

Rok akademicki 2008

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

Bartosz Goszczyński

Nr indeksu : 182610

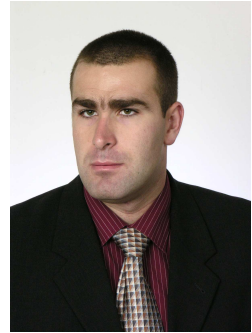
Weryfikacja algorytmów samostrojenia w regulatorze

LB-600 i projekt ich modyfikacji.

Praca dyplomowa magisterska

Kierownik pracy : dr inż. Zygmunt Komor

Imię i nazwisko: **Bartosz Goszczyński**
Data urodzenia: 2 września 1982
Specjalność: Systemy Informacyjno-Decyzyjne
Data rozpoczęcia studiów: 1 października 2006



EGZAMIN DYPLOMOWY

Złożył egzamin dyplomowy w dniu:.....2008 roku
z wynikiem:.....
Ogólny wynik studiów:.....
Dodatkowe wnioski i uwagi Komisji:.....
.....
.....
.....
.....

Streszczenie

Celem poniższej pracy dyplomowej jest weryfikacja algorytmów samostrojenia dostępnych w uniwersalnym regulatorze przemysłowym LB-600, co do których istnieją uzasadnione wątpliwości samego producenta sprzętu wynikające z małej liczby aplikacji. W przypadku znalezienia nieprawidłowości w działaniu algorytmów samostrojenia, praca powinna zawierać propozycje ich poprawy. Kolejnym celem pracy jest zaproponowanie ścieżki doboru parametrów metod samostrojania, dla osób mniej obeznanych z zagadnieniami identyfikacji oraz regulacji.

Proces samostrojania składa się z dwóch etapów. Pierwszym z nich jest identyfikacja obiektu, czyli ustalenie możliwie wiernego opisu dynamiki obiektu regulacji na podstawie pomiarów doświadczalnych (lub rozważań teoretycznych). Drugim etapem jest dobór nastaw regulatora PID, czyli ustalenie wartości parametrów opisujących jego dynamikę, zapewniających pożądane wartości wskaźników jakości w układzie regulacji o zadanej strukturze.

W regulatorze LB-600 dostępne są dwie metody identyfikacji tj. metoda stycznej oraz metoda Cohena-Coona (metoda dwóch punktów – 50% i 63.2%). Metody te w połączeniu z jednym z wielu dostępnych wskaźników jakości dają nam dopiero właściwą procedurę samostrojania. Weryfikacja będzie polegała na porównaniu parametrów obiektu otrzymanych przy użyciu każdej z metod identyfikacji oraz ocenie jakości regulacji dla wyznaczonych nastaw regulatora PID w procesie samostrojania.

Obiektem rzeczywistym, który będzie podlegał procesowi identyfikacji są dwa połączone ze sobą zbiorniki (używane w laboratorium IAiS na zajęciach z automatyki), do których jest pompowana woda. Zbiorniki posiadają odpływy. W obiekcie można zmieniać opóźnienie przez dołączenie dodatkowego obiegu dla pompowanej wody. Wejściem obiektu jest sygnał sterujący pompą. Sygnałem wyjściowym jest poziom cieczy w zbiorniku. W pracy rozważany jest zatem obiekt statyczny o jednym wejściu i jednym wyjściu (SISO).

Spis treści

1.	WSTĘP.....	9
2.	OPIS REGULATORA LB-600.	10
2.1	STRUKTURA FUNKCJONALNA REGULATORA.	11
2.2	OPROGRAMOWANIE UŻYTKOWE.....	13
3.	ROZPATRYWANY OBIEKT.	16
4.	WYBÓR WSKAŹNIKA JAKOŚCI.	26
4.1	WG ZIEGLERA-NICHOLSA.	28
4.2	WG COHENA-COONA.	28
4.3	2...5% PRZEREGULOWANIA.	29
4.4	20% PRZEREGULOWANIA.	29
4.5	ISE (INTEGRAL SQUARE ERROR).....	29
4.6	ITAE (INTEGRAL OF THE TIME WEIGHTED ABSOLUTE ERROR).	30
5.	OPIS I KONFIGURACJA ALGORYTMÓW SAMOSTROJENIA DOSTĘPNYCH W LB-600.....	32
5.1	METODA STYCZNEJ.....	34
5.2	METODA COHENA-COONA.	36
6.	OCENA JAKOŚCI DZIAŁANIA ALGORYTMÓW IDENTYFIKACJI.	37
6.1	METODA STYCZNEJ.....	37
6.2	METODA COHENA-COONA.	39
7.	OCENA JAKOŚCI DZIAŁANIA ZAMKNIĘTEGO UKŁADU REGULACJI.....	45
7.1	METODA STYCZNEJ.....	45
7.2	METODA COHENA-COONA.	52
7.3	MODEL OBIEKTU.	59
7.4	WNIOSKI.....	65
8.	ANALIZA ALGORYTMÓW IDENTYFIKACJI.....	67
8.1	METODA STYCZNEJ.....	67
8.2	METODA COHENA-COONA.	71
8.3	ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI.	72
9.	DOBÓR PARAMETRÓW DLA PROCEDURY SAMOSTROJENIA.....	74
10.	UWAGI DO INSTRUKCJI.....	78
11.	PODSUMOWANIE WYNIKÓW PRACY I WNIOSKI.....	79
12.	BIBLIOGRAFIA.	81
13.	ZAŁĄCZNIKI.	82
13.1	UKŁAD REGULACJI.	82
13.2	SAMOSTROJENIE.	91

1. Wstęp.

Temat poniższej pracy dyplomowej związany jest z podstawowymi zagadnieniami automatyki. Celem pracy jest przybliżenie użytkownikowi sposobu działania dostępnych w uniwersalnym regulatorze przemysłowym LB-600 metod samostrojzenia oraz sposobu ich konfiguracji.

Proces samostrojzenia składa się z dwóch etapów. Pierwszym z nich jest identyfikacja, czyli znalezienie zależności między wejściem a wyjściem obiektu na podstawie danych doświadczalnych lub rozważań teoretycznych. Wynikiem procesu identyfikacji są wartości parametrów modelu obiektu, które następnie są wykorzystywane do doboru nastaw regulatora sterującego rzeczywistym obiektem. Dobór nastaw regulatora jest drugim etapem procesu samostrojzenia.

W regulatorze LB-600 identyfikacja obiektu odbywa się na podstawie analizy przebiegów przejściowych wywołanych skokowym sygnałem wejściowym. Istnieje oczywiście więcej nieparametrycznych metod identyfikacji np. analiza częstotliwościowa (identyfikacja czynna) lub korelacyjna (identyfikacja bierna).

Na podstawie właściwości dynamicznych, obiekty możemy podzielić na dwie grupy: obiekty inercyjne i obiekty całkujące. W poniższej pracy rozważany będzie tylko przypadek obiektów inercyjnych, ponieważ dostępne w regulatorze LB-600 metody samostrojzenia przeznaczone są właśnie dla tego typu obiektów. Dokładniej rzecz ujmując sposób konfiguracji i działania metod samostrojzenia w regulatorze LB-600 uniemożliwia ich użycie w przypadku obiektów całkujących.

Rzeczywisty obiekt najczęściej posiada więcej niż jedną stałą czasową inercji. Transmitancję takiego wieloinercyjnego obiektu możemy zapisać w postaci

następującego wzoru:
$$G_o(s) = \frac{k_0 * e^{-sT_D}}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)...(1 + sT_n)}$$
. W wielu metodach

identyfikacji przyjmuje się uproszczony model obiektu reprezentowany przez transmitancję o następującym wzorze:
$$G_m(s) = \frac{k_0 * e^{-sT_D}}{1 + sT_Z}$$
, gdzie T_Z jest zastępczą stałą

czasową inercji. Dostępne w regulatorze LB-600 metody identyfikacji tj. metoda stycznej oraz metoda Cohena-Coona (metoda dwóch punktów) również bazują na przedstawionym wyżej uproszczonym modelu obiektu.

2. Opis regulatora LB-600.

Regulator LB-600 jest uniwersalnym regulatorem przemysłowym. Posiada modułową konstrukcję, która pozwala na jego konfigurację w zakresie rodzaju sygnałów wejściowych i wyjściowych przez dobór odpowiednich pakietów. Wśród pakietów możemy wyróżnić pakiet wejść analogowych, pakiet wyjść analogowych oraz pakiet wejść i wyjść binarnych. W regulatorze są trzy miejsca, w których można osadzić dowolnie wybrane pakiety.

Kolejną cechą LB-600 jest możliwość połączenia go z komputerem klasy PC za pomocą szeregowego portu komunikacyjnego i wykorzystanie różnego rodzaju programów ułatwiających jego obsługę oraz programowanie. Dodatkowo zyskujemy możliwość programowego zmieniania wartości zadanej dla procesu regulacji.



Rysunek 2.1 Regulator LB-600.

W regulatorze LB-600 zostało zaimplementowanych wiele algorytmów, przez których konfigurację można uzyskać wiele struktur urządzenia sterującego (i rodzajów regulacji):

- regulacja PID,
- regulacja dwustawna i trójstawna,
- regulacja kaskadowa,
- regulacja stosunku,
- regulacja rozmyta,

- regulacja tablicowa (tablice nastaw dla regulatora PID z możliwością ich przełączania),
- regulacja PID w strukturze Feed Forward.

W regulatorze zostały zaimplementowane algorytmy samostrojzenia. Działanie ich polega na samoczynnym dobraniu nastaw dla regulatora PID na podstawie parametrów obiektu tj. wzmocnienia i stałych czasowych, uzyskanych w wyniku przeprowadzonego eksperymentu identyfikacji (wyznaczanych z charakterystyki skokowej). Wartości obliczonych nastaw zależą także od wybranego kryterium jakości regulacji.

2.1 Struktura funkcjonalna regulatora.

Strukturę funkcjonalną regulatora LB-600 stanowi zbiór programowalnych bloków funkcyjnych – funktorów. Każdy z funktorów posiada wiele wejść i jedno wyjście. W zależności od pełnionej funkcji każdy funktor należy do jednej z dziesięciu warstw:

- Warstwa 1 – obsługa wejść analogowych.
- Warstwa 2 – obsługa wejść binarnych.
- Warstwy 3, 4, 5, 6 – obsługa funkcji logicznych, arytmetycznych i czasowych.
- Warstwa 7 – obsługa funkcji regulatora (struktura i algorytm regulacji).
- Warstwa 8 – obsługa funkcji arytmetycznych dla sygnałów analogowych.
- Warstwa 9 – obsługa wyjść analogowych.
- Warstwa A – obsługa wyjść binarnych.

