

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego
nr 1, zadanie nr 7

Autorzy:
Grochowina Mauteusz
Winnicki Konrad
Zgorzelski Jan

Warszawa, 19 marca 2019

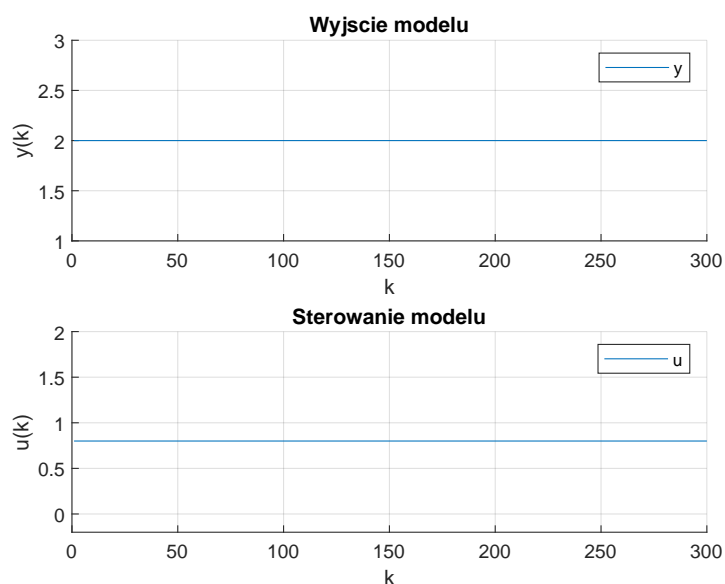
Spis treści

1. Projekt	2
1.1. Sprawdzenie poprawności wartości U_{pp} , Y_{pp}	2
1.2. Symulacyjne wyznaczenie odpowiedzi skokowej procesu	2
1.3. Przekształcenie otrzymanej odpowiedzi skokowej	4
1.4. Cyfrowy algorytm PID i DMC	4
1.4.1. Algorytm PID	4
1.4.2. Algorytm DMC	5
1.5. Dobór parametrów regulatorów PID i DMC	6
1.5.1. Regulator PID	6
1.5.2. Regulator DMC	9
1.6. Minimalizacja wskaźnika jakości regulacji	12
2. Laboratorium	13
2.1. Temperatura obiektu w punkcie pracy	13
2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowej procesu	13
2.3. Przekształcenie otrzymanej odpowiedzi skokowej	13
2.4. Cyfrowy algorytm PID i DMC	13
2.5. Dobór parametrów algorytmów PID i DMC	13

1. Projekt

1.1. Sprawdzenie poprawności wartości U_{pp} , Y_{pp}

Przeprowadzono symulację odpowiedzi procesu dla punktu pracy. Ustalono stałe sterowania o wartości $U_{pp} = 0,8$. Wynik: Uzyskane wyjście procesu jest stałe i wynosi $Y_{pp}=2,0$.

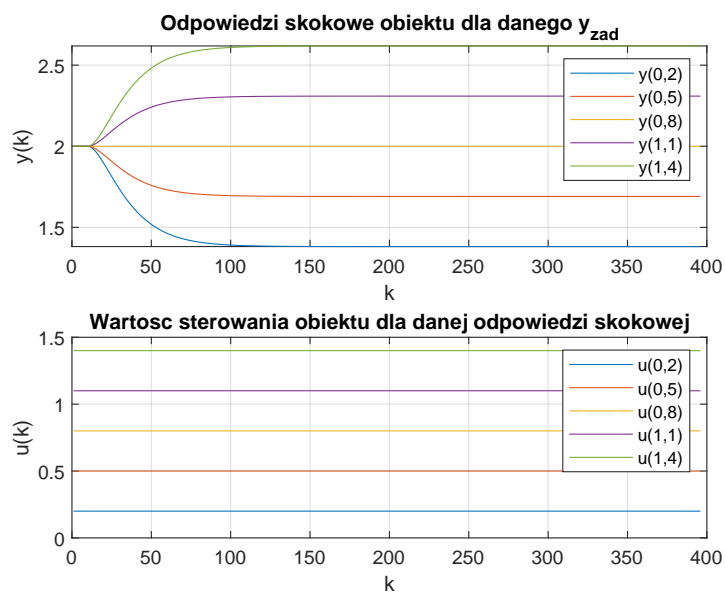


Rys. 1.1. projekt/zad1/y.pdf

Wniosek: Stała wartość wyjścia oznacza poprawność wartości U_{pp} i Y_{pp} .

