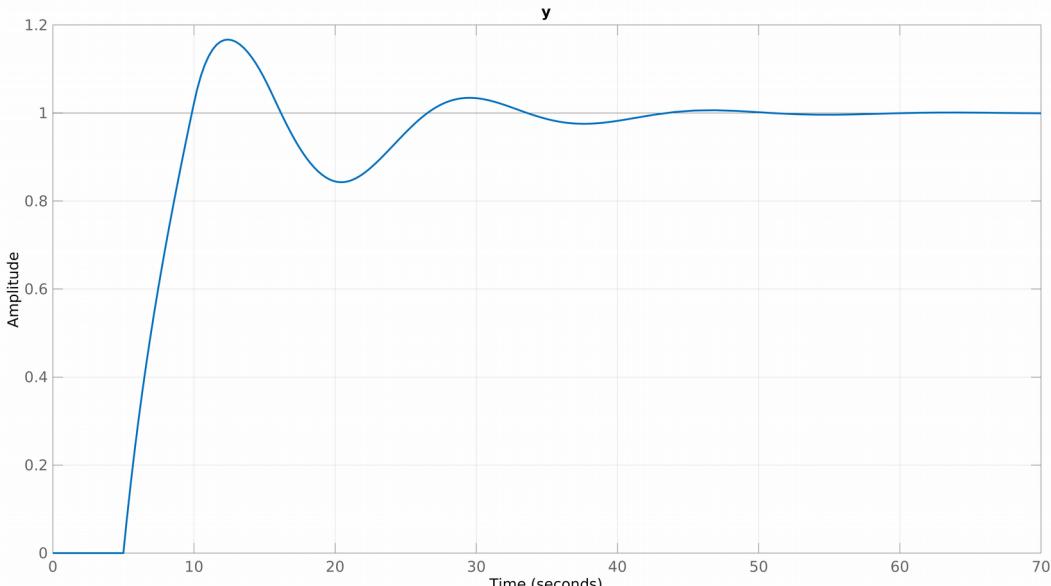
Zad nr 3

Dla danego obiektu dobrano ciągły regulator PID metodą Zieglera Nicholsa. Najpierw zmierzono wzmacnienie krytyczne $K_k=0,4802$, a następnie okres oscylacji $T_k=20s$. Nastawy wyniosły kolejno: $K_r=0,6K_k=0,2881$, $T_i=0,5T_k=10$, $T_d=0,12T_k=2,4$. Następnie na podstawie uzyskanych parametrów wyliczono parametry r_0 , r_1 , r_2 dla dyskretnego regulatora PID. Korzystano ze wzorów:

$$r_0 = K_r \left(1 + \frac{T_p}{2T_i} + \frac{T_d}{T_p} \right)$$
$$r_1 = K_r \left(-1 - 2\frac{T_d}{T_p} + \frac{T_p}{2T_i} \right)$$
$$r_2 = \frac{K_r T_d}{T_p}$$

gdzie T_p jest czasem próbkowania i wynosi 0,5s. Parametry te wyniosły kolejno: $r_0=1.6783$, $r_1=-3.0469$, $r_2=1.3830$.

Ponieważ metodą Zieglera Nicholsa uzyskano regulator stabilny i w dopuszczalnym czasie dążący do wartości zadanej (Ilustracja 2), zaprzestano dalszych prób zmieniania parametrów.



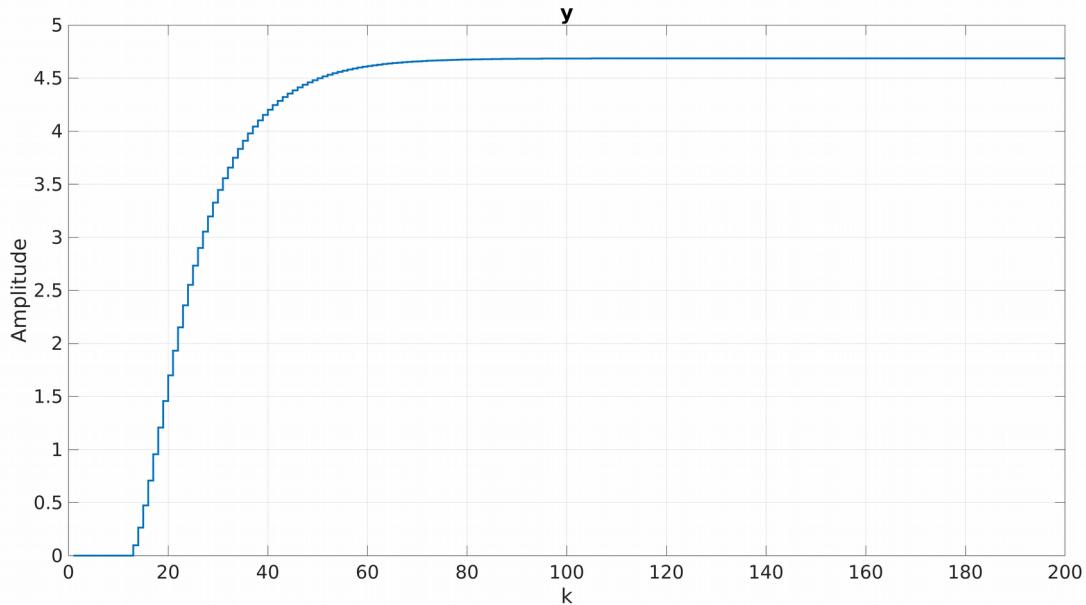
Ilustracja 2: Odpowiedź skokowa obiektu z ciągłym regułatorem PID o parametrach wyznaczonych metodą Zieglera-Nicholsa

Wszelkie obliczenia do tego zadania zamieszczono w pliku zad3.m .

Zad nr 4

Program do symulacji cyfrowego algorytmu PID oraz algorytmu DMC w wersji analitycznej, bez ograniczeń znajduje się w pliku zad4.m . Przyjęto stałą trajektorię zadaną dla całego horyzontu predykcyjnego. Wykorzystano tutaj model z punktu drugiego do wyznaczenia odpowiedzi skokowej obiektu (wykorzystanej w regulacji predykcyjnej DMC) i jego symulacji. Odpowiedź skokową obiektu przedstawiono na Ilustracji 3, gdzie k oznacza numery kolejnych próbek z wartościami odpowiedzi skokowej obiektu.

Dla lepszego uporządkowania realizacji kolejnych etapów projektu elementy programu zad4.m zostały rozdzielone między skrypty służące do realizacji kolejnych zadań (zad nr 5 i 6).



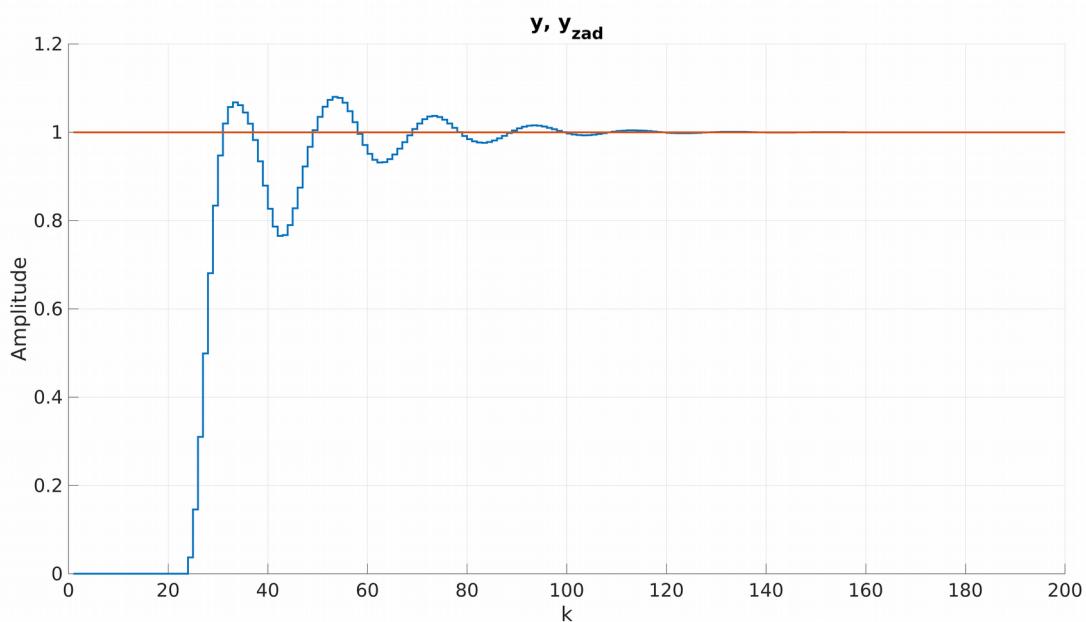
Ilustracja 3: Odpowiedź skokowa modelu w postaci równania różnicowego

Zad nr 5

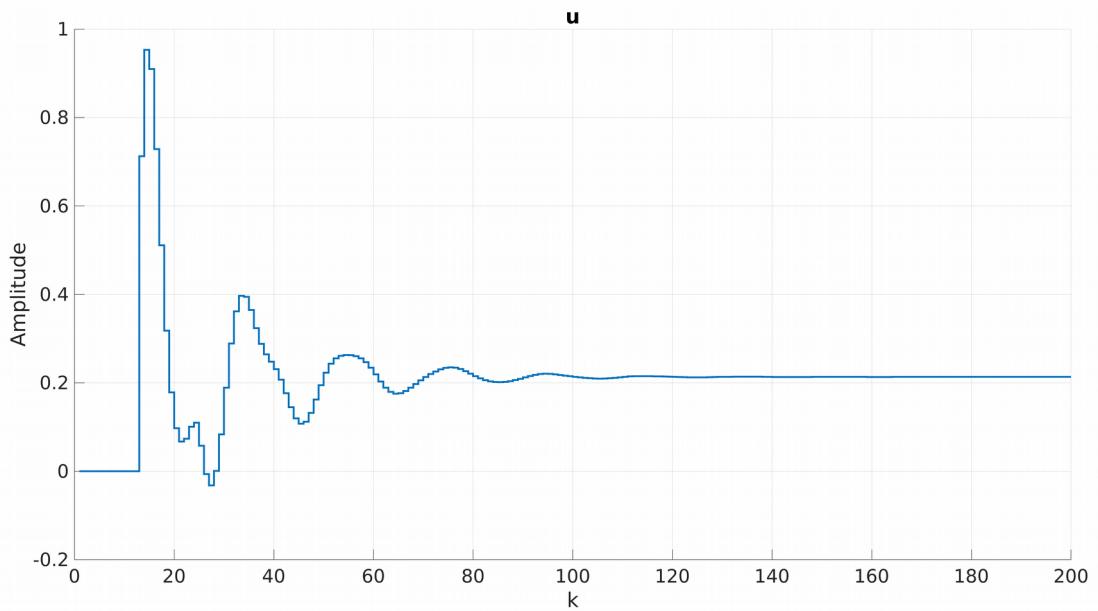
Dobrano parametry algorytmu DMC testując działanie układu regulacji dla skokowych zmian wartości zadanej, postępując w następujący sposób:

a)

Na podstawie odpowiedzi skokowej określono horyzont dynamiki $D=80$. Po tej liczbie kroków wartość odpowiedzi skokowej można uznać za ustaloną (zmienia się o bardzo niewielkie wartości), równą w przybliżeniu wzmacnieniu statycznemu (wynosi 4,6760). Następnie założono początkową wartość współczynnika λ ($\lambda=1$) oraz długości horyzontów predykcji i sterowania takie same, jak horyzontu dynamiki ($N_u=N=D$). Otrzymaną odpowiedź układu umieszczono na Ilustracji 4. Czerwonym kolorem zaznaczono wartość zadaną, a niebieskim wyjście obiektu. Regulator może nie pracuje optymalnie ale prawidłowo, ponieważ jest stabilny i osiąga wartość zadaną w dopuszczalnym czasie.