W regulatorze LB-600 możemy także wyróżnić trzy warstwy związane z obsługą specjalnych funkcji urządzenia:

- Warstwa 0 – parametry generalne (hasła, adresy, zegary, alarmy czasowe).
- Warstwa b – obsługa skalowania wejść i wyjść analogowych.
- RSB (Rejestr Stanów Binarnych) – informacje o wygenerowanych alarmach itp.

Wartości wejść i wyjść są podawane w skali znormalizowanej $\langle 0;1 \rangle$. Część funktorów może generować binarne sygnały alarmowe np. w przypadku zbliżania się wartości mierzonej do zadanych ograniczeń. W każdej warstwie (poza warstwą 0 i warstwą b) może występować więcej niż jeden funktor danego typu, w celu ich jednoznacznej identyfikacji wprowadzono pojęcie kanału (toru). Każdy funktor określony jest zatem przez „adres”, który mówi nam o warstwie i kanale jego pochodzenia. Funktor przedstawiony na Rysunku 2.2 pochodzi zatem z warstwy 7, kanału 3.



Rysunek 2.2 Przykładowy funktor.

Z każdym funktozem związany jest zestaw parametrów, który opisuje jego powiązania (połączenia) w strukturze funkcjonalnej regulatora oraz definiuje dokładny sposób działania danego funktoza. Każdy parametr posiada swój unikalny adres. Na adres ten składa się numer warstwy i kanału funktoza z którego pochodzi dany parametr oraz numer tego parametru (zmiennej). Każdemu parametrowi funktoza przyporządkowany jest odpowiedni numer rejestru w pamięci regulatora.

Adres LB-600	Nr rejestru	Opis
7301	5100	Pakiet pochodzenia PV
7302	5101	Warstwa pochodzenia PV
7303	5102	Kanał pochodzenia PV
7304	5103	Pakiet pochodzenia SP
7305	5104	Warstwa pochodzenia SP
7306	5105	Kanał pochodzenia SP
7307	5106	Wartość minimalna PV _{min}
7308	5108	Wartość maksymalna PV _{max}
7309	5110	Rodzaj regulacji
7310	5111	Algorytm regulacji
7311	5112	Punkt pracy
7312	5114	Sposób równoważenia
7313	5115	Sposób równoważenia dla kaskady
7314	5116	Współczynnik wzmocnienia kp
7315	5118	Czas zdwojenia (całkowania) Ti
7316	5120	Czas wyprzedzenia (różniczkowania) Td
7317	5122	Współczynnik wzmocnienia kp (dla chłodzenia)
7318	5124	Czas zdwojenia (całkowania) Ti (dla chłodzenia)

Rysunek 2.3 Przykładowe parametry funktoza z warstwy 7.

W przypadku programowania regulatora LB-600 zarówno bezpośrednio z panelu operatorskiego jak i za pomocą dostępnego oprogramowania najwygodniej jest posługiwać się adresami odpowiednich zmiennych. Umożliwia to łatwe rozpoznanie warstwy i kanału do której należy dana zmienna. Używanie numeru rejestru w pamięci

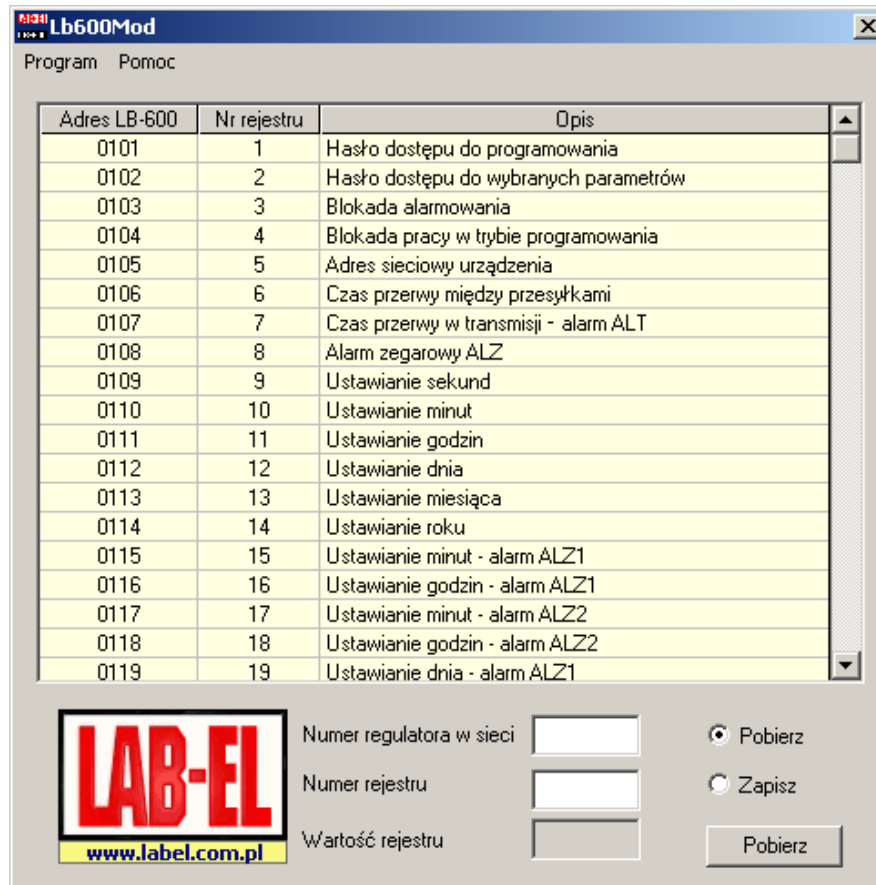
regulatora jest natomiast konieczne w przypadku łączenia się z regulatorem za pomocą protokołu MODBUS RTU.

2.2 Oprogramowanie użytkowe.

Programowanie regulatora LB-600 może odbywać się bezpośrednio z panelu operatorskiego lub za pomocą dostępnego oprogramowania napisanego przez firmę LAB-EL. Możliwość programowania z panelu operatorskiego jest mało wygodna ale bardzo ważna w przypadku, gdy nie mamy możliwości połączenia regulatora LB-600 z komputerem wyposażonym we wspomniany program.

2.2.1 Program LB600Mod.

Program umożliwia zapis i odczyt pojedynczych rejestrów regulatora. Przy pomocy programu uzyskujemy dostęp do wszystkich rejestrów w pamięci regulatora, w tym do rejestrów związanych z jego strukturą funkcjonalną i zmiennymi procesowymi. Najistotniejszą cechą tego programu jest jednak możliwość zmieniania wartości w Rejestrze Stanów Binarnych (RSB), co nie jest możliwe do zrobienia za pomocą panelu operatorskiego.

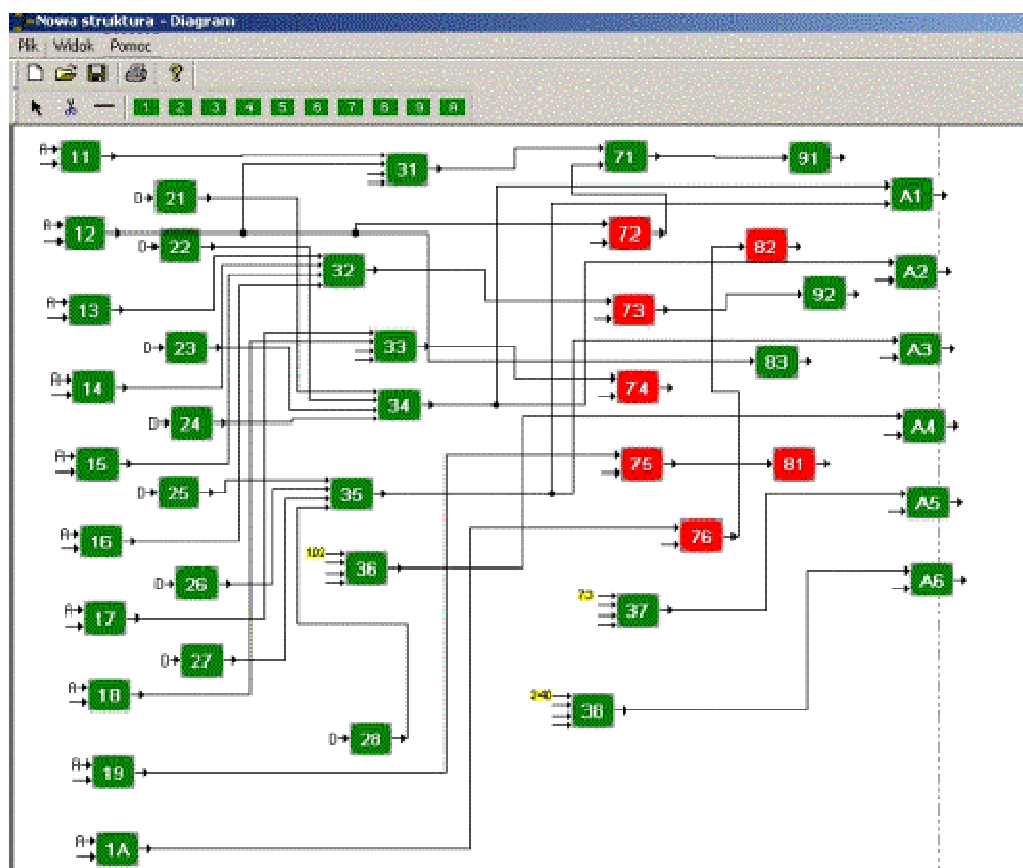


Rysunek 2.4 Program LB600Mod.

2.2.2 Program Diagram.

Program umożliwia tworzenie struktury funkcjonalnej regulatora za pomocą interfejsu graficznego. Pobieramy z biblioteki bloki funkcjonalne z interesujących nas warstw, następnie łączymy je ze sobą i parametryzujemy wpisując odpowiednie wartości w tablicach konfiguracyjnych poszczególnych bloków.