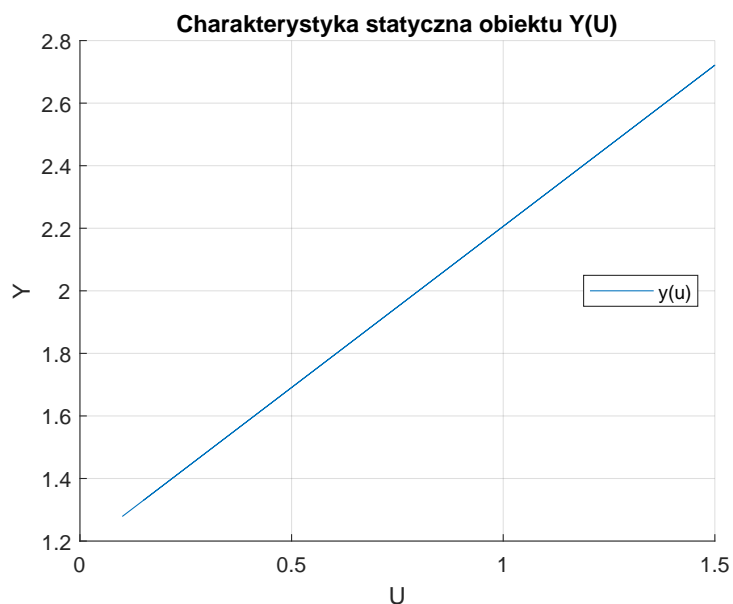
1.2. Symulacyjne wyznaczenie odpowiedzi skokowej procesu

Odpowiedzi skokowych procesu zostały wyznaczone symulacyjnie dla pięciu zmian sygnału sterującego. Uwzględnione zostały ograniczenia wartości tego sygnału $U_{min}=0,1$, $U_{max}=1,5$. Początkowa wartość sterowania wynosiła $U_{pp}=0,8$.



Rys. 1.2. odpSkok

Dzięki uzyskanym odpowiedziom skokowym otrzymano charakterystykę statyczną $y(u)$



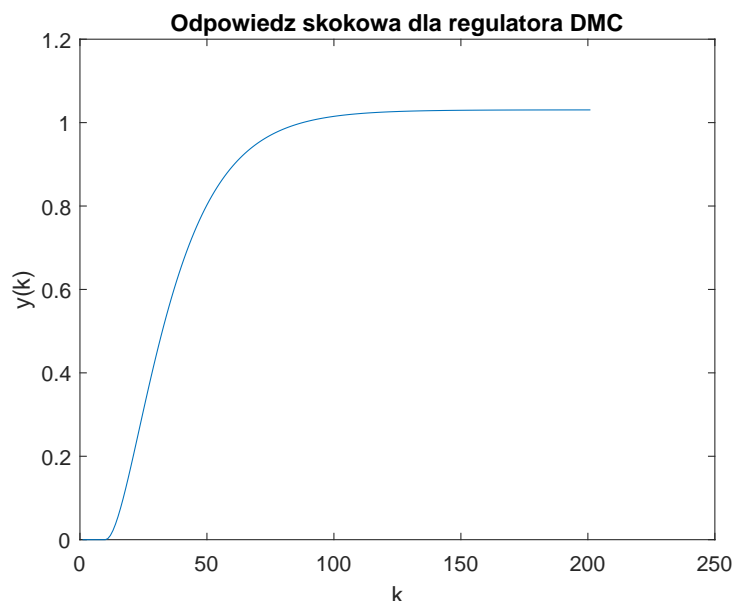
Rys. 1.3. char stat

Wniosek: Na podstawie wykresu charakterystyki statycznej można ustalić, że właściwości statyczne procesu są liniowe. Wzmocnienie statyczne procesu określone zostało dzięki obliczeniu współczynnika nachylenia wykresu charakterystyki statycznej, wynosi on $K=1,0305$.

1.3. Przekształcenie otrzymanej odpowiedzi skokowej

Uzyskaną odpowiedź procesu na zmianę sygnału sterującego z punktu pracy $U_{pp}=0,8$ na $U_{max}=1,5$ przekształcono w następujący sposób: -Ograniczono (przycięto) czas zmiany sterowania u oraz wyjścia y od chwili skoku do ustabilizowania. -Wykres sterowania u przesunięty został o wartość początkową $U_{pp}=0,8$ w dół -Wykres wyjścia y przesunięty został o wartość początkową $Y_{pp}=2$ w dół -Wykres sterowania u i wyjścia y podzielono przez $\Delta u=0,7$

Uzyskana odpowiedź skokowa daje nam zestaw liczb s_1, s_2, \dots , która wykorzystana będzie w algorytmie DMC.



Rys. 1.4. s

1.4. Cyfrowy algorytm PID i DMC

1.4.1. Algorytm PID

Regulator PID to regulator składający się z 3 członów: proporcjonalnego P o wzmocnieniu, kompensuje uchyb bieżący całkującego I o czasie zdwojenia, kompensuje akumulację uchybów z przeszłości różniczkującego D o czasie wyprzedzania kompensuje przewidywane uchyby w przyszłości. Ważona suma tych trzech działań stanowi podstawę sygnału podawanego na człon wykonawczy w celu regulacji procesu (np. zmiana położenia zaworu regulacyjnego albo zwiększenie mocy grzejnika).