Ilustracja 4: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=D=80$

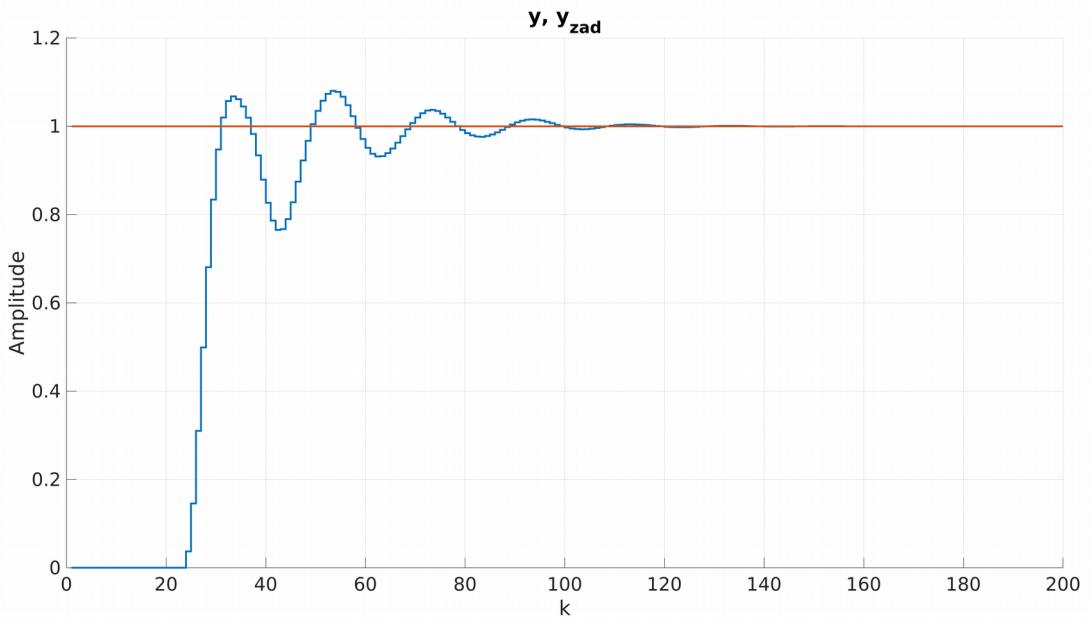


Ilustracja 5: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=D=80$

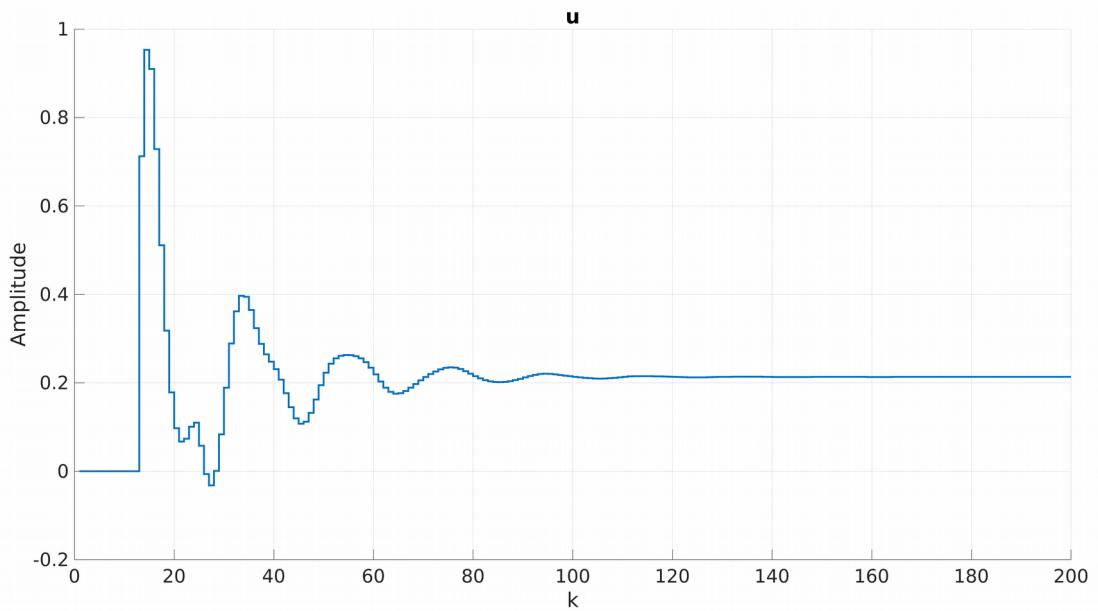
Niestety uzyskany regulator wytwarza sygnał sterujący, który potrafi bardzo szybko się zmieniać i uzyskiwać duże wartości, co też może być niekorzystne dla samego obiektu. Sygnał sterujący regulatora pokazano na Ilustracji 5.

b)

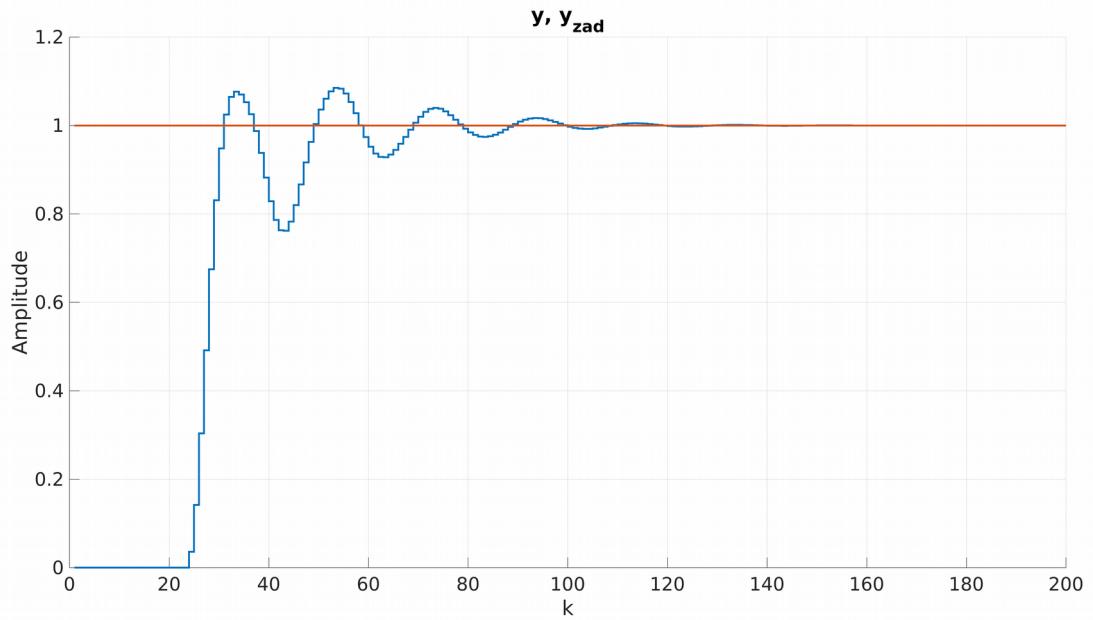
Następnie zaczęto stopniowo skracać horyzont predykcji i wybrano jego docelową długość równą 18, przy warunkach $D=80$, $N_u=N$, $\lambda=1$. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów przedstawiają Ilustracje 6-12 . Na wykresach z odpowiedzią skokową układu, czerwonym kolorem oznaczono wartość zadaną, a niebieskim wyjście modelu.



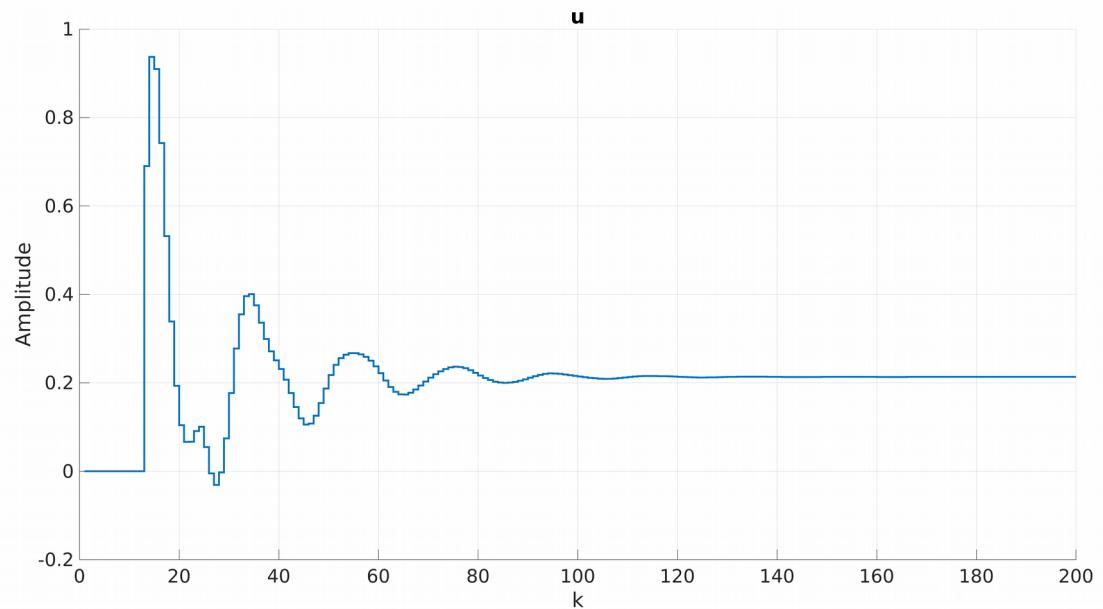
Ilustracja 6: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=40$



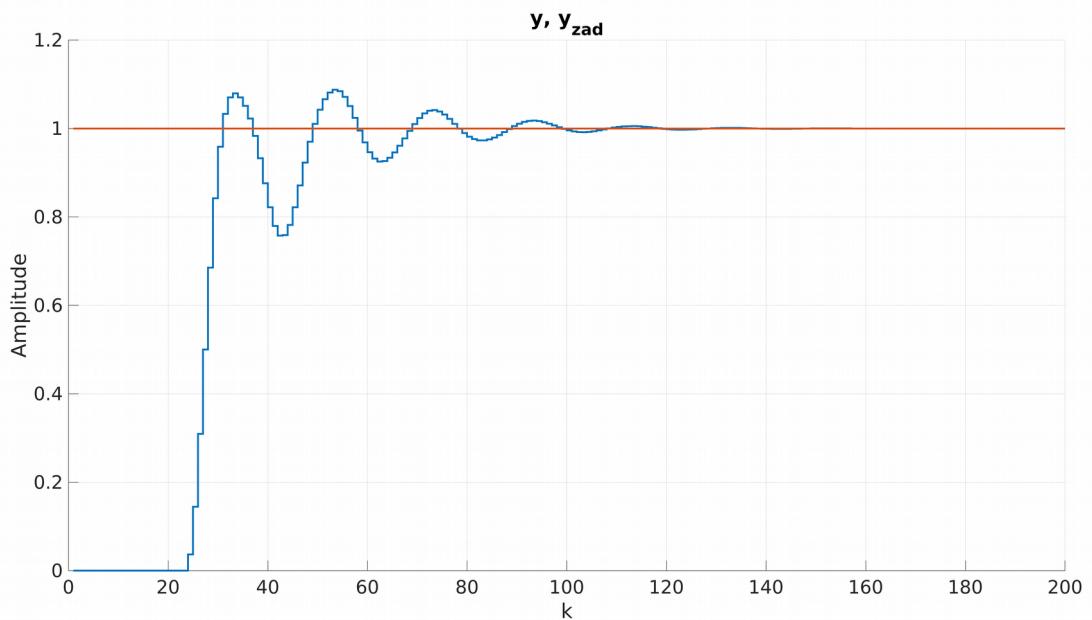
Ilustracja 7: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=40$



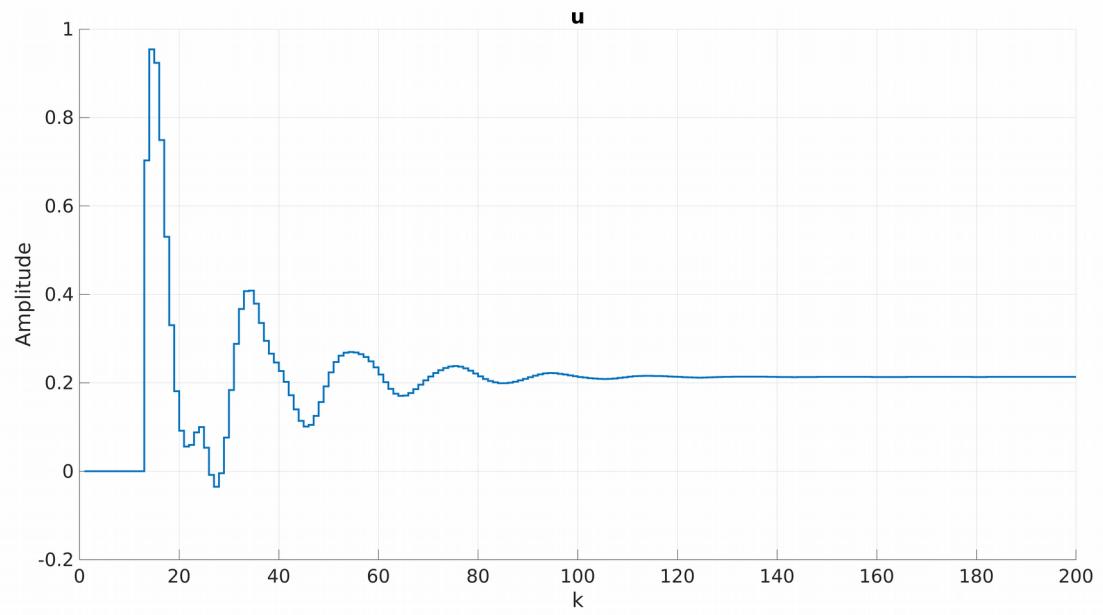
Ilustracja 8: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=20$