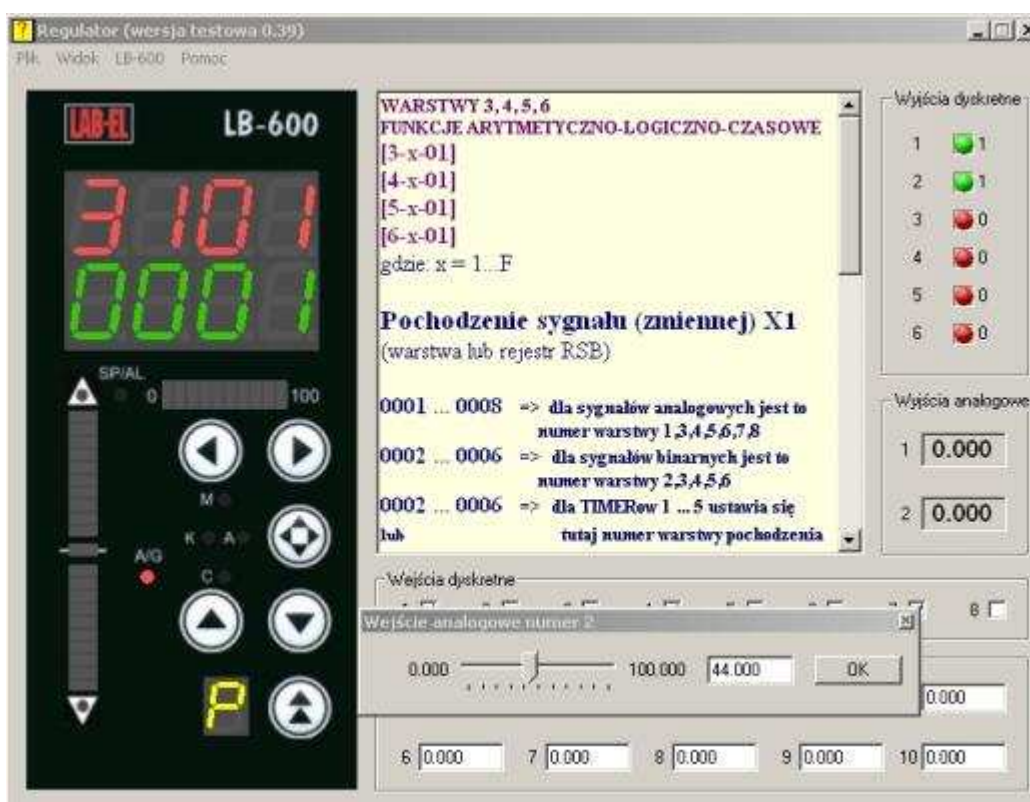
Każdy funkcyjny posiada pewne obligatoryjne parametry, konieczne do jego poprawnego działania. W przypadku nie wprowadzenia wartości tych parametrów program „Diagram” zaznacza taki funkcyjny kolorem czerwonym. Istnieje też możliwość wyłączenia bloku bez konieczności jego usuwania z diagramu, w taki przypadku blok zaznaczony jest kolorem szarym.



Rysunek 2.5 Program Diagram.

2.2.3 Program *Regulator*.

Program ten umożliwia wysłanie wcześniej zaprojektowanej struktury funkcjonalnej do regulatora przez łącze transmisyjne. Dodatkowo umożliwia odczyt struktury znajdującej się w regulatorze i zapisanie jej do pliku, co pozwala na jej dalszą modyfikację we wcześniej omówionym programie „Diagram”. Program pełni także rolę symulatora. Umożliwia symulację parametrów wejściowych oraz odczyt symulacyjny sygnałów wyjściowych. Pozwala zatem na wstępne przetestowanie algorytmu regulacji i wychwycenie ewentualnych błędów przed uruchomieniem go z rzeczywistym obiektem.



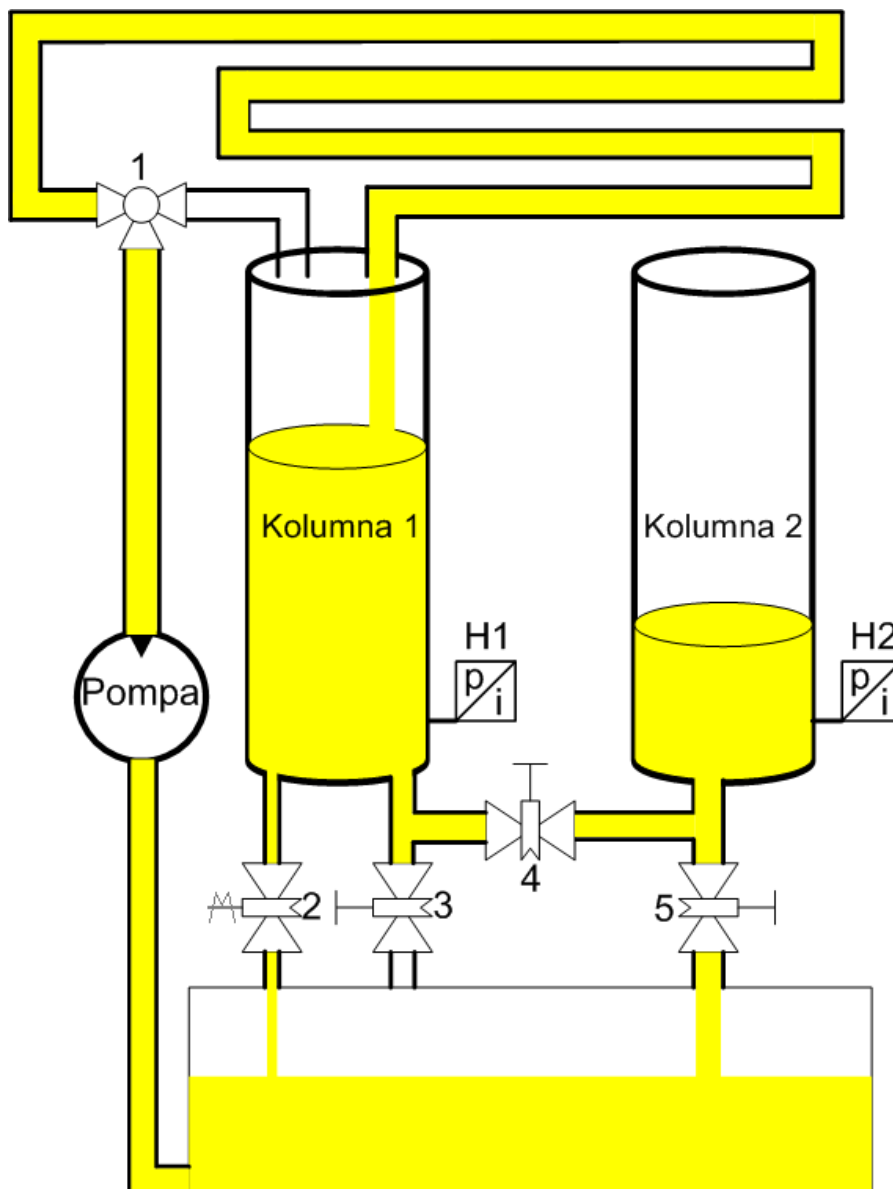
Rysunek 2.6 Program *Regulator*.

W mojej pracy magisterskiej wykorzystywałem wszystkie omawiane wyżej programy. Pierwszym etapem było zaprojektowanie odpowiedniej struktury funkcjonalnej regulatora przy pomocy programu *Diagram*. Następnie przy pomocy programu *Regulator* wysłałem stworzoną strukturę do pamięci regulatora LB-600. Bardzo pomocny podczas przeprowadzania eksperymentów okazał się program *LB600Mod*, który umożliwiał mi łatwą i szybką zmianę parametrów konfiguracyjnych metod samostrojenia oraz nastaw regulatora PID.

3. Rozpatrywany obiekt.

Badanym obiektem są dwa połączone ze sobą zbiorniki. Każdy ze zbiorników posiada odpływ swobodny. Do jednego ze zbiorników jest pompowana ciecz. W obiekcie istnieje także możliwość dołączenia spirali wprowadzającej dodatkowe opóźnienie wynoszące **6 sekund**. Obiekt posiada kilka zaworów, za pomocą których możemy kształtować jego dynamikę. Schemat obiektu został przedstawiony na poniższym Rysunku 3.1.

Wejściem obiektu jest sygnał sterujący pompą. Sygnałem wyjściowym jest poziom cieczy w kolumnie 1 (H1) lub w kolumnie 2 (H2). W pracy rozważany jest zatem obiekt statyczny o jednym wejściu i jednym wyjściu (SISO).



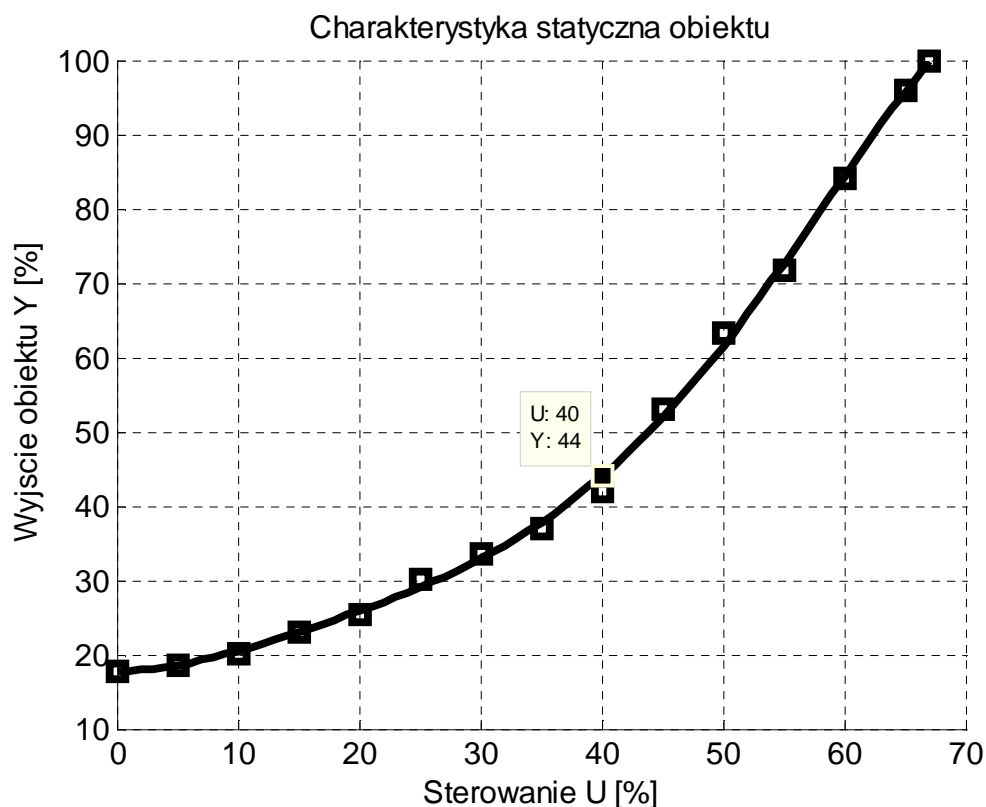
Rysunek 3.1. Schemat badanego obiektu.