Regulator realizuje algorytm:

gdzie $u(k)$ – sygnał wyjścia regulatora, $e(k)$ – uchyb regulacji. Transmitancja regulatora PID

W realizacji naszego zadania wykorzystany był dyskretny regulator PID. Sterowanie regulatora wyznaczane było z poniższych wzorów, które zostały otrzymane dzięki metodzie Eulera i całkowania metodą trapezów:

gdzie

Gdzie T – okres próbkowania, $e(k)$ – uchyb w chwili k , $u(k-1)$ – sterowanie od członu różniczkującego w chwili $k-1$.

1.4.2. Algorytm DMC

Algorytm DMC (Dynamic Matrix Control) algorytm regulacji predykcyjnej. Do predykcji wykorzystuje się model procesu w postaci odpowiedzi skokowych.

(wstaw obrazek od maruboya z doktoratu o dmc) W algorytmie DMC dynamika obiektu regulacji modelowana jest dyskretnymi odpowiedziami skokowymi, które opisują reakcję wyjścia na skok jednostkowy sygnału sterującego.

Algorytm DMC w wersji analitycznej (bez ograniczeń) W algorytmie DMC, każdej chwili k (iteracji) wyznacza się ciąg przyszłych przyrostów sygnału sterującego wielkości w wyniku minimalizacji wskaźnika jakości

W celu wyprowadzenia prawa regulacji warto zastosować zapis wektorowo-macierzowy: Definiujemy wektory o długości N oraz wektor o długości 1 . Następnie definiujemy macierze kwadratowe: A - o wymiarach $N \times N$ - o wymiarach x

Wtedy funkcję kryterialną zapisać można w postaci:

Ponieważ prognozowana trajektoria wyjścia jest sumą składowej swobodnej i wymuszonej, w zapisie wektorowym: $y = A^k x + B^k u$, gdzie wektory te mają długość N Podstawiając do funkcji kryterialnej otrzymujemy:

Do predykcji wyjścia w algorytmie DMC stosuje się model procesu w postaci skończonej odpowiedzi skokowej. Oznacza to, że wektory oraz wyznaczane są na podstawie współczynników a_i , b_i , da Składowa swobodna wyjścia w postaci wektorowej:

gdzie macierz ma wymiarowość $N \times (D-1)$

Górny indeks „P” macierzy wprowadzono w tym celu, aby podkreślić fakt, że określa ona predykcję wyjścia w zależności jedynie od przeszłych przyrostów sterowania. Dla każdego elementu przy zachodzi

Składowa wymuszona wyjścia w postaci wektorowej:

Wykorzystując powyższe równania otrzymujemy:

Zakłada się, że i czyli i . Oznacza to, że funkcja kryterialna jest ściśle wypukła. Przyrównując do zera wektor gradientu trzymuje się wektor optymalnych przyrostów sterowania:

gdzie K jest macierzą o wymiarowości. Macierz K wyznaczana jest jednokrotnie w trakcie projektowania algorytmu (ang. off-line).

Ponieważ macierz drugich pochodnych jest dodatnio określona, a więc uzyskane rozwiązanie problemu optymalizacji bez ograniczeń jest rzeczywiście minimum globalnym funkcji kryterialnej

Parametry algorytmu DMC Horyzont dynamiki

Horyzont dynamiki jest to liczba współczynników odpowiedzi skokowej, tzn. liczbę kroków dyskretyzacji, po której można uznać odpowiedź skokową za stabilną równą Dla badanego obiektu ta wartość wyniosła Wyznaczona ona została z odpowiedzi skokowej obiektu poprzez wyznaczenie z niej chwili, w której odpowiedź jest stabilna.

Horyzont predykcji

Horyzont predykcji jest to wartość na podstawie, której prognozuje się zachowanie modelu. Zwiększając ten parametr uzyskaliśmy bardzo dobry czas regulacji oraz praktycznie zerowe przesterowanie. Wynika z tego, że jest to ważny parametr i dzięki zwiększeniu go uzyskaliśmy predykcję większej ilości chwil do przodu.

Horyzont sterowania

Horyzont sterowania tak jak horyzont predykcji jest parametrem dostrajania regulatora, zależnymi od szybkości dynamiki procesu, możliwości obliczeniowych oraz dokładności modelu. Zwiększając ten parametr zbliżyliśmy się jego wartością do horyzontu predykcji co spowodowało pogorszenie działania regulatora, wynika z tego, że wartość horyzontu sterowania powinna być znacznie mniejsza od wartości horyzontu predykcji.

Współczynnik kary λ (znaczek wstaw)

Ostatnim krokiem w dostrajaniu naszego regulatora było wyznaczenie współczynnika kary λ (wstaw znaczek), za pomocą którego można zapewnić kompromis pomiędzy szybkością regulacji a postacią sygnału sterującego. Ponownie był on wyznaczany metodą testowania.