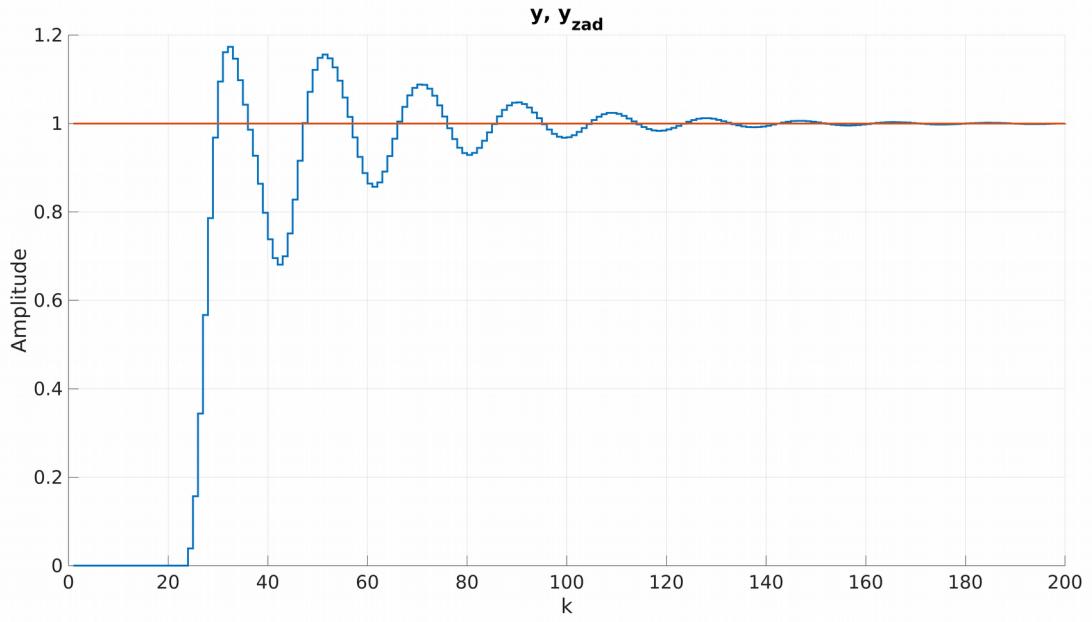
Ilustracja 9: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=20$



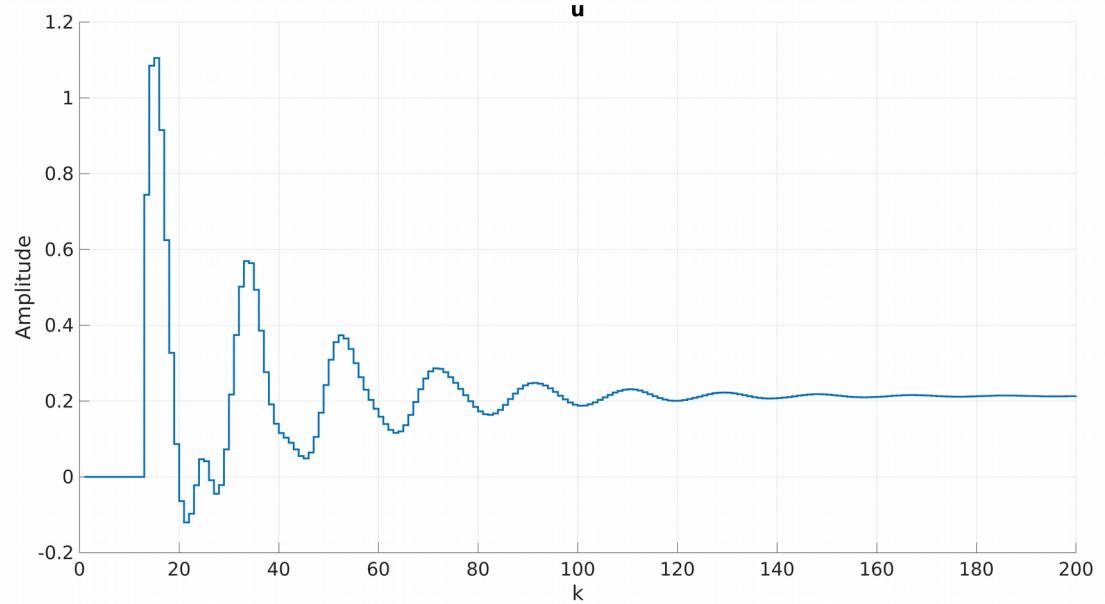
Ilustracja 10: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=18$



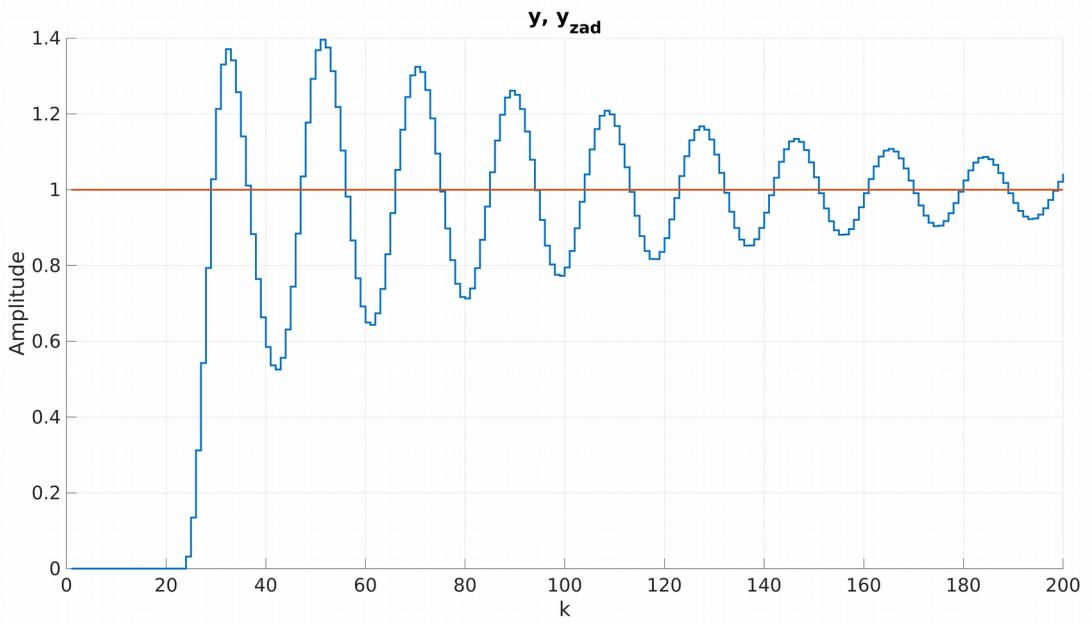
Ilustracja 11: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=18$



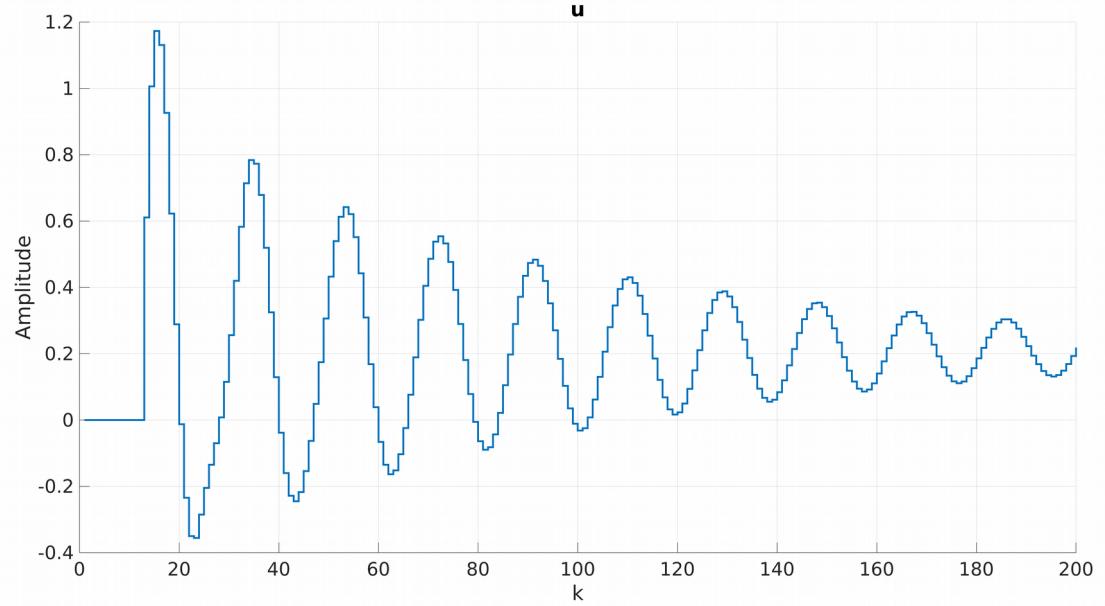
Ilustracja 12: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=16$



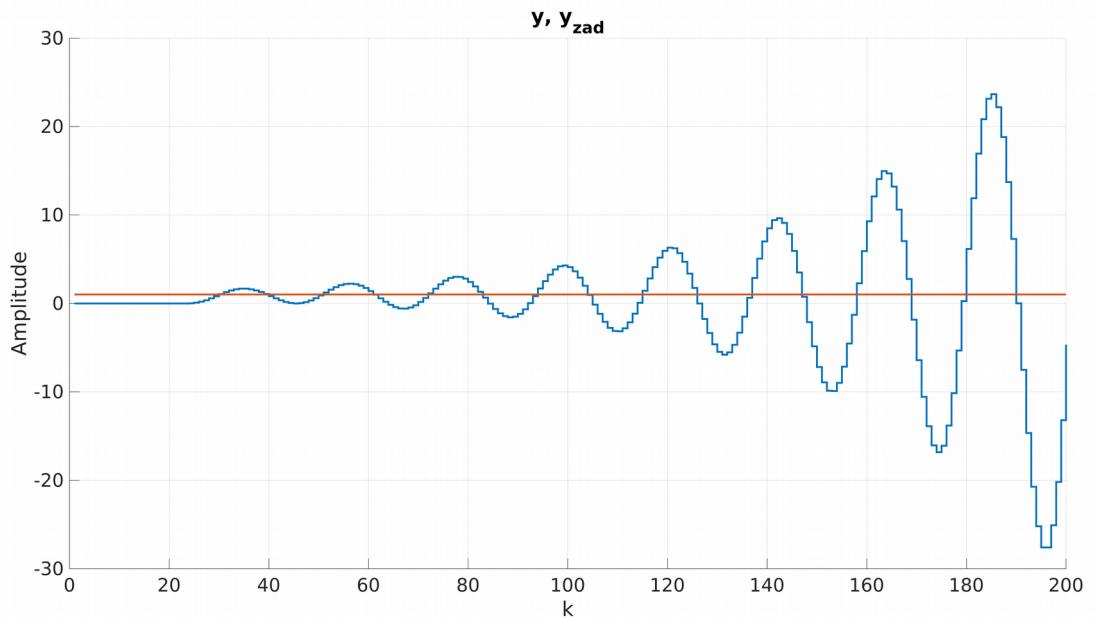
Ilustracja 13: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=16$