3. Rozpatrywany obiekt.

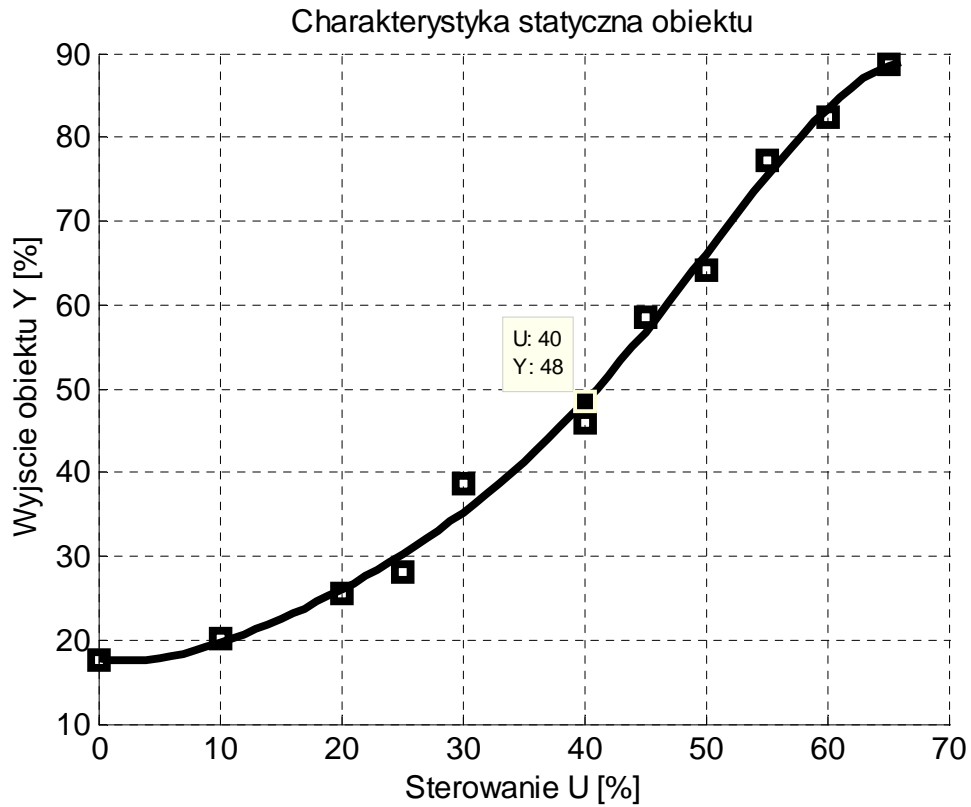
W dalszych rozważaniach będę rozpatrywał obiekt w następujących konfiguracjach:

- Konfiguracja nr 1
 - Dołączona spirala wprowadzająca opóźnienie.
 - Zawór nr 4 zamknięty. Ciecz płynie tylko przez kolumnę nr 1.
 - Zawory 2 i 3 otwarte.
- Konfiguracja nr 2
 - Dołączona spirala wprowadzająca opóźnienie.
 - Zawór 4 otwarty, zawór 5 zamknięty.
 - Zawory 2 i 3 otwarte.

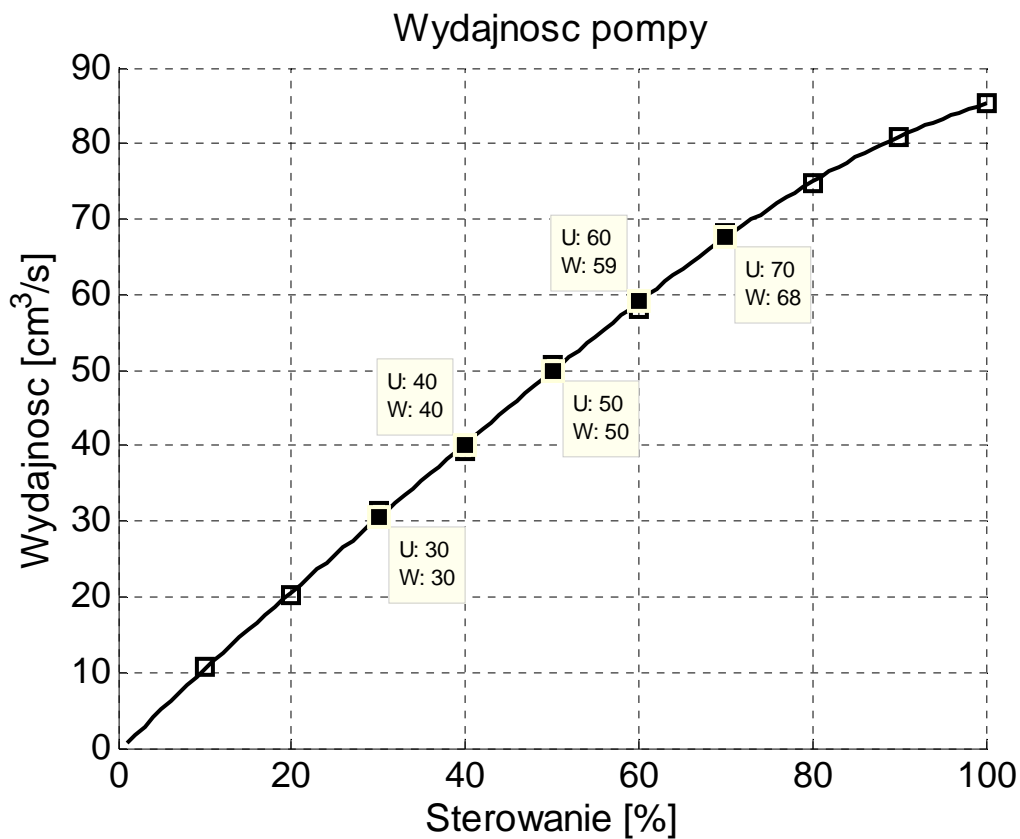
Ponieważ wynikiem działania procedury samostrojenia są nastawy dla liniowego regulatora PID, ważne jest, aby eksperyment samostrojenia odbył się w przedziale, gdzie charakterystyka statyczna obiektu jest liniowa lub gdzie jej linearyzacja wprowadzi jak najmniejsze błędy. W celu zapewnienia odpowiednich warunków pracy dla procedur samostrojenia wyznaczyłem charakterystyki statyczne obiektu (Rysunki 3.2 i 3.3), a następnie wybrałem punkty pracy, w których będzie badany układ regulacji dla obiektu w danej konfiguracji.



Rysunek 3.2. Charakterystyka statyczna obiektu w konfiguracji nr 1.



Rysunek 3.3. Charakterystyka statyczna obiektu w konfiguracji nr 2.



Rysunek 3.4 Charakterystyka wydajności pompy.

Stosowana w urządzeniu pompa również posiada w miarę liniową charakterystykę, czyli kolejne sterowania wyznaczone przez liniowy regulator nie będą zniekształcane przez element nieliniowy.

Kolejnym etapem w poznawaniu badanego obiektu było wyznaczenie jego charakterystyki dynamicznej oraz jego identyfikacja. W tym celu przeprowadziłem w otwartym układzie regulacji eksperyment, który polegał na rejestracji zmian wartości wyjściowej obiektu pod wpływem skokowej zmiany wartości sterowania (wartości wejściowej). Poniższe charakterystyki dynamiczne zostały wyznaczone dla wcześniej wybranych punktów pracy przy zmianie sterowania o **+10%**.

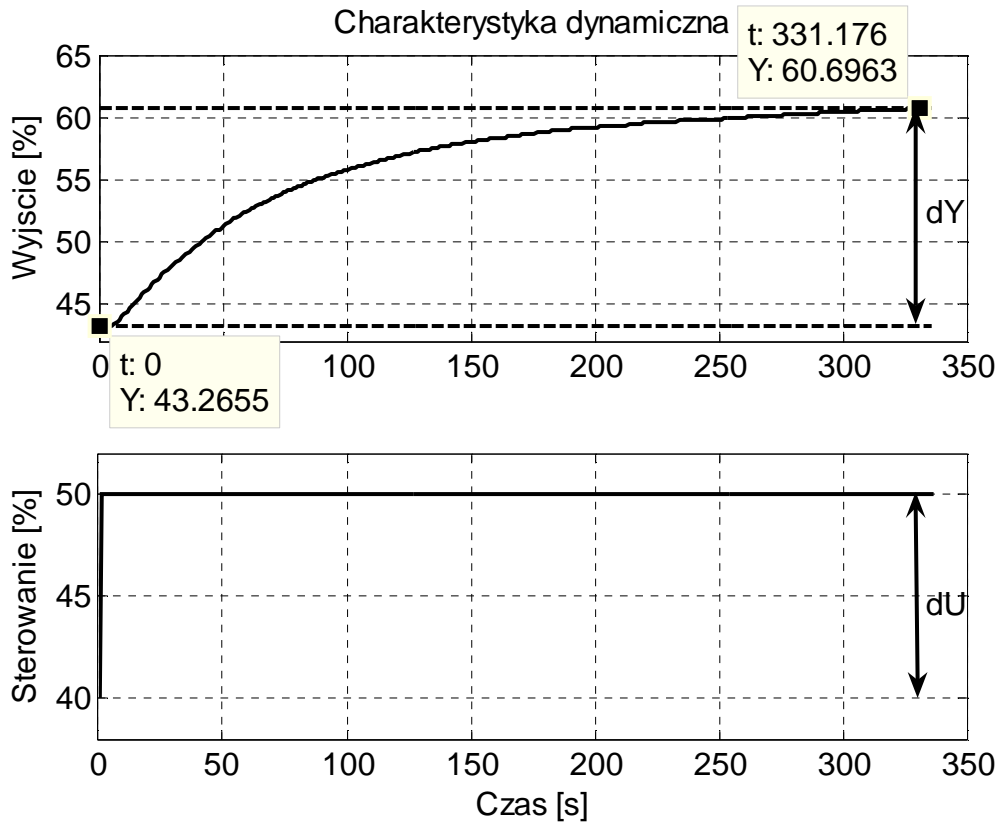
Charakterystyka dynamiczna obiektu w konfiguracji nr 1 znajduje się na Rysunku 3.5. Zostały na niej zaznaczone wartości sygnału wyjściowego w stanach ustalonych przed rozpoczęciem eksperymentu i po jego zakończeniu. Na podstawie tych informacji możemy obliczyć wzmocnienie obiektu (K) tj. stosunek przyrostu wartości wyjściowej do przyrostu sterowania:

$$K_1 = \frac{dY}{dU} = \frac{(60.7\% - 43.3\%)}{(50\% - 40\%)} = \frac{17.4\%}{10\%} = 1.74$$