Zwiększenie współczynnika kary pogorszyło wynik działania regulatora, ustawienie go na dużo większą wartość od horyzontów nie jest dobrym rozwiązaniem, należy utrzymywać jego wartości poniżej powyższych parametrów.

1.5. Dobór parametrów regulatorów PID i DMC

Ocena jakości regulacji na podstawie rysunków przebiegów sygnałów polega na ocenie jakościowej, analizowane są takie kryteria jak czas regulacji czy przeregulowanie. Na podstawie tych kryteriów oceny dobierane są nastawy regulatora PID.

Ocena jakości regulacji ilościowa polega na wyznaczaniu wskaźnika jakości regulacji, którym jest suma kwadratów uchybów.

kkonc

$$E = \sum_{k=1}^{kkonc} (y_{zad}(k) - y(k))^2$$

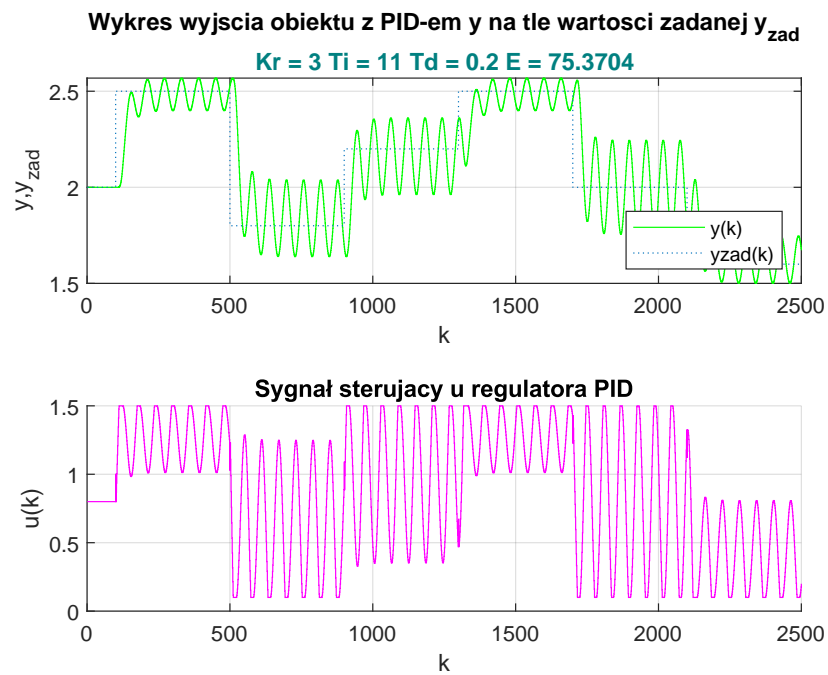
k=1

gdzie kkonc oznacza koniec symulacji (zawsze taki sam).

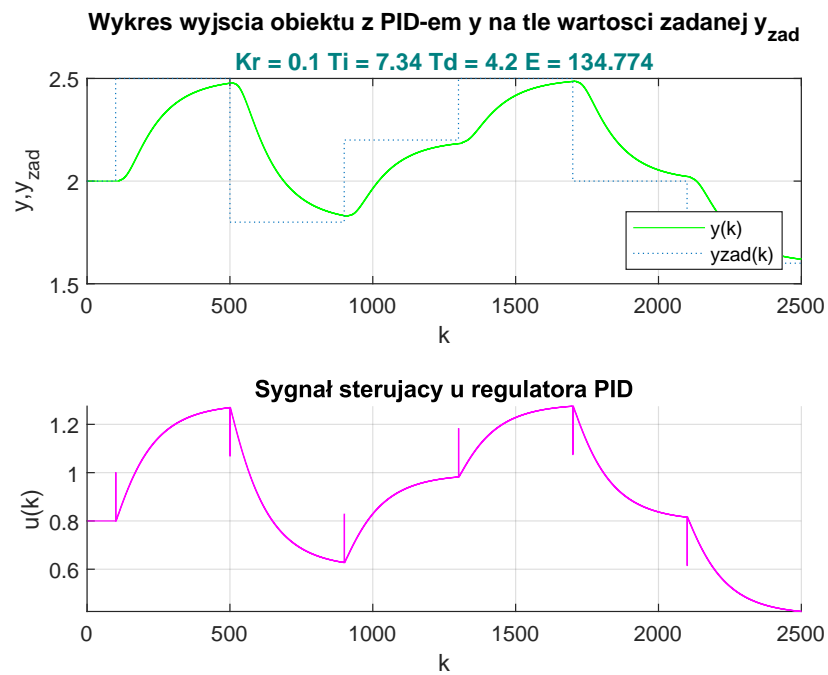
Ocena jakości regulacji jakościowa jest metodą mniej dokładną od oceny ilościowej, nie występują tam obliczenia a jedynie analiza rysunków przebiegów. Podczas analizy rysunku osoba oceniająca jakość regulacji narażona jest na mało precyzyjne wnioski, gdyż należy wtedy zwracać uwagę na skalę rysunku i wiele innych parametrów. Ocena ilościowa nie bierze pod uwagę takich czynników jak np. oscylacje, jedynym kryterium jest suma kwadratów uchybów. Jeżeli do oceny jakości regulacji wymagane są inne kryteria niż podany wskaźnik jakości należy rozpatrzyć metodę oceny jakościowej.