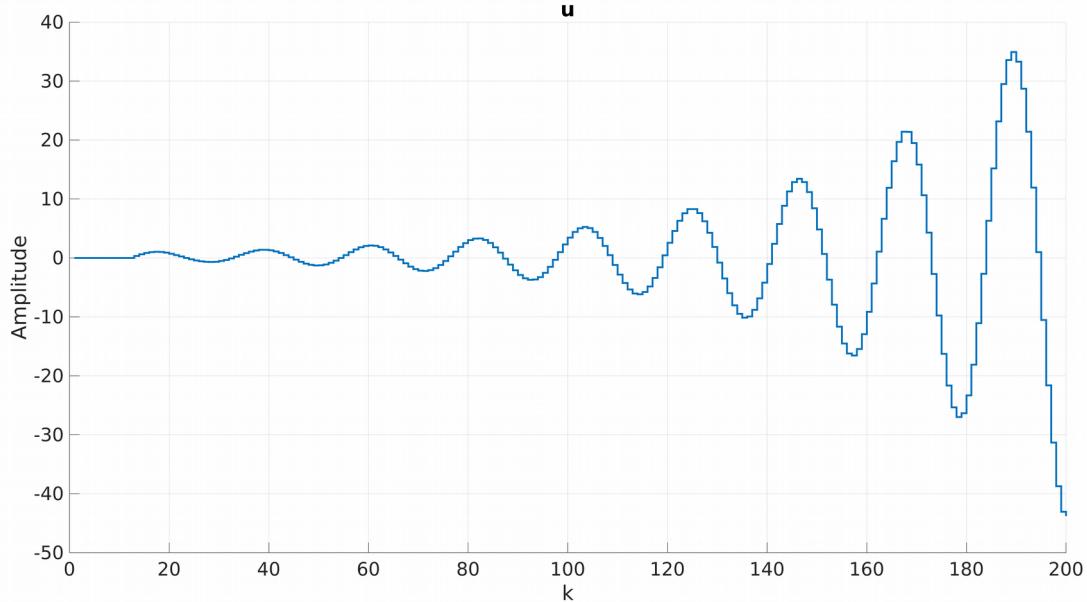
Ilustracja 14: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=15$



Ilustracja 15: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=15$



Ilustracja 16: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=14$



Ilustracja 17: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC o parametrach $N_u=N=14$

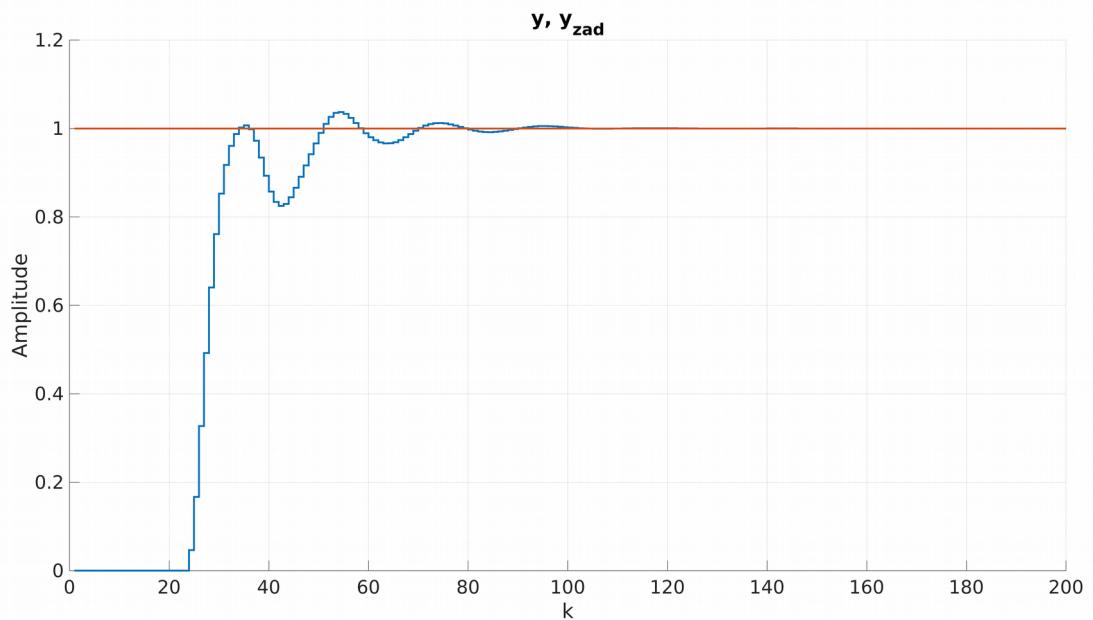
Jak widać na powyższych grafikach horyzont predykcyjny jest bardzo istotnym parametrem w działaniu regulatora DMC. Przy dużych wartościach tego parametru pracuje on stabilnie, wyjście modelu osiąga wartość zadaną w dopuszczalnym czasie, niestety podobnie jak w poprzednim podpunkcie sygnał sterujący potrafi być szybkozmienisty i osiągać duże wartości. Omawiany regulator praktycznie działa w przybliżony sposób dla wartości N od 80 w dół do 18. Jako dowód pokazano przebiegi odpowiedzi skokowych i wartości sterujących dla wartości N równych 40, 20 i 18. Sytuacja zaczyna stawać się ciekawsza dla N=16, kiedy to pojawia się większe przeregulowanie, czas regulacji obiektu w widocznny sposób się wydłuża, a sygnał sterujący przybiera większe wartości. Sytuacja staje się jeszcze gorsza dla N=15 kiedy to regulatorowi bardzo dużo czasu zajmuje osiągnięcie wartości zadanej na wyjściu modelu (jest mało stabilny), a przeregulowanie sięga rekordowo wysokiej wartości równej 0.4. Podobnie jak w poprzednim przypadku tak i tu sygnał sterujący osiąga jeszcze większe wartości. Układ staje się niestabilny i wpada w narastające oscylacje dla horyzontu predykcyjnego równemu 14 (Ilustracje 16, 17).

Z powyższych doświadczeń można wywnioskować, że długi horyzont predykcyjny sprzyja większej stabilności obiektu, jednak nie ma sensu dawać mu zbyt dużej wartości, ponieważ od pewnej wartości N w góre regulator pracuje praktycznie tak samo. Należy jednak pamiętać, by nie był on za krótki, gdyż układ może stać się niestabilny, lub mało stabilny.

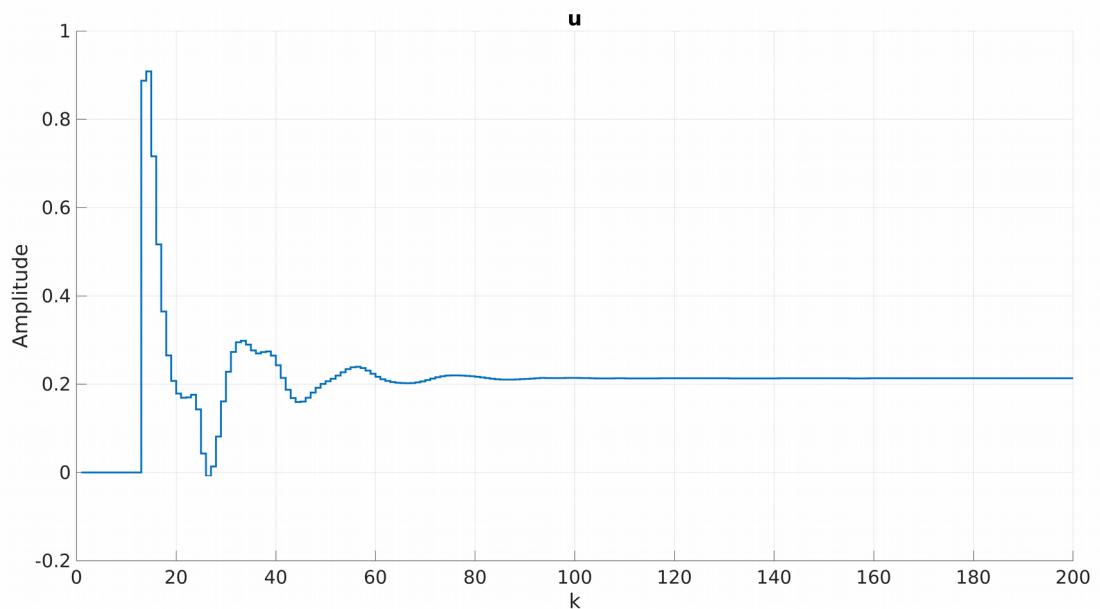
Ostatecznie wybrano N=18, ponieważ jest to prawie że graniczna wartość dla N, przy której układ pracuje w miarę stabilnie i nie wpada w większe oscylacje (np. tak jak w przypadku N=15).

c)

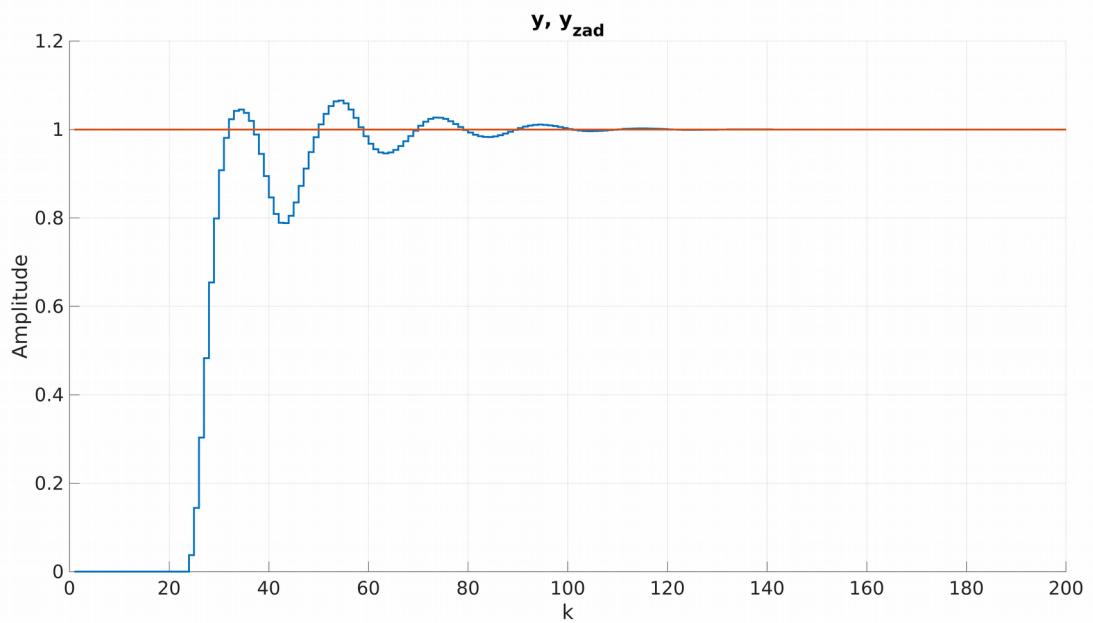
Następnie zbadano wpływ horyzontu sterowania na jakość regulacji. W tym celu przyjęto następujące parametry $D=80$, $N=18$, $\lambda=1$ i przyjmowano kolejno $N_u = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów przedstawiają Ilustracje 13-23. Na wykresach z odpowiedzią skokową układu, czerwonym kolorem oznaczono wartość zadaną, a niebieskim wyjście modelu.



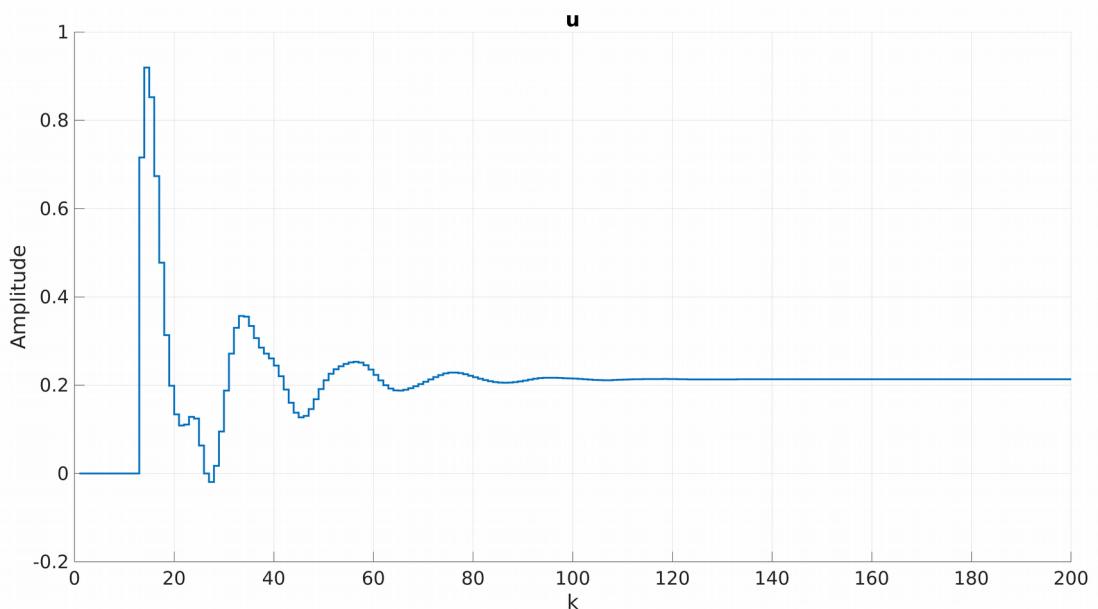
Ilustracja 18: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=1$