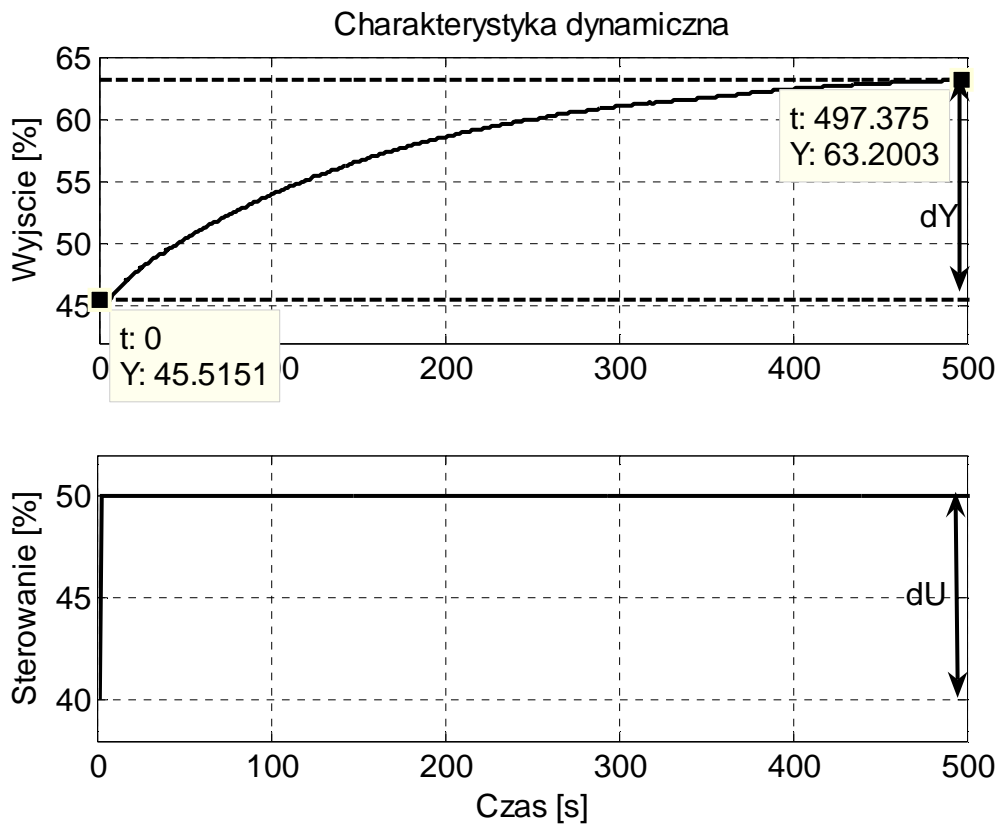
Podobnie na podstawie charakterystyki dynamicznej obiektu w konfiguracji nr 2 (patrz Rysunek 3.6) możemy obliczyć jego wzmocnienie:

$$K_2 = \frac{dY}{dU} = \frac{(63.2\% - 45.5\%)}{(50\% - 40\%)} = \frac{17.7\%}{10\%} = 1.77$$

3. Rozpatrywany obiekt.



Rysunek 3.5 Charakterystyka dynamiczna obiektu w konfiguracji nr 1.



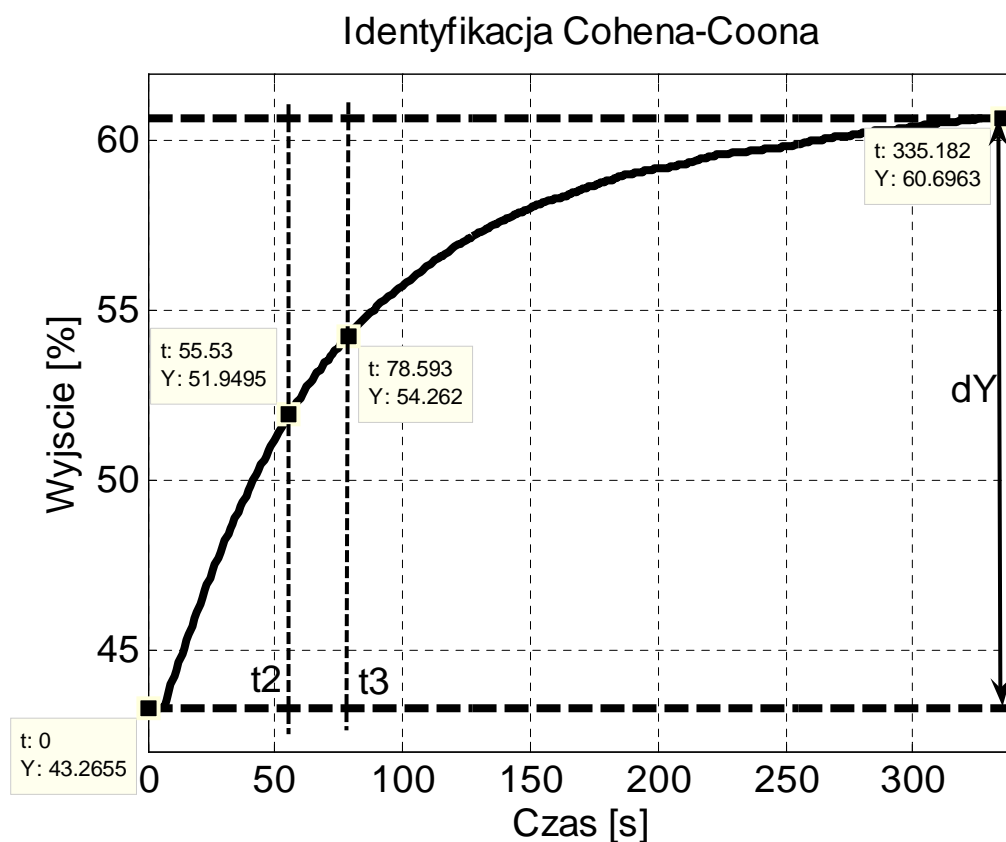
Rysunek 3.6 Charakterystyka dynamiczna obiektu w konfiguracji nr 2.

3. Rozpatrywany obiekt.

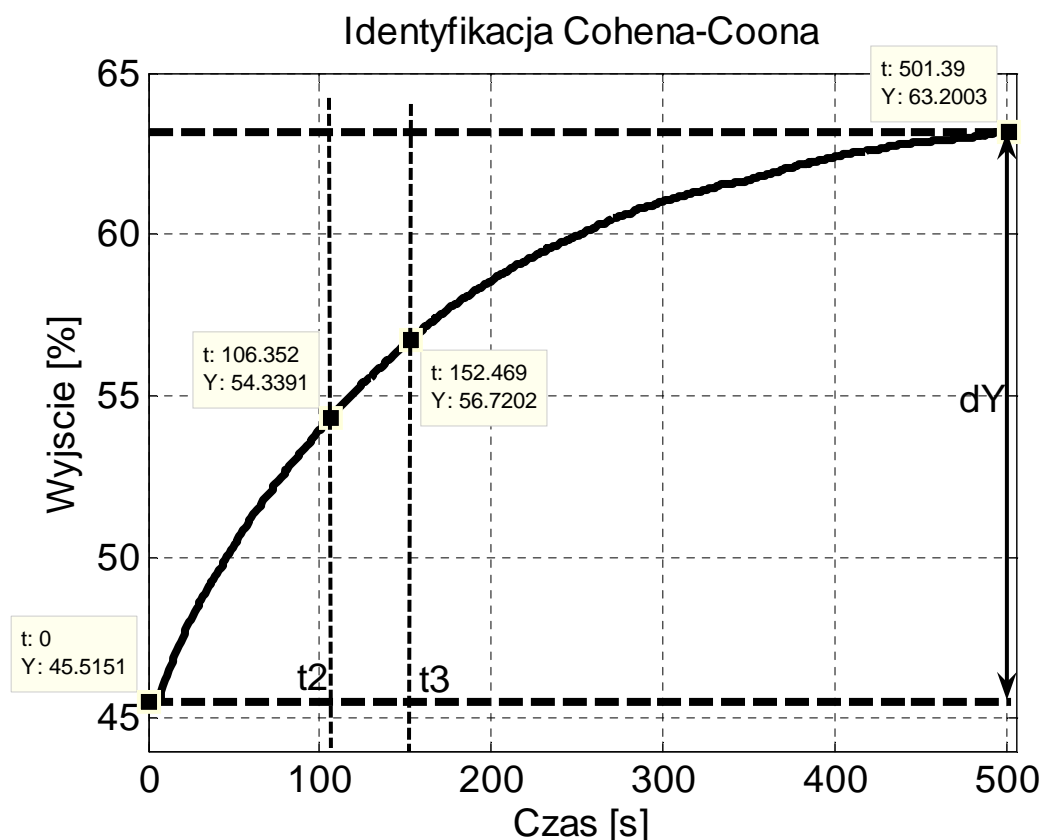
Pozostały do wyznaczenie jeszcze dwa parametry obiektu tj. opóźnienie (τ_D) i zastępcza stała czasowa inercji (τ). Parametry te zostały wyznaczone przy użyciu dwóch metod identyfikacji: metody stycznej oraz metody Cohena-Coona. Dokładny opis metod identyfikacji znajduje się w rozdziale 5.

Metoda Cohena-Coona:

Obiekt w konfiguracji nr 1 (patrz Rysunek 3.7)	Obiekt w konfiguracji nr 2 (patrz Rysunek 3.8)
$t_0 = 0s$ $t_2 = 55.53s$ $t_3 = 78.59s$ $t_1 = \frac{[t_2 - \ln(2) * t_3]}{[1 - \ln(2)]} \cong 3.44s$ $\tau = t_3 - t_1 = 78.59s - 3.44s = 75.15s$ $\tau_D = t_1 - t_0 = 3.44s$	$t_0 = 0s$ $t_2 = 106.35s$ $t_3 = 152.47s$ $t_1 = \frac{[t_2 - \ln(2) * t_3]}{[1 - \ln(2)]} \cong 2.17s$ $\tau = t_3 - t_1 = 152.47s - 2.17s = 150.3s$ $\tau_D = t_1 - t_0 = 2.17s$



Rysunek 3.7 Identyfikacja metodą Cohena-Coona obiektu w konfiguracji nr 1.



Rysunek 3.8 Identyfikacja metodą Cohena-Coona obiektu w konfiguracji nr 2.