1.5.1. Regulator PID

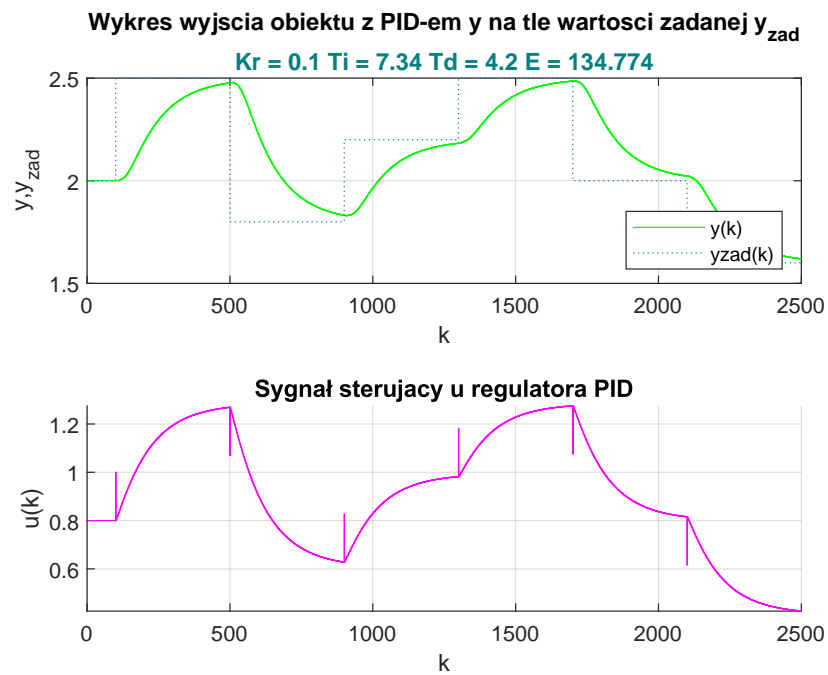
Do doboru nastaw regulatora PID zastosowano metodę inżynierską, która polega na przeprowadzeniu doświadczeń i analizy uzyskanych wyników. Na podstawie wyciągniętych wniosków modyfikowane są nastawy regulatora. Parametry dobierane są metodą prób i błędów, aż do osiągnięcia oczekiwanych wyników. Jako pierwszy dobierany był parametr wzmocnienia członu proporcjonalnego, poprzez obserwację zachowania się uchybu regulacji w stanie ustalonym oraz przeregulowanie. Zmniejszając stopniowo wzmocnienie zmniejszano przeregulowanie, a uchyb zwiększał się. Parametr zwiększając go co likwidowało uchyb regulacji, zbyt duży czas zdwojenia zwiększał czas regulacji. Ostatnim elementem strojenia jest wyznaczenie parametru czasu wyprzedzenia, również metodą prób i błędów, tak by zminimalizować czas regulacji. Po wykonaniu tej czynności kończy się proces strojenia regulatora.