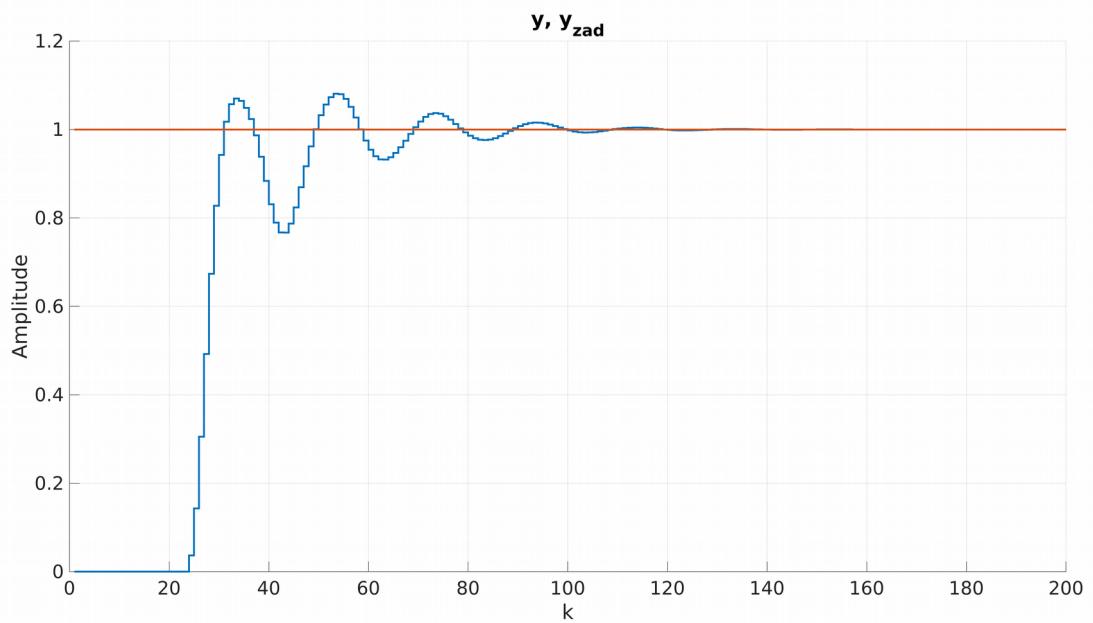
Ilustracja 19: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=1$



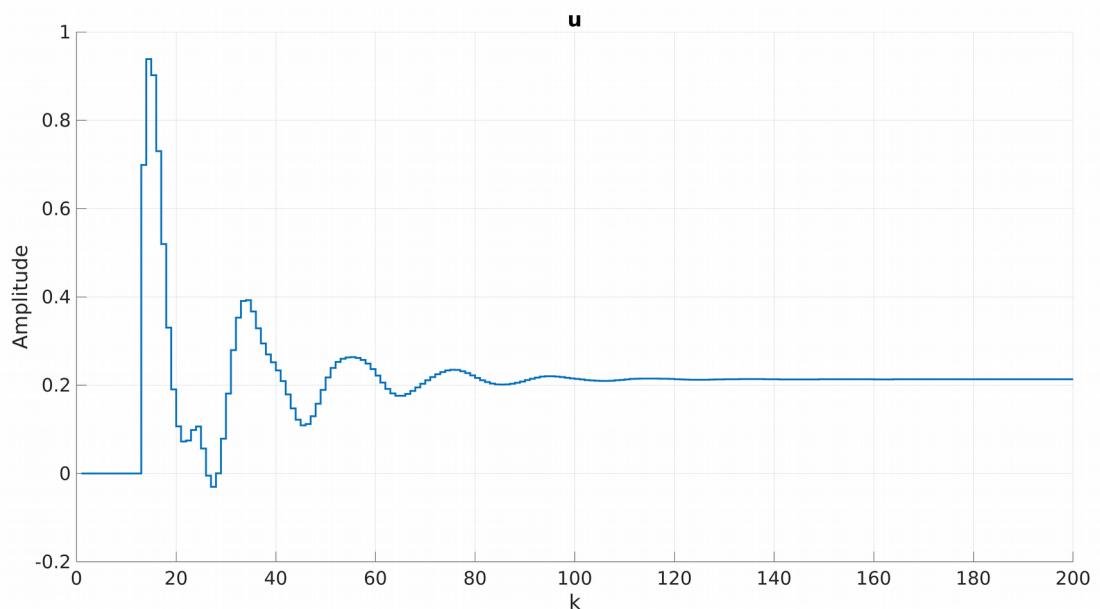
Ilustracja 20: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=2$



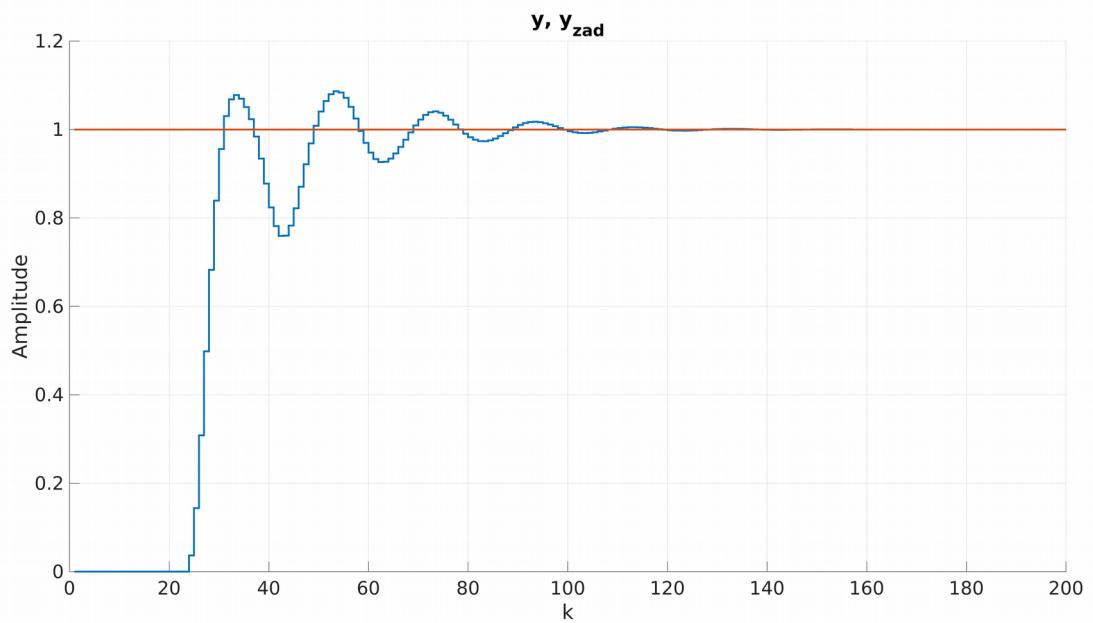
Ilustracja 21: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=2$



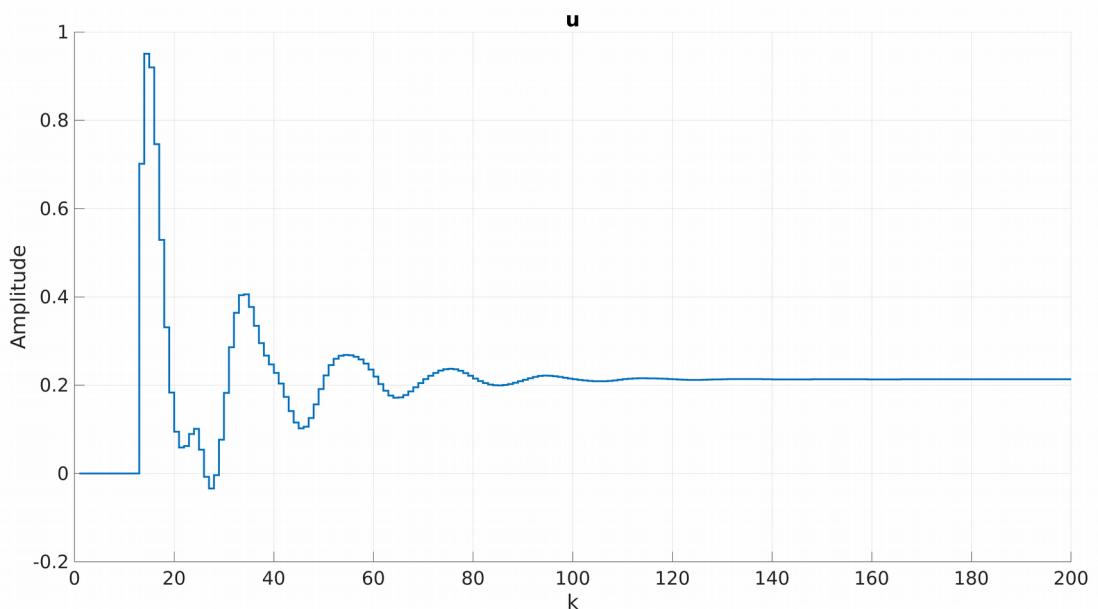
Ilustracja 22: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=3$



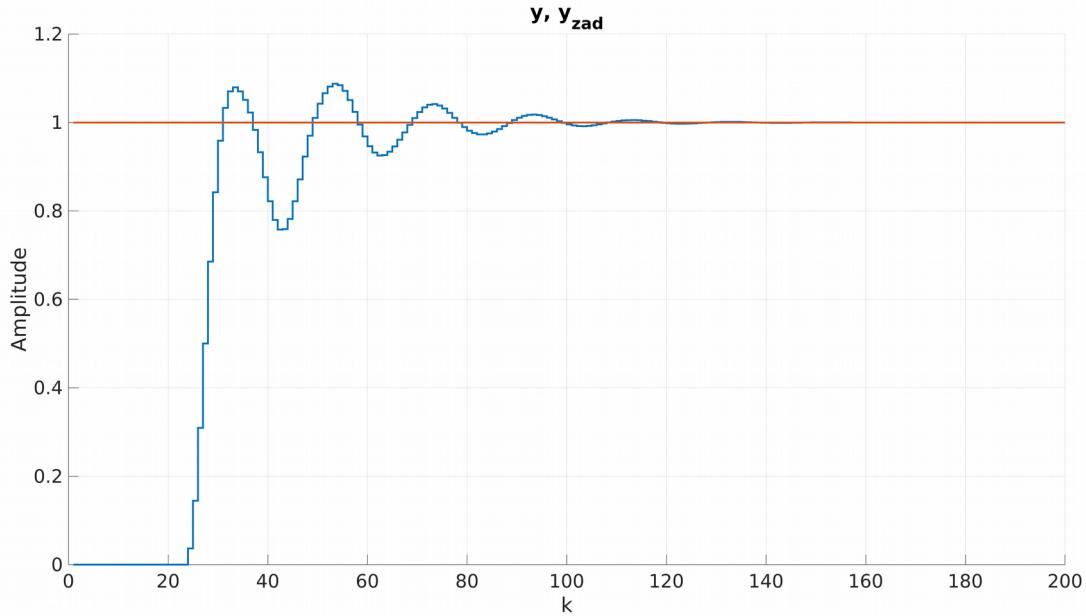
Ilustracja 23: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=3$



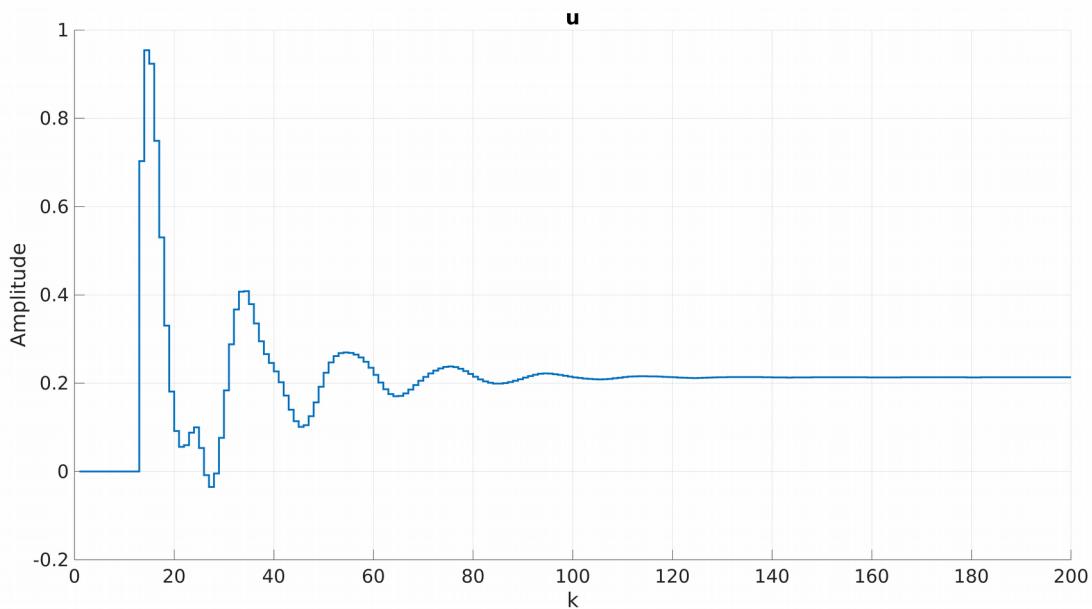
Ilustracja 24: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=4$