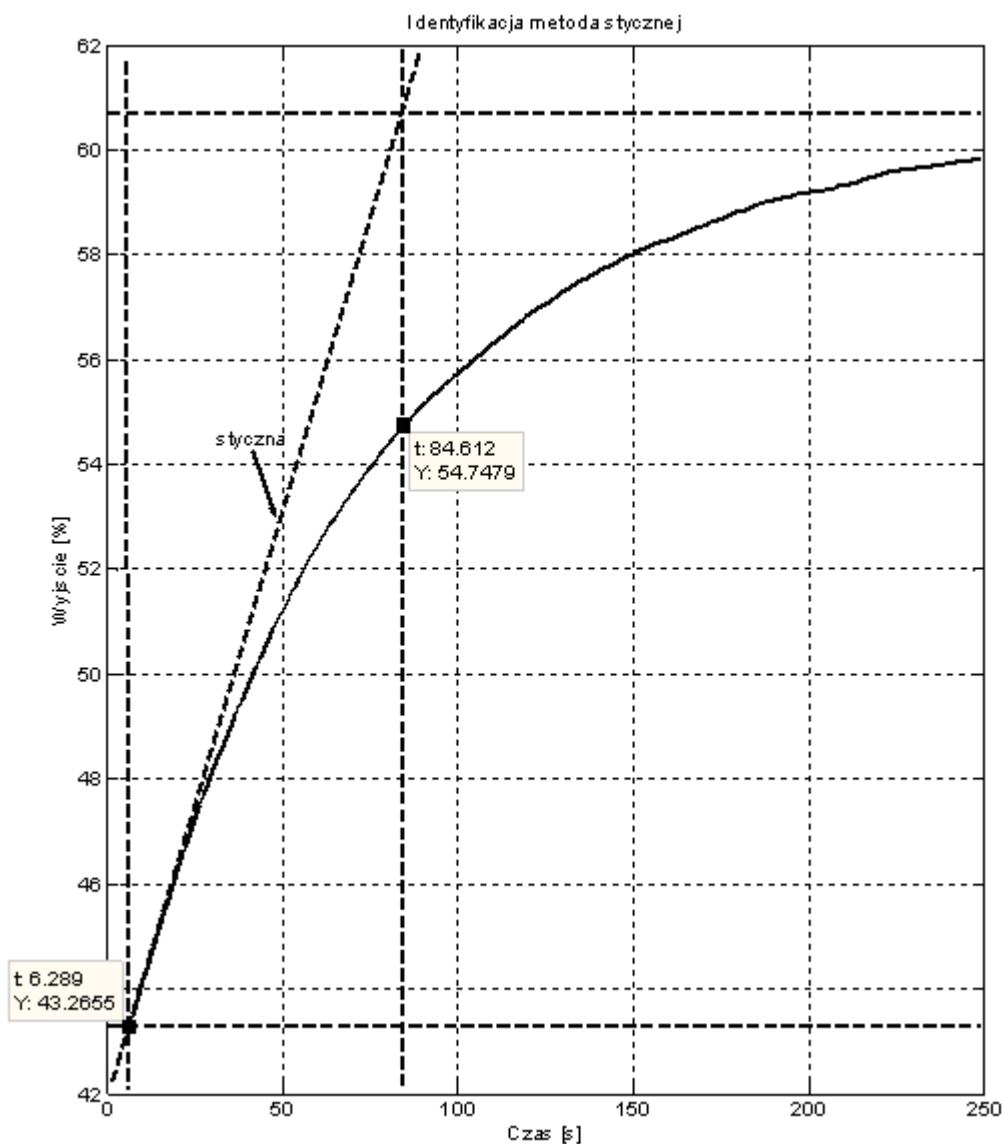
Otrzymane za pomocą metody Cohena-Coona wartości opóźnienia obiektu odpowiednio **3.44** i **2.17** sekundy są znacznie mniejsze od rzeczywistej wartości opóźnienia wynoszącej **6** sekund.

Metoda stycznej:

Obiekt w konfiguracji nr 1 (patrz Rysunek 3.9)	Obiekt w konfiguracji nr 2 (patrz Rysunek 3.10)
$t_0 = 0s$	$t_0 = 0s$
$t_1 = 6.29s$	$t_1 = 6.04s$
$t_2 = 84.61s$	$t_2 = 109.36s$
$\tau = t_2 - t_1 = 84.61s - 6.29s = 78.32s$	$\tau = t_2 - t_1 = 109.36s - 6.04s = 103.32s$
$\tau_D = t_1 - t_0 = 6.29s$	$\tau_D = t_1 - t_0 = 6.04s$

Otrzymane przy użyciu metody stycznej wartości opóźnienia obiektu odpowiednio **6.29** i **6.04** sekundy są bardzo bliskie rzeczywistej wartości opóźnienia wynoszącej **6** sekund.

3. Rozpatrywany obiekt.

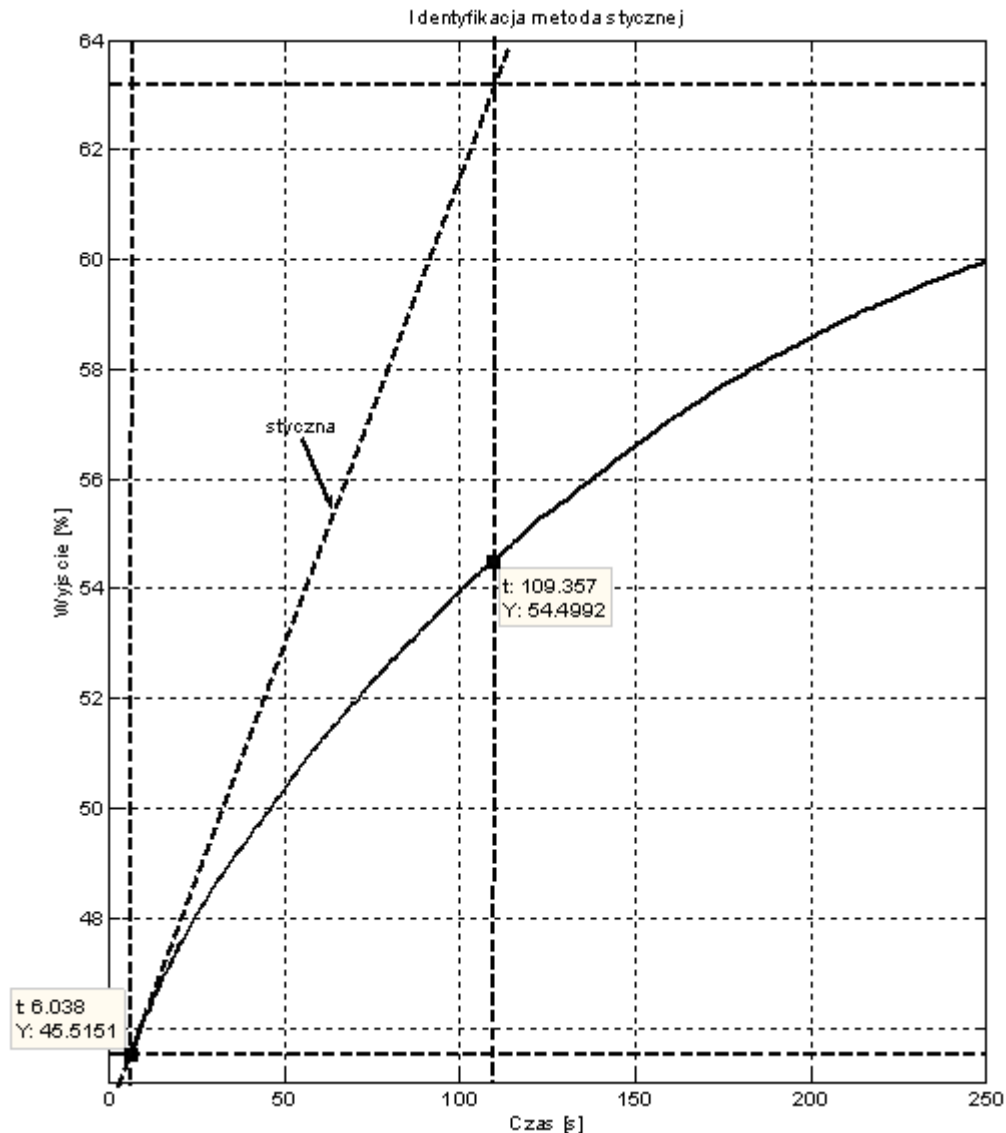


Rysunek 3.9 Identyfikacja metodą stycznaj obiektu w konfiguracji nr 1.

Poniższa tabela zawiera zebrane wyniki dotychczasowych prób identyfikacji badanego obiektu. Na jej podstawie postaram się wyznaczyć model obiektu dla każdej z rozpatrywanych konfiguracji, który będzie punktem odniesienia do oceny działania metod identyfikacji zaimplementowanych w regulatorze LB-600.

Tabela 3-1 Wyniki procedur identyfikacji obiektu.

	Obiekt w konfiguracji nr 1		Obiekt w konfiguracji nr 2	
Wzmocnienie obiektu	1.743		1.769	
	Metoda stycznaj	Metoda Cohena-Coona	Metoda stycznaj	Metoda Cohena-Coona
Opóźnienie	6.29s	3.44s	6.04s	2.17s
Stała czasowa inercji	78.32s	75.15s	103.32s	150.30s



Rysunek 3.10 Identyfikacja metodą stycznaj obiektu w konfiguracji nr 2.

Przeprowadzone przeze mnie eksperymenty wyznaczania charakterystyki dynamicznej trwały dość długo (odpowiednio 350 i 500 sekund), uważam zatem, że układ w obu przypadkach osiągnął bardzo dokładny stan ustalony, co z kolei pozwala twierdzić, że wyznaczone wartości wzmocnienia są bardzo zbliżone do wartości rzeczywistych. Dysponowałem także dużą liczbą próbek sygnału wyjściowego, co pozwalało na dokładniejsze wyznaczenie stycznaj oraz punktów 50% i 63.2% bez konieczności dokonywania jakiegokolwiek aproksymacji.