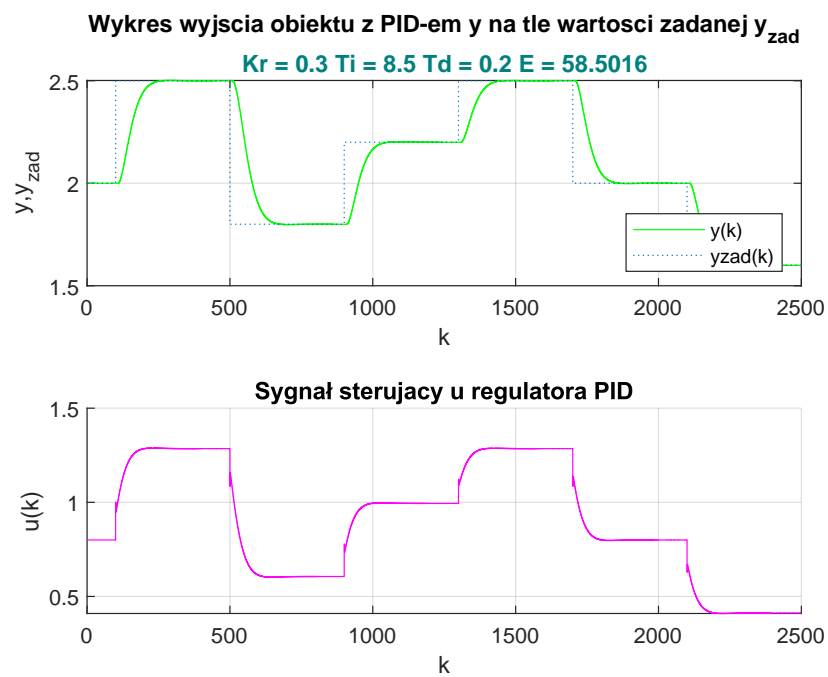
Rys. 1.5. PID1



Rys. 1.6. PID2



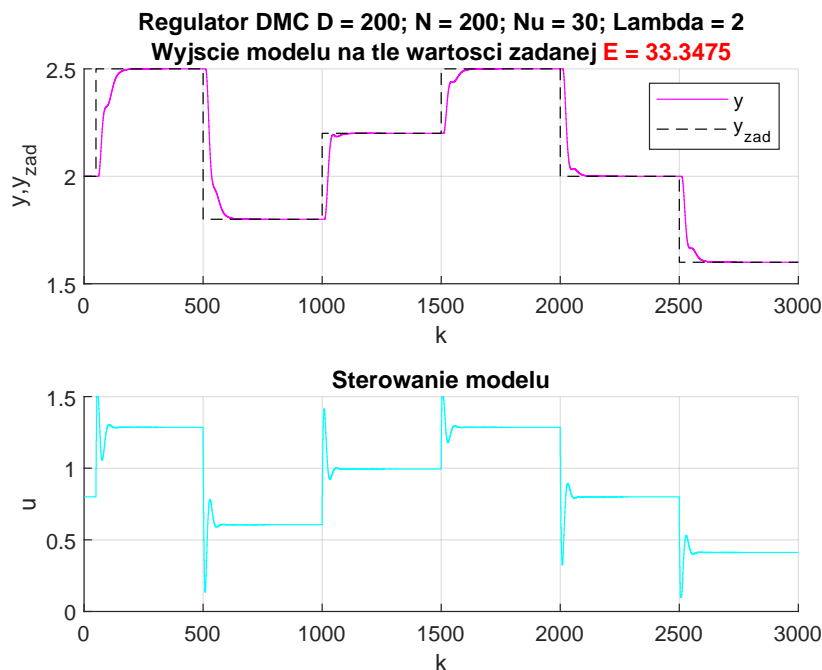
Rys. 1.7. PID2



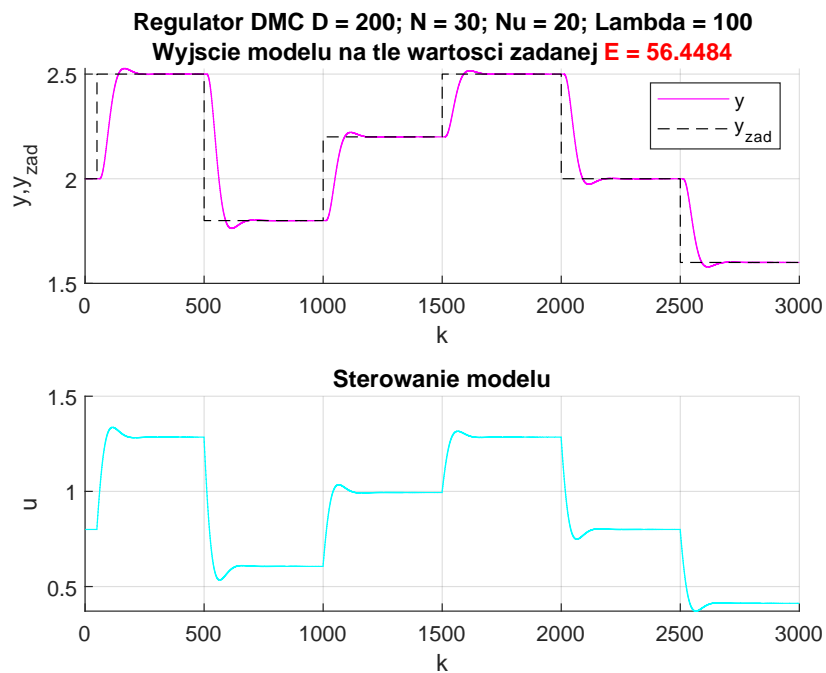
Rys. 1.8. PIDbest

1.5.2. Regulator DMC

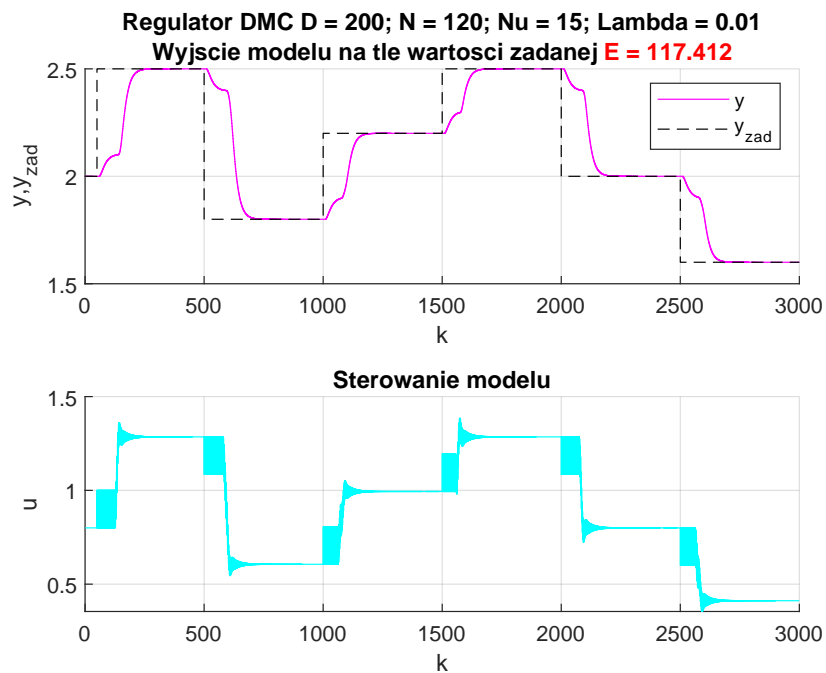
Do doboru nastaw regulatora DMC zastosowano metodę inżynierską, która polega na przeprowadzeniu doświadczeń i analizy uzyskanych wyników. Na podstawie wyciągniętych wniosków modyfikowane są nastawy regulatora. Parametry dobierane są metodą prób i błędów, aż do osiągnięcia oczekiwanych wyników. Horyzont dynamiki jest to liczba współczynników odpowiedzi skokowej, tzn. liczbę kroków dyskretyzacji, po której można uznać odpowiedź skokową za stabilną równą K_{stat} . Wyznaczona ona została z odpowiedzi skokowej obiektu poprzez wyznaczenie z niej chwili, w której odpowiedź jest stabilna. Horyzont predykcji N jest to wartość na podstawie, której prognozuje się zachowanie modelu. Zwiększając ten parametr uzyskaliśmy bardzo dobry czas regulacji oraz praktycznie zerowe przesterowanie. Horyzont sterowania tak jak horyzont predykcji jest parametrem dostrajania regulatora, zależnymi od szybkości dynamiki procesu, możliwości obliczeniowych oraz dokładności modelu, eksperymentalnie dobrano wartość tego parametru. Ostatnim krokiem w dostrajaniu naszego regulatora było wyznaczenie współczynnika kary λ , za pomocą którego można zapewnić kompromis pomiędzy szybkością regulacji, a postacią sygnału sterującego. Ponownie był on wyznaczany metodą testowania. Zwiększenie współczynnika kary pogorszyło wynik działania regulatora, został więc on zmniejszony.