Ilustracja 25: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=4$



Ilustracja 26: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=10$



Ilustracja 27: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $N_u=10$

Jak widać na powyższych grafikach regulator DMC pracuje dosyć dobrze dla wybranych wartości N_u . Gdy $N_u=1$ układ dąży do wartości zadanej jeszcze szybciej niż w przypadku gdy $N_u=N$. Można zauważycie także mniejsze przeregulowanie. Niestety wartość sygnału sterującego nadal potrafi zmieniać się o duże wartości w krótkich odstępach czasu. Dla $N_u=2$ przeregulowanie wyjścia układu widocznie się zwiększyło (sięga już wartości 0,2). Natomiast czas, w którym osiągana jest wartość zadana minimalnie się wydłużył. Odnośnie sygnału sterującego jedyna zmiana polega oczywiście na wydłużeniu czasu stabilizacji. Dla $N_u=3$ przeregulowanie ponownie się zwiększyło, a sygnał na wyjściu i sygnał sterujący dłużej się stabilizują. Dla wartości 4 i 10 współczynnika N_u układ pracuje w bardzo zbliżony sposób jak dla $N_u=3$.

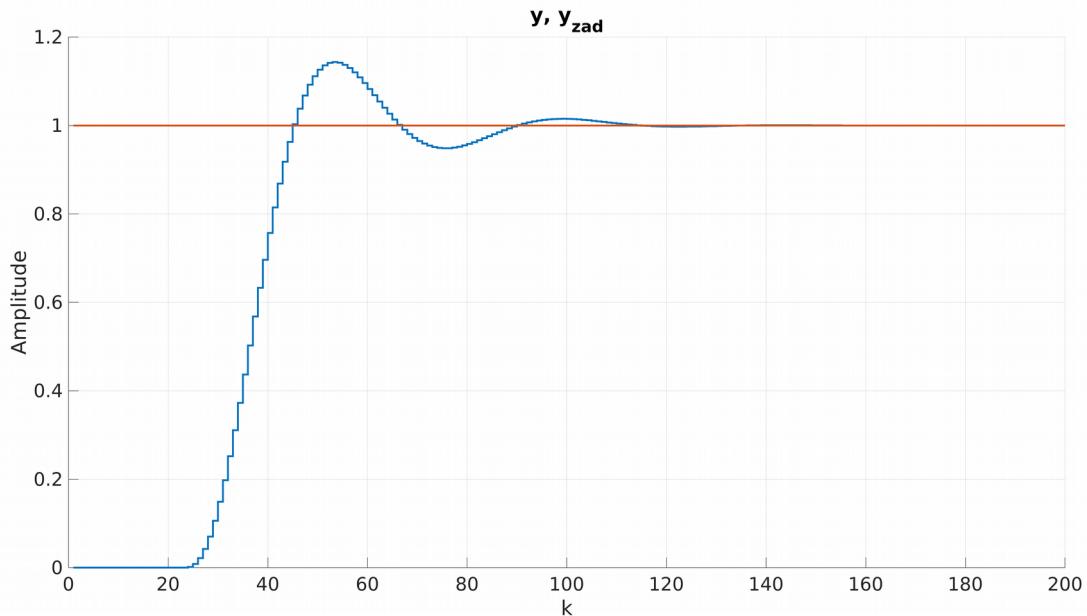
Z powyższych doświadczeń można wywnioskować, że krótki horyzont sterowania sprzyja skróceniu czasu, w jakim osiągana jest wartość zadana oraz czasu, w jakim sygnał sterujący ulega stabilizacji.

Natomiast im dłuższy horyzont sterowania tym dłuższy czas osiągania wartości zadanej (oraz stabilizacji sygnału sterującego) i większe przeregulowanie sygnału na wyjściu. Jednak tendencja ta nie trwa cały czas, ponieważ przy zwiększaniu N_u i przyjmowaniu dla tego parametru wartości 3,4,5 ... , układ pracuje praktycznie tak samo.

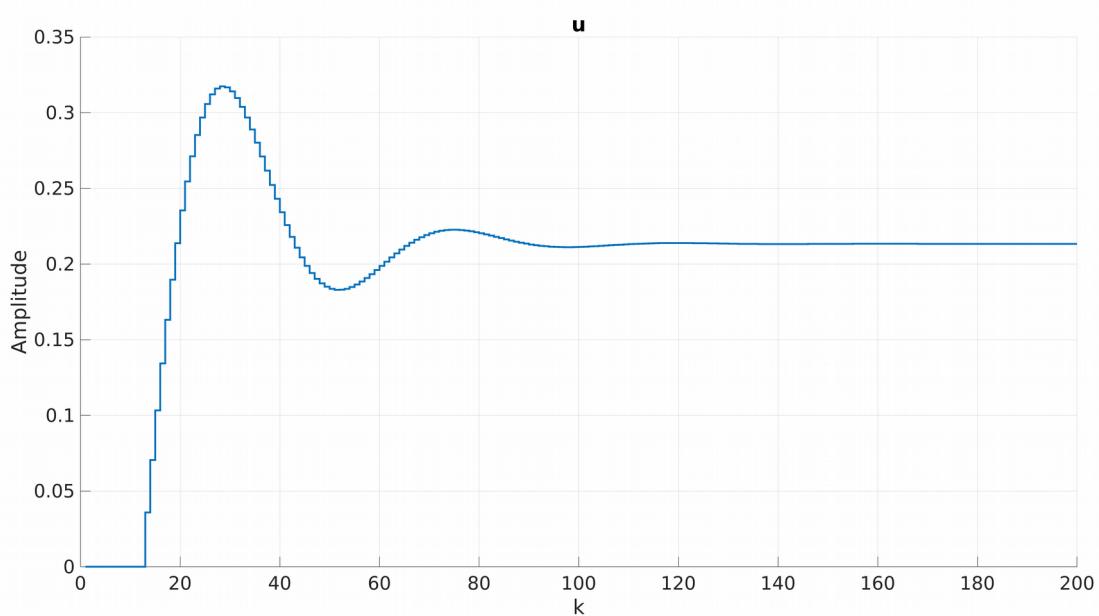
Ostatecznie wybrano $N_u=1$, co też jest możliwe małą długością horyzontu sterowania.

d)

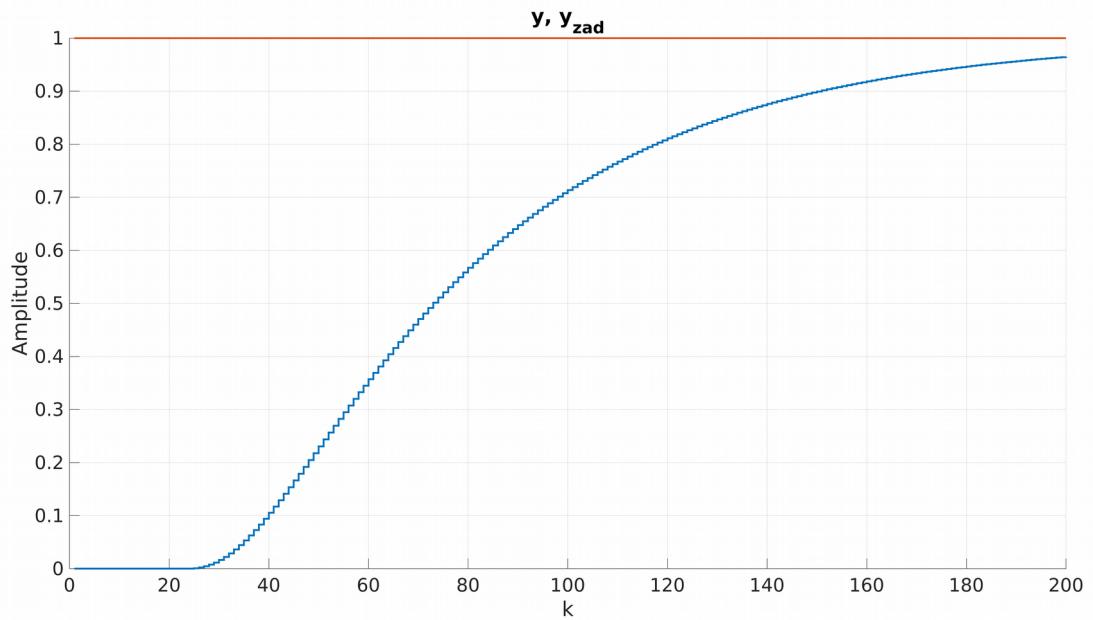
Następnie dla ustalonych horyzontów $N_u=1$, $N=18$, $D=80$ zbadano wpływ współczynnika λ na jakość regulacji. Na wykresach z odpowiedzią skokową układu, czerwonym kolorem oznaczono wartość zadaną, a niebieskim wyjście modelu.



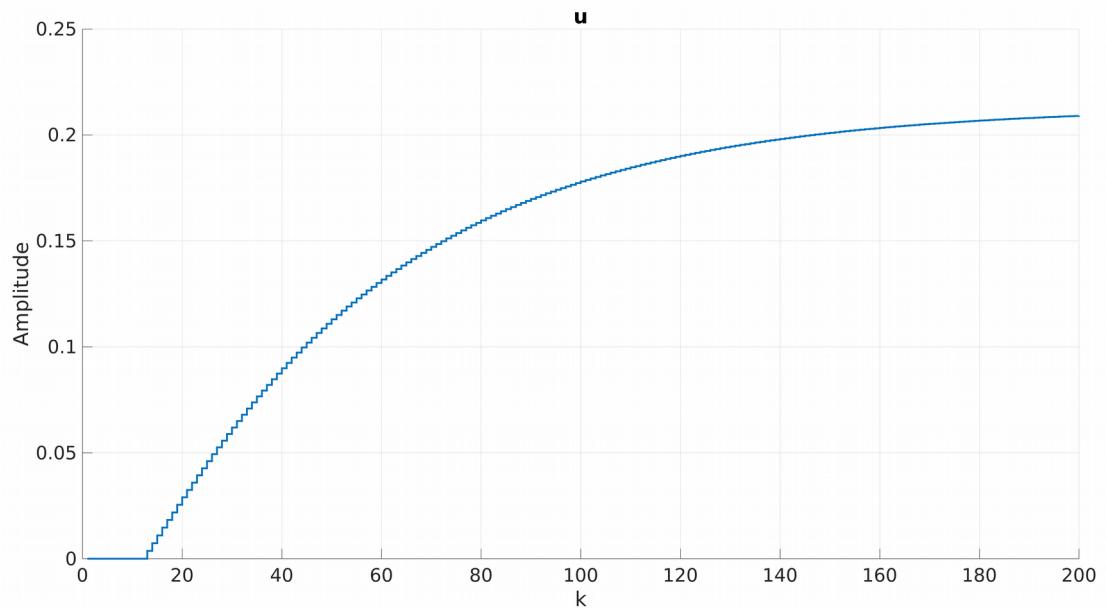
Ilustracja 28: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=100$