Opóźnienie obiektu jest znane i wynosi 6 sekund, bardzo zbliżone wartości opóźnienia zostały uzyskane przy użyciu metody stycznaj. Uzyskiwane wartości opóźnienia przy użyciu metody Cohena-Coona są mało wiarygodne. Ponieważ w przypadku obiektu w konfiguracji nr 1 obie metody dały zbliżone wartości stałej czasowej inercji to na potrzeby tworzonego modelu zostanie przyjęta wartość pośrednia

wynosząca 77 sekund. Wydaje mi się, że ze względu na dokładniejsze oszacowanie opóźnienia należy lekko faworyzować metodę stycznej, dlatego w przypadku modelu obiektu w konfiguracji nr 2 stała czasowa inercji będzie miała wartość 110 sekund.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń i procedur identyfikacji przyjmuję następujące modele obiektów, (3.1 dla konfiguracji nr 1 i 3.2 dla konfiguracji nr 2):

$$G_{m1}(s) = \frac{1.74 * e^{-6s}}{1 + 77s} \quad (3.1)$$

$$G_{m2}(s) = \frac{1.77 * e^{-6s}}{1 + 110s} \quad (3.2)$$

Dostępne w regulatorze LB-600 metody samostrojzenia są przeznaczone przede wszystkim dla obiektów statycznych, których parametry spełniają następujący warunek:

$$0.1 \leq \frac{\textit{opóznienie_obektu}}{\textit{zastępcza_stała_czasowa_inercji}} \leq 0.6$$

Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonych procedur identyfikacji obliczyłem stosunek opóźnienia do stałej czasowej inercji dla rozpatrywanego obiektu. Dla obiektu w konfiguracji nr 1 stosunek ten wynosi w przybliżeniu **0.08**, natomiast dla obiektu w konfiguracji nr 2 stosunek ten wynosi w przybliżeniu **0.05**. Stosunek ten możemy wyznaczyć także na podstawie parametrów obiektu uzyskanych z procedur samostrojzenia. Dla obiektu w konfiguracji nr 1 stosunek ten możemy policzyć na podstawie wyników z tabeli 6-2, natomiast dla obiektu w konfiguracji nr 2 na podstawie wyników z tabeli 13-4.

Ponieważ wartość stosunku opóźnienia obiektu do jego zastępczej stałej czasowej inercji znajduje się poniżej dolnej granicy zalecanego przedziału, to ocena działania metod samostrojzenia i w efekcie ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji może być obarczona błędami!

W dalszej części pracy będzie rozważany już tylko obiekt w konfiguracji nr 1 ponieważ jest on najbliższy spełnienia wymogów, które pozwalają na stosowanie do niego zaimplementowanych w regulatorze LB-600 metod samostrojzenia.

4. Wybór wskaźnika jakości.

Znajomość przebiegu czasowego wartości wyjściowej układu w odpowiedzi na określony sygnał wejściowy umożliwia ocenę jakości sterowania na podstawie pewnego (bezpośredniego) wskaźnika jakości. Wybór wskaźnika jakości jest różny w zależności od celów stawianych układowi regulacji. Należy zatem mówić o układzie regulacji, że jest w nim osiągane ekstremum danego wskaźnika jakości.

Zadaniem układu regulacji automatycznej jest więc minimalizacja uchybu regulacji powstającego w wyniku działania zakłóceń lub w wyniku zmian wartości zadanej. Zadanie to zawiera w sobie zarówno minimalizację uchybu w stanie ustalonym, jak i w stanach przejściowych (uchyb przejściowy, czas ustalania). Uchyb regulacji zależy także od struktury układu regulacji i parametrów regulatora oraz **objektu regulacji**.

Wybierając konkretny wskaźnik jakości wybieramy wyłącznie sposób porównywania i oceniania uzyskiwanych przebiegów przejściowych wartości wyjściowej. Cały czas stoi przed nami zadanie doboru nastaw regulatora, czyli ustalenie wartości parametrów w równaniach opisujących jego dynamikę, w sposób zapewniający uzyskanie pożądanych wartości wybranego wskaźnika jakości w układzie regulacji o zadanej strukturze. W literaturze istnieje wiele propozycji doboru odpowiednich nastaw regulatora (P, PI lub PID), w sposób mający zapewnić najlepszą realizację konkretnego wskaźnika jakości przez zamknięty układ regulacji. Ze względu na różnorodność obiektów regulacji (obiekty statyczne/astatyczne, z opóźnieniem/bez opóźnienia) oraz dużą rozpiętość wartości poszczególnych parametrów tych obiektów, wszystkie propozycje doboru nastaw mają ograniczony zakres stosowania.

W regulatorze LB-600 dostępnych jest kilka metod doboru nastaw regulatora w zależności od wybranego wskaźnika jakości. Przeznaczone są one przede wszystkim dla obiektów statycznych, których parametry spełniają następujący warunek:

$$0.1 \leq \frac{\textit{opóznienie_objektu}}{\textit{zastępcza_stała_czasowa_inercji}} \leq 0.6$$

Należy pamiętać, że uzyskane z procedur samostrojzenia nastawy są tylko pewną propozycją i może okazać się konieczna ich modyfikacja w celu poprawienia jakości działania układu regulacji. Oczywiście im gorzej nasz obiekt pasuje do konkretnej metody wyznaczania nastaw dla regulatora, tym bardziej trzeba liczyć się z koniecznością ich modyfikacji w celu poprawy działania układu regulacji. W przypadku, gdy nasz obiekt zdecydowanie nie pasuje do metody wyznaczania nastaw,

to istnieje ryzyko, że układ regulacji będzie niestabilny i należy się liczyć, że obiekt ulegnie uszkodzeniu w wyniku zastosowania tychże nastaw.

W omawianych w dalszej części rozdziału poszczególnych wskaźnikach jakości pojawia się wiele pojęć związanych z oceną przebiegu przejściowego wartości wyjściowej. Poniżej wytłumaczenie paru z nich:

- **Przeregulowanie** – maksymalna odchyłka y_{\max} wielkości regulowanej od jej wartości ustalonej $y(\infty)$ wyrażona w jednostkach względnych:

$$\kappa = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} * 100\% , \text{ gdzie } y_{\max} = \max_{t \geq 0} y(t).$$

- **Czas regulacji** – czas (liczony od chwili wprowadzenia zakłócenia), po upływie którego uchyb przejściowy wielkości regulowanej jest stale mniejszy od dopuszczalnego uchybu ustalonego. $t_r = \arg \max_{t \geq 0} \{t : |y(t) - y(\infty)| = \Delta * y(\infty)\}$,

gdzie Δ - strefa kontrolna.

- **Oscylacyjność (współczynnik tłumienia)** - iloraz sąsiednich amplitud oscylacyjnego przebiegu regulacji. Jest miarą szybkości tłumienia oscylacji wielkości regulowanej.
- **Uchyb statyczny** – określa wartość uchybu (odchyłki) regulacji w stanie ustalonym osiągniętym po czasie t_r .

Przedstawiony w rozdziale 3 obiekt jest obiektem statycznym z opóźnieniem. W metodach identyfikacji przyjmowany jest jego model w postaci:

$$G(s) = \frac{k}{\tau * s + 1} e^{-\tau_D * s}$$

Na podstawie wyznaczonych w procedurze identyfikacji parametrów obiektu:

- τ_D - opóźnienie,
- τ - stała czasowa inercji,
- k - wzmocnienie,

i zmiennej pomocniczej: $r = \frac{\tau_D}{\tau}$ formułowane są wzory określające wartości nastaw

regulatora P, PI lub PID dla obiektu statycznego z opóźnieniem i zadanego wskaźnika jakości.

4.1 wg Zieglera-Nicholsa.

Tabela 4-1 Nastawy wg Zieglera-Nicholsa.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{\tau_D * k}$	-	-
PI	$\frac{0.9\tau}{\tau_D * k}$	$3.33\tau_D$	-
PID	$\frac{1.2\tau}{\tau_D * k}$	$2\tau_D$	$0.5\tau_D$

Nastawy wg Zieglera-Nicholsa przeznaczone są dla obiektów pierwszego rzędu z opóźnieniem. Stosując je oczekuje się, że współczynnik tłumienia nie będzie większy niż $\frac{1}{4}$ (QDR – Quarter Decay Ratio). W przypadku wystąpienia przebiegu oscylacyjnego, oscylacje te będą szybko tłumione.

4.2 wg Cohena-Coona.

Tabela 4-2 Nastawy wg Cohena-Coona.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{k * r} \left(1 + \frac{r}{3}\right)$	-	-
PI	$\frac{1}{k * r} \left(0.9 + \frac{r}{12}\right)$	$\tau_D \frac{30 + 3r}{9 + 20r}$	-
PID	$\frac{1}{k * r} \left(\frac{4}{3} + \frac{r}{4}\right)$	$\tau_D \frac{32 + 6r}{13 + 8r}$	$\tau_D \frac{4}{11 + 2r}$

Nastawy wg Cohena-Coona są modyfikacją wyżej wymienionych nastaw wg Zieglera-Nicholsa (bazuje na tym samym kryterium jakości – QDR), ale jest przeznaczona dla obiektów pierwszego rzędu z dużym opóźnieniem. Stosując je uzyskujemy większe wzmocnienie statyczne regulatora i krótszy czas regulacji w układzie zamkniętym niż w przypadku zastosowania nastaw wg Zieglera-Nicholsa dla tego samego obiektu.

4.3 2...5% przeregulowania.

Tabela 4-3. Nastawy wg kryterium 2-5% przeregulowania.

	K_p	T_i	T_d
P	$0.9 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	-	-
PI	$0.6 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	$0.8\tau_D + 0.5\tau$	-
PID	$0.95 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	$2.4\tau_D$	$0.4\tau_D$

Stosując nastawy wynikające z uwzględnienia tego kryterium jakości oczekuje się szybkiego układu regulacji, w którym przeregulowanie nie przekroczy progu 5%.

4.4 20% przeregulowania.

Tabela 4-4. Nastawy wg kryterium 20% przeregulowania.

	K_p	T_i	T_d
P	$0.7 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	-	-
PI	$0.7 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	$\tau_D + 0.3\tau$	-
PID	$1.2 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	$2.0\tau_D$	$0.4\tau_D$

Stosując to kryterium jakości i odpowiadające mu podane nastawy oczekuje się szybkiego układu regulacji, w którym przeregulowanie nie przekroczy progu 20%.

4.5 ISE (Integral Square Error).

$$ISE = \int_0^{t_r} [e(t)]^2 dt$$

Tabela 4-5. Nastawy wg kryterium ISE.

	K_p	T_i	T_d
PI	$1.0 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	$\tau_D + 0.3\tau$	-
PID	$1.4 \frac{\tau}{k * \tau_D}$	$1.3\tau_D$	$0.5\tau_D$

Duże oscylacje mają większą wagę ze względu na występującą funkcję kwadratową we wzorze na wskaźnik jakości. Stosując to kryterium jakości i odpowiadające mu nastawy oczekuje się szybkiej likwidacji lub nie dopuszczenie do wystąpienia dużego uchybu (przeregulowania). Możemy jednak wyobrazić sobie sytuację, w której mały uchyb (ewentualnie małe oscylacje) będzie utrzymywać się przez dłuższy czas.