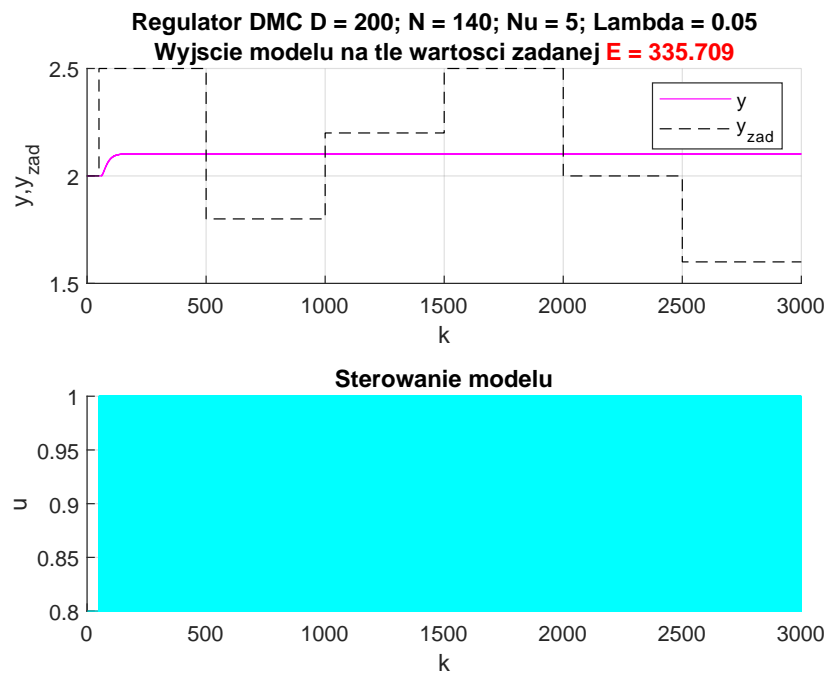
Rys. 1.9. DMC1



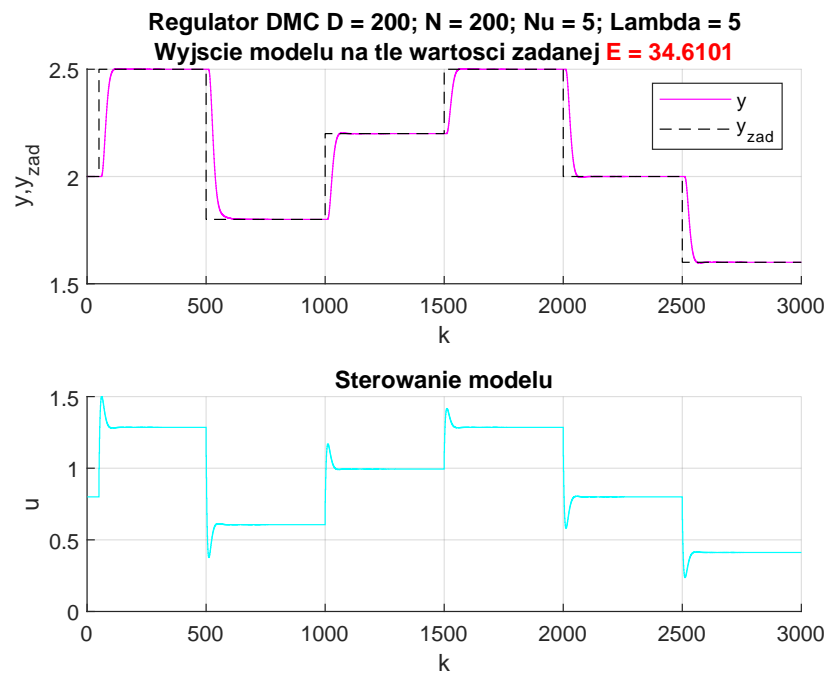
Rys. 1.10. DMC2



Rys. 1.11. DMC3



Rys. 1.12. DMC4



Rys. 1.13. DMCbest

1.6. Minimalizacja wskaźnika jakości regulacji

Dla zaproponowanej trajektorii zmian sygnału zadanego dobrać nastawy regulatora regulacji E. Omówić dobór parametrów optymalizacji. Zamieścić wyniki symulacji dla optymalnych regulatorów.

2. Laboratorium

2.1. Temperatura obiektu w punkcie pracy

Sprawdzić możliwość sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem - w szczególności sygnałów sterujących W1, G1 oraz pomiaru T1. Określić wartość pomiaru temperatury w punkcie pracy

2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowej procesu

Wyznaczyć odpowiedzi skokowe procesu dla trzech różnych zmian sygnału sterującego G1 rozpoczynając z punktu pracy. Narysować otrzymane przebiegi na jednym rysunku. Czy właściwości statyczne obiektu można określić jako (w przybliżeniu) liniowe? Jeśli tak wyznaczyć wzmocnienie statyczne procesu?

2.3. Przekształcenie otrzymanej odpowiedzi skokowej

Przekształcić jedną z otrzymanych odpowiedzi w taki sposób, aby otrzymać odpowiedź skokową wykorzystywaną w algorytmie DMC, tzn. zestaw liczb s_1, s_2, \dots (przy skoku jednostkowym sygnału sterującego: od chwili $k = 0$ włącznie sygnał sterujący ma wartość 1, w przeszłości jest zerowy). Zamieścić rysunek odpowiedzi skokowej. Należy wykonać aproksymację odpowiedzi skokowej używając w tym celu członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem (szczegóły w opisie znajdującym się na stronie przedmiotu). W celu doboru parametrów modelu wykorzystać optymalizację. Zamieścić rysunek porównujący odpowiedź skokową oryginalną i wersję aproksymowaną. Uzasadnić wybór parametrów optymalizacji.

2.4. Cyfrowy algorytm PID i DMC

Napisać program w języku Matlab do regulacji cyfrowego algorytmu PID oraz algorytmu DMC (w najprostszej wersji analitycznej) dla procesu stanowiska. Uwzględnić istniejące ograniczenia wartości sygnału sterującego

2.5. Dobór parametrów algorytmów PID i DMC

Dla zaproponowanej trajektorii zmian sygnału zadanego (dwa skoki o różnej amplitudzie) dobrać nastawy regulatora PID i parametry algorytmu DMC metodą eksperymentalną. Omówić wyniki i ewentualne sposoby poprawy jakości regulacji. Jakość regulacji oceniać jakościowo (na podstawie rysunków przebiegów sygnałów) oraz ilościowo, wyznaczając wskaźnik jakości regulacji. Zamieścić wybrane wyniki pomiarów (przebiegi sygnałów wejściowych i wyjściowych procesu oraz wartości wskaźnika E).