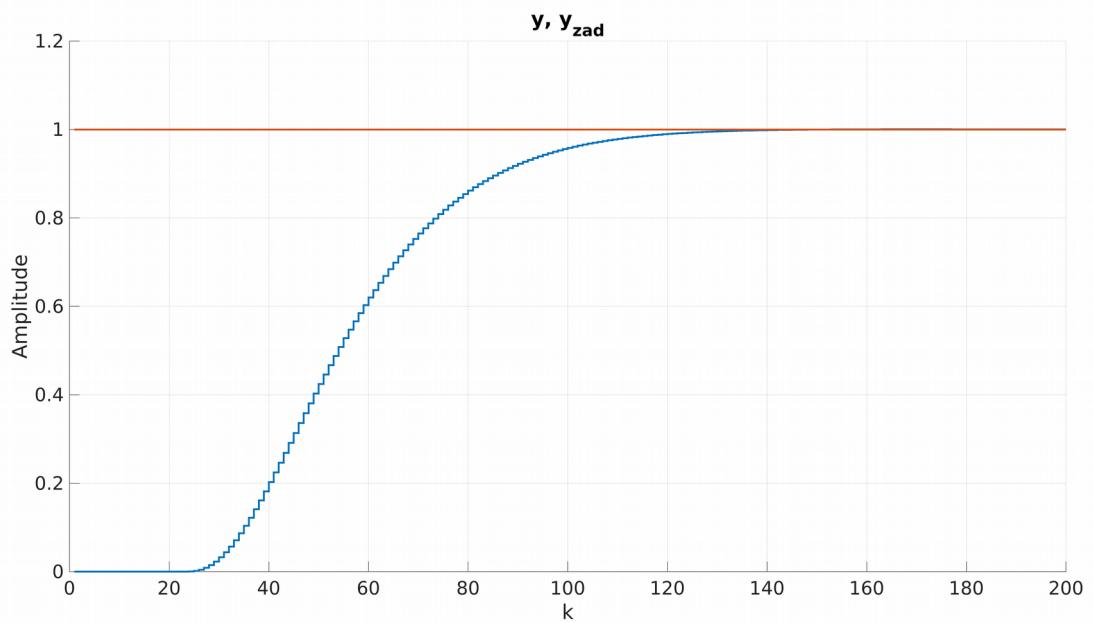
Ilustracja 29: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=100$



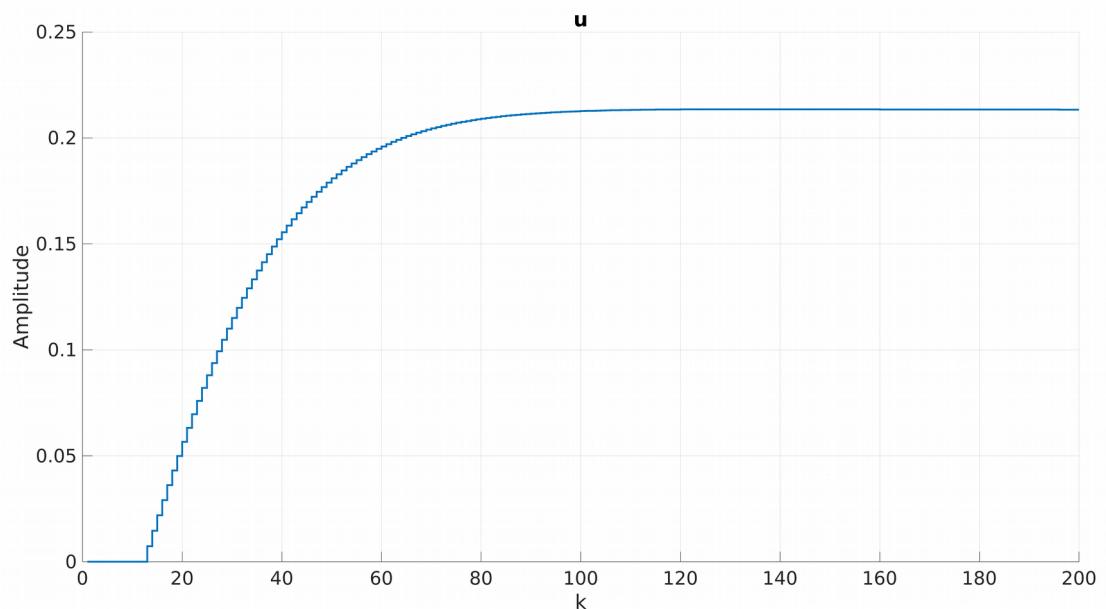
Ilustracja 30: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=1000$



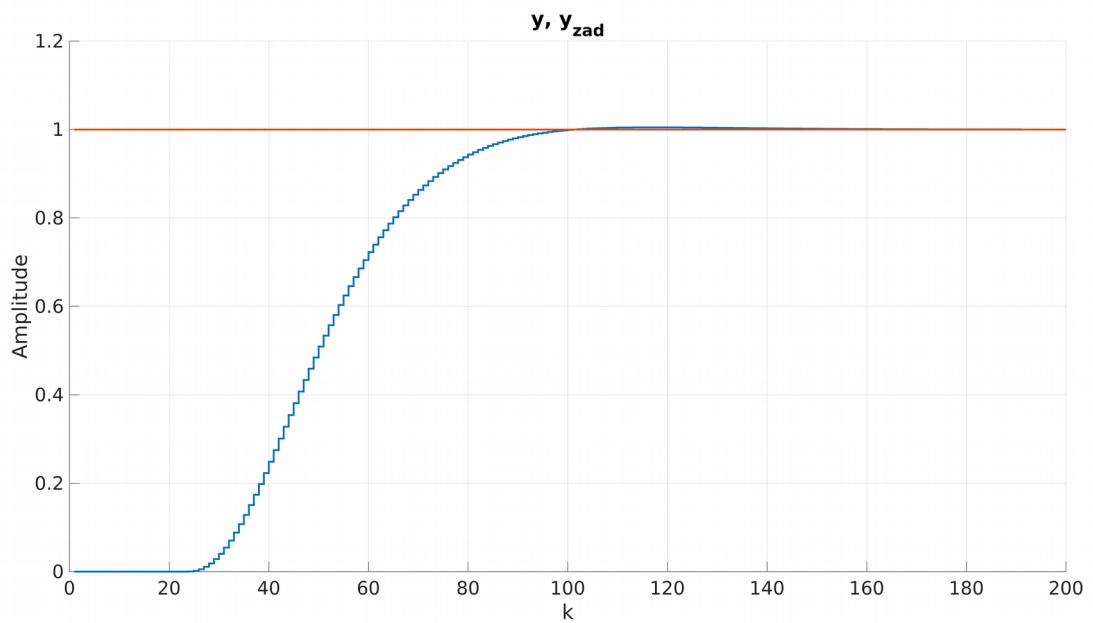
Ilustracja 31: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=1000$



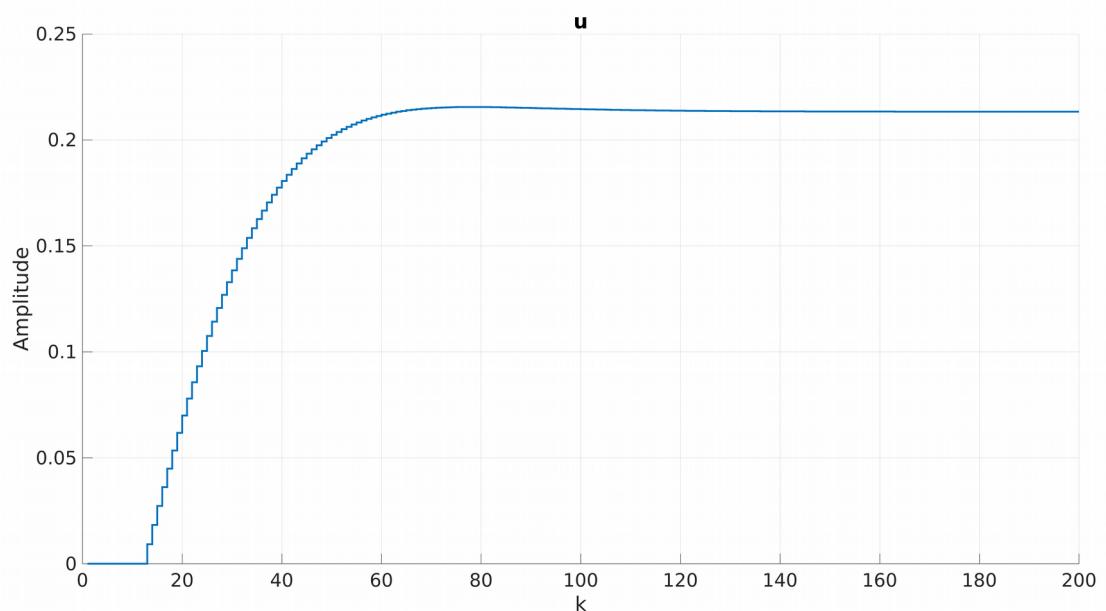
Ilustracja 32: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=500$



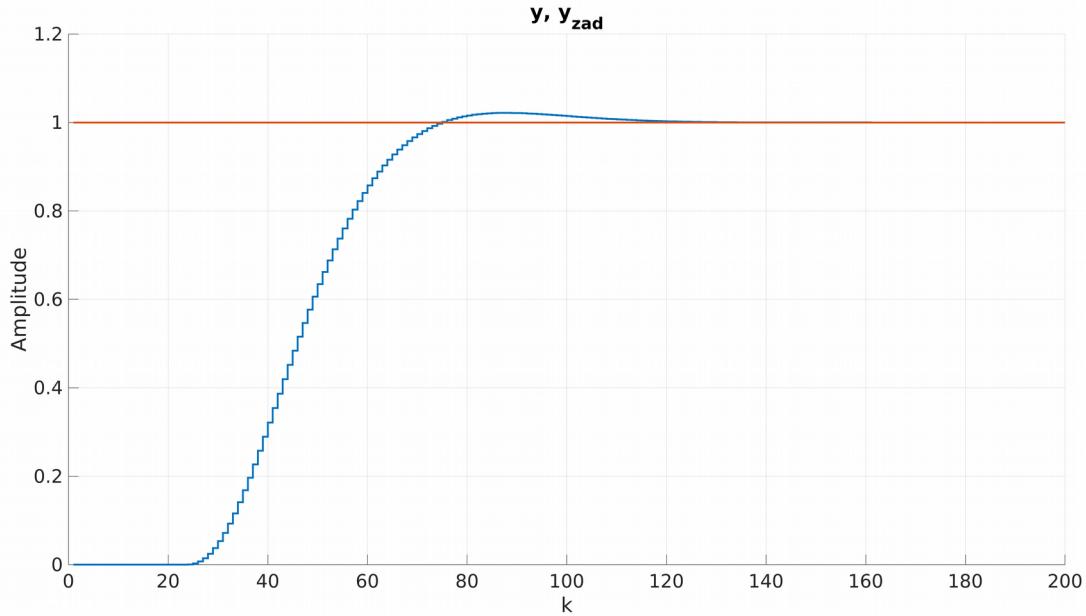
Ilustracja 33: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=500$



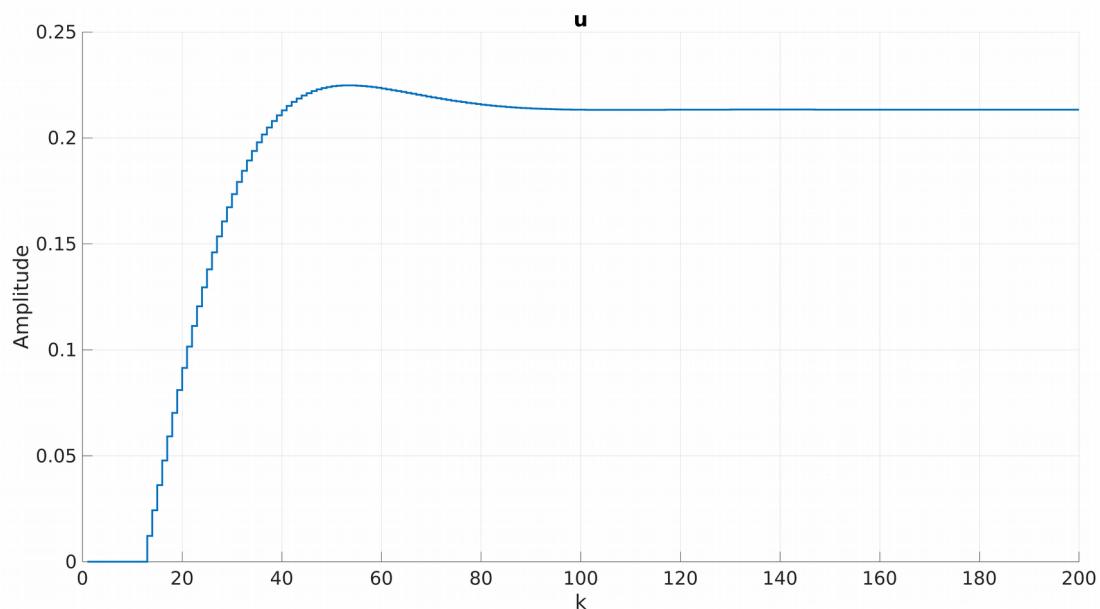
Ilustracja 34: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=400$



Ilustracja 35: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=400$



Ilustracja 36: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=300$



Ilustracja 37: Sterowanie obiektu z regulatorem DMC dla $\lambda=300$

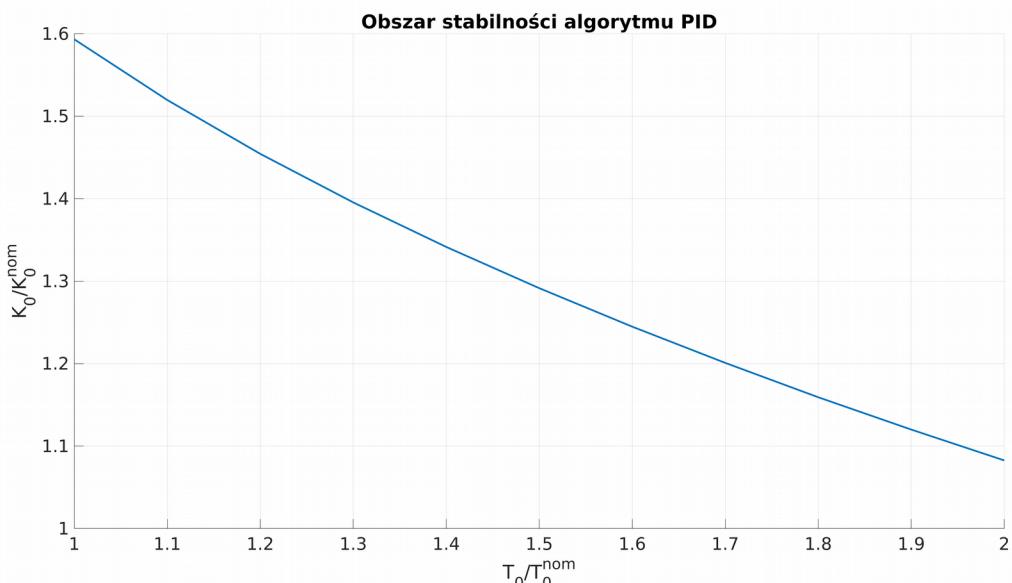
Jak widać na powyższych grafikach parametr λ ma bardzo duży wpływ na jakość sterowania. Początkowo zmieniano λ o rząd wielkości, a następnie zmieniano w obrębie przedziału 100-1000. Dla $\lambda=100$ układ oscyluje dużo mniej niż dla $\lambda=1$. Przeregulowanie także jest mniejsze a sygnał sterujący przyjmuje mniejsze wartości i wolniej się zmienia w czasie. Dla $\lambda=1000$ układ bardzo powoli dąży do wartości zadanej. Przeregulowanie tu nie występuje, a sygnał sterujący przyjmuje małe wartości i bardzo wolno się zmienia. Dla $\lambda=500$ układ szybciej dąży do wartości zadanej jednak nadal jest bardzo wolny. Nie występuje tu przeregulowanie, a sterowanie nadal narasta dosyć powoli (aczkolwiek już szybciej). Dla $\lambda=400$ obiekt już szybciej osiąga wartość zadaną. Nie występuje tu praktycznie przergulowanie, a sygnał sterujący narasta z szybkością w granicach przyzwoitości. Dla $\lambda=300$ już występuje przeregulowanie (choć nieduże). Sygnał sterujący dosyć szybko zmienia się tu w czasie. Aby zapewnić właściwy kompromis między szybkością regulacji a postacią sygnału sterującego wybrano $\lambda=400$.

Z powyższych doświadczeń można wywnioskować, że im większy parametr λ tym występują mniejsze zmiany sterowania oraz sygnał na wyjściu układu wolniej dąży do wartości zadanej. Należy też pamiętać, że przeregulowanie wówczas coraz bardziej zanika, a cały układ jest coraz bardziej stabilny.

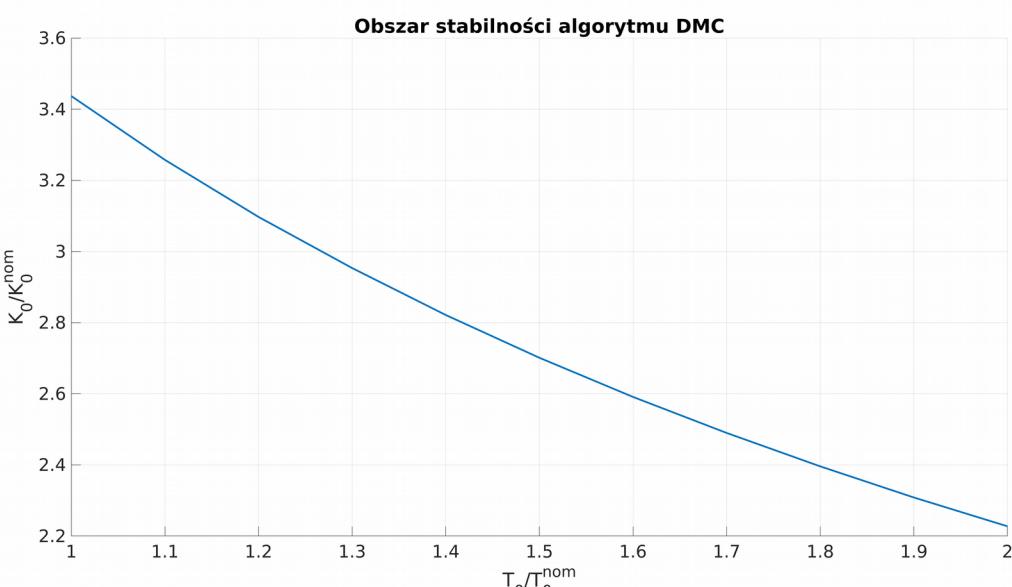
Skrypty umożliwiające realizację zadania nr 5 znajdują się w plikach: zad5_a.m (podpunkt a), zad5_b.m (podpunkt b), zad5_c.m (podpunkt c), zad5_d.m (podpunkt d).

Zad nr 6

Przy skokowej zmianie wartości zadanej porównano jakość regulacji cyfrowego algorytmu PID dostrojonego metodą Ziegler-Nicholsa i algorytmu DMC dostrojonego w poprzednim punkcie. Wyznaczono w tym celu obszary stabilności obu algorytmów, tzn. krzywą K_0 / K_0^{nom} w funkcji $T_0 / T_0^{\text{nom}} = \{1 ; 1,1 ; 1,2 ; 1,3 ; 1,4 ; 1,5 ; 1,6 ; 1,7 ; 1,8 ; 1,9 ; 2\}$.



Ilustracja 38: Krzywa K_0 / K_0^{nom} w funkcji T_0 / T_0^{nom} dla algorytmu PID



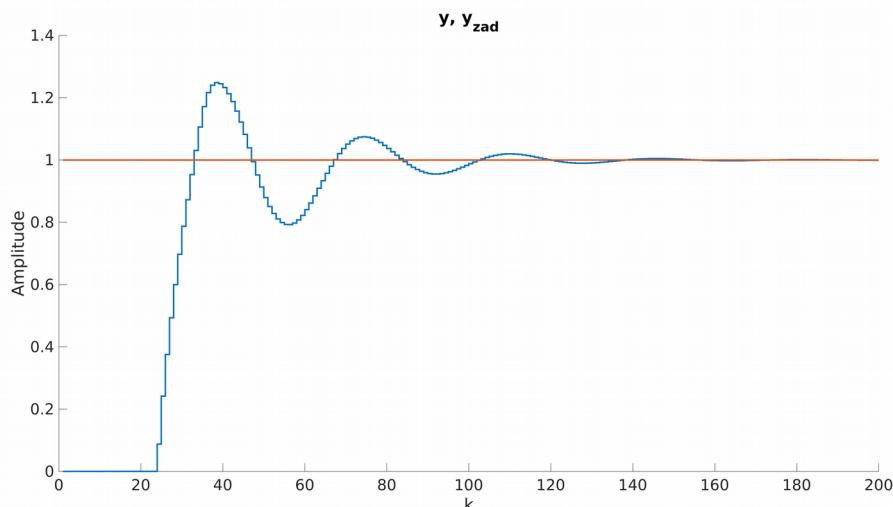
Ilustracja 39: Krzywa K_0 / K_0^{nom} w funkcji T_0 / T_0^{nom} dla algorytmu DMC

Powyzsze wyniki uzyskano drogą eksperymentalną. Odpowiednio wydłużano T_0 , a następnie dobierano (metodą prób i błędów) odpowiednie K_0 tak by układ (obiekt wraz z regulatorem) wpadł w niegaszące oscylacje (tzn był na granicy stabilności). Użyto tutaj następujących skryptów: zad6_PID.m , zad6_DMC.m , zad6_wykresy.m .

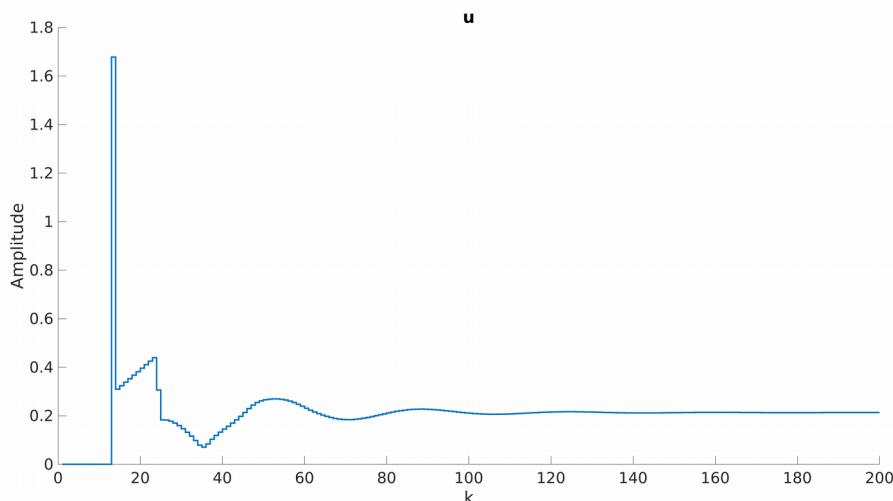
Podczas eksperymentów okazało się, że zwiększenie opóźnienia obiektu powoduje zmniejszenie tolerancji regulacji na wielkość wzmocnienia statycznego obiektu. Wskazuje na to także malejący charakter funkcji na Ilustracjach 38 i 39.

Na Ilustracjach 38 i 39 wyraźnie widać, że algorytm DMC jest dużo bardziej stabilny i odporny na zmiany obiektu. Można to wywnioskować z faktu, że regulator predykcyjny zachowuje stabilność przy dużo większych wartościach wzmocnienia statycznego obiektu K_0 (dla kolejnych wartości T_0) niż regulator PID. Przy zastosowaniu algorytmu PID trzeba uważać na zmiany obiektu, gdyż układ może bardzo łatwo stracić stabilność. Zaobserwowany wynik eksperymentów wynikać może z faktu, że regulator DMC bazuje zarówno na wyjściu obiektu jak i modelu obiektu (uzyskanym na podstawie odpowiedzi skokowej). Może zatem dużo sprawniej wyregulować proces, nawet różniący się parametrami od modelu, niż regulator PID bazujący tylko na różnicy wyjścia modelu i wartości zadanej.

Dodatkowo porównano jeszcze odpowiedzi skokowe i wartości sygnału sterującego dla dyskretnego regulatora PID (Ilustracja 40 i 41) oraz DMC (Ilustracja 35 i 34).



Ilustracja 40: Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem PID



Ilustracja 41: Sterowanie obiektu z regulatorem PID

Jak widać zaprojektowany regulator PID cechuje się dużo większym przeregulowaniem, mniejszą stabilnością i dłuższym czasem, po którym osiągana jest wartość zadana. Natomiast wartości sygnału sterującego potrafią dosyć gwałtownie się zmieniać, co też w charakterystykach regulatora DMC dostrojonego w zad nr 5, nie występowało. Działanie regulatora PID możnaby spróbować polepszyć, zmieniając jego nastawy metodą prób i błędów.

Przechodząc do wniosków należy pamiętać, że jeśli dysponujemy modelem sterowanego obiektu np. w postaci kolejnych próbek odpowiadzi skokowej, warto jest skorzystać z regulatora DMC. Dzięki użyciu modelu jest on w stanie przewidzieć zachowanie obiektu i oprzeć na tym wartość sygnału sterującego. Potrafi dużo lepiej wyregulować proces, a na dodatek jest wytrzymalszy na pewne zmiany zachodzące w obiekcie (jak np.: wydłużenie czasu opóźnienia, lub zwiększenie wzmacnienia statycznego). Z pewnością jest dużo stabilniejszy od regulatora PID, bazującego tylko na różnicy wyjścia obiektu i wartości zadanej.