4.6 ITAE (Integral of the Time weighted Absolute Error).

Dla tego kryterium jakości proponowane są różne nastawy dla regulatora zależnie od miejsca wystąpienia zakłócenia. Zakłóceniem może być zmiana wartości zadanej lub zmiana wartości wyjściowej.

- ITAE SP (Set-Point) – kryterium nadążania za wartością zadaną.
 - Szybkie, gładkie (bez dużego przeregulowania) dojście do stanu ustalonego w przypadku zmiany wartości zadanej.
 - Wolna redukcja zakłóceń.
- ITAE LOAD – kryterium redukcji zakłóceń wyjściowych.
 - Mogą występować oscylacje w przypadku zmian wartości zadanej.
 - Szybka redukcja zakłóceń.

Obie metody dążą do eliminacji uchybu w stanie ustalonym, ze względu na większą wagę uchybów bardziej odległych w czasie. Stosując to kryterium liczymy się z wystąpieniem dużego, krótko trwającego uchybu regulacji po wystąpieniu zakłócenia, szybkim tłumieniem oscylacji i brakiem uchybu w stanie ustalonym. Kryterium to znalazło szerokie zastosowanie w technice, ponieważ prowadzi do kompromisu między żądaniem niewielkiego przeregulowania i stosunkowo krótkiego czasu regulacji.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t * |e(t)| dt$$

Tabela 4-6. Nastawy wg kryterium ITAE (SP).

	K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{1}{k} 0.586 \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{-0.916}$	$\frac{\tau}{1.03 - 0.165 * \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)}$	-
PID	$\frac{1}{k} 0.965 \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{-0.85}$	$\frac{\tau}{0.796 - 0.1465 * \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)}$	$\tau * 0.308 \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{0.929}$

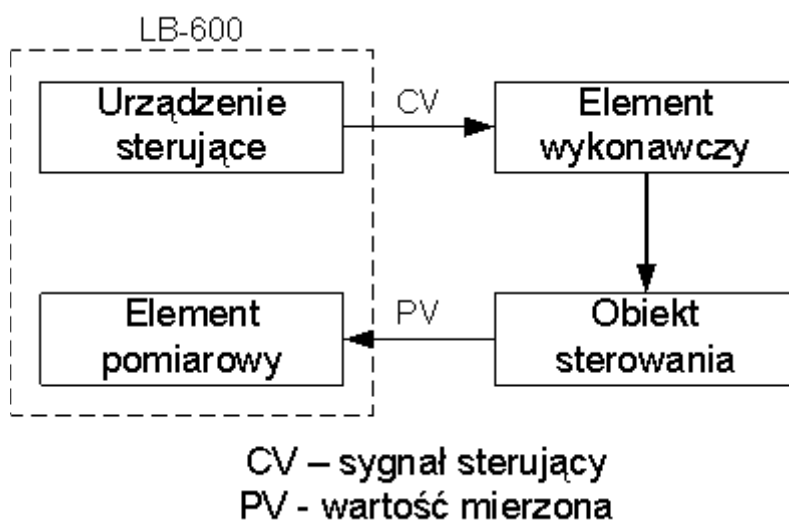
4. Wybór wskaźnika jakości.

Tabela 4-7. Nastawy wg kryterium ITAE (LOAD).

	K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{1}{k} 0.859 \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{-0.977}$	$\frac{\tau}{0.674 * \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{-0.68}}$	-
PID	$\frac{1}{k} 1.357 \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{-0.947}$	$\frac{\tau}{0.842 * \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{-0.732}}$	$\tau * 0.381 \left(\frac{\tau_D}{\tau} \right)^{0.995}$

5. Opis i konfiguracja algorytmów samostrojzenia dostępnych w LB-600.

Regulator LB-600 dysponuje dwiema metodami identyfikacji obiektu, metodą stycznej oraz metodą Cohena-Coona (metodą dwóch punktów – 50% i 63.2%). Obie metody identyfikacji działają w otwartym układzie regulacji i bazują na odpowiedzi skokowej obiektu. Podczas przeprowadzania procedury samostrojzenia regulator LB-600 pełni zarówno funkcję generatora sygnału sterującego jak i elementu pomiarowego.



Rysunek 5.1. Schemat otwartego układu regulacji.

Regulator LB-600 pozwala na przeprowadzenie procedury samostrojzenia, czyli wyznaczenie nastaw skojarzonych ze wskaźnikiem jakości:

- wg Cohena-Coona (QDR - Quarter Decay Ratio),
- wg Zieglera-Nicholsa (QDR - Quarter Decay Ratio),
- 2...5% przeregulowania,
- 20% przeregulowania,
- ISE (Integral Square Error),
- ITAE (Integral of the Time weighted Absolute Error).

Przeprowadzenie procedury samostrojzenia przy użyciu LB-600 wymaga odpowiedniej jego konfiguracji. Nawiązując do przedstawionej w rozdziale 2.1 struktury funkcjonalnej regulatora należy ustawić wartości odpowiednich rejestrów regulatora w warstwie 7.

Tabela 5-1. Parametry konfiguracyjne procedur samostrojzenia.

Nr Rejestru	Opis parametru
7x42	Numer RSB – START Uruchomienie procedury samostrojzenia.
7x43	Numer RSB – STOP Zakończenie procedury samostrojzenia.
7x45	Wskaźnik jakości dla nastaw PID <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Brak (tylko identyfikacja). • 1 – Wg Zieglera-Nicholsa (QDR). • 2 – Wg Cohena-Coona (QDR). • 3 – 2...5% przeregulowania. • 4 – 20% przeregulowania. • 5 – ISE (Integral Squared Error). • 6 – ITAE (Integral of the Time weighted Absolute Error).
7x46	ΔY_{\min} - minimalna wartość sygnału odpowiedzi obiektu na wymuszenie skokowe podczas eksperymentu identyfikacji.
7x47	ΔY_{\max} - maksymalna wartość sygnału odpowiedzi obiektu na wymuszenie skokowe podczas eksperymentu identyfikacji (bezpieczne dla procesu).
7x48	Metoda identyfikacji 0 – metoda stycznej (Zieglera-Nicholsa zmodyfikowana) - dla tej metody w 7x45 należy wybrać 1, 3, 4, 5 lub 6 1 – metoda Cohena-Coona - dla tej metody w 7x45 należy wybrać 2, 3, 4, 5 lub 6
7x49	Czas stabilizacji procesu w procedurach samostrojzenia.
7x50	Dopuszczalne zmiany wartości mierzonej (PV), jakie mogą wystąpić w czasie stabilizacji.
7x51	Skok sterowania (CV) na początku eksperymentu identyfikacji.

Przeprowadzenie procedury samostrojzenia wymaga przełączenia regulatora LB-600 w odpowiedni tryb pracy. Ustawienie wartości rejestru wskazanego jako **Numer RSB – START** na „1” powoduje przejście regulatora w tryb samostrojzenia.

Po uruchomieniu procedury samostrojzenia regulator LB-600 czeka, aż obiekt osiągnie stan ustalony (definiowany przez parametry 7x49 i 7x50). Następnie regulator

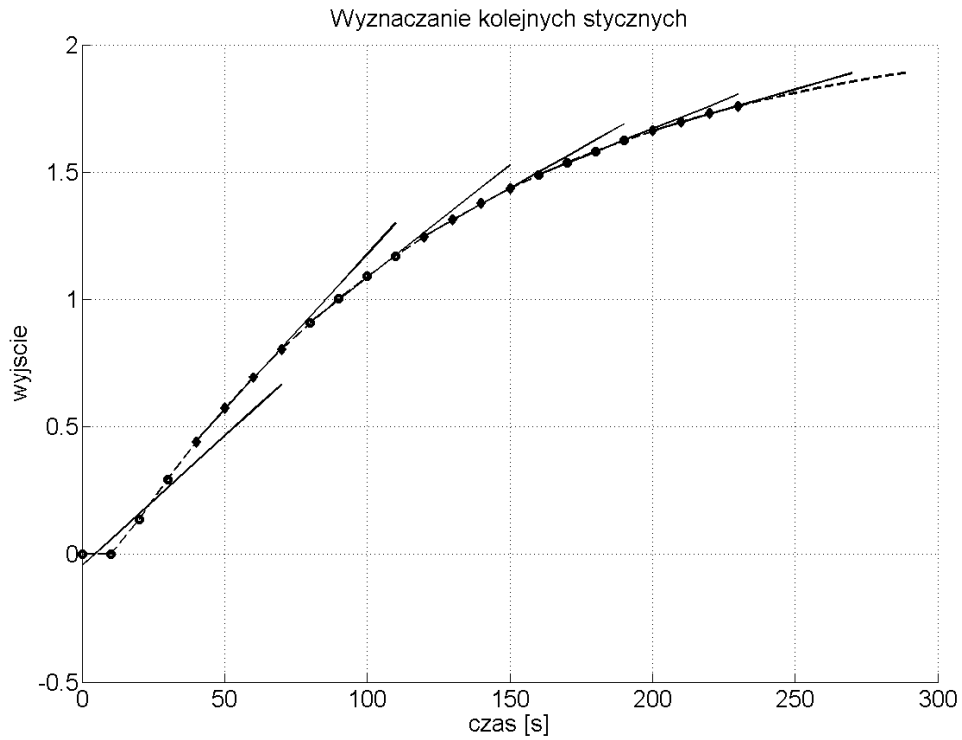
generuje skok sterowania ustalony wcześniej przez operatora (rejestr 7x51). Po zadaniu skoku wartości wejściowej obiekt potrzebuje pewnego czasu by osiągnąć stan ustalony. Przez cały ten czas regulator musi zbierać próbki sygnału wyjściowego i zapamiętywać je. Ponieważ regulator ma ograniczoną wielkość pamięci to zapamiętuje tylko 100 próbek. W momencie gdy nie ma miejsca w tej 100 elementowej tablicy na kolejną próbkę, to co druga próbka z tablicy jest usuwana. W ten sposób zwiększane są odstępy czasowe między nimi. Dodatkowo zwiększany jest dwa razy okres próbkowania. W efekcie uzyskujemy od 50 do 100 (równoodległych w czasie) próbek, które reprezentują przebieg czasowy wartości wyjściowej. Procedura trwa tak długo, aż obiekt osiągnie ponownie stan ustalony.

5.1 Metoda stycznej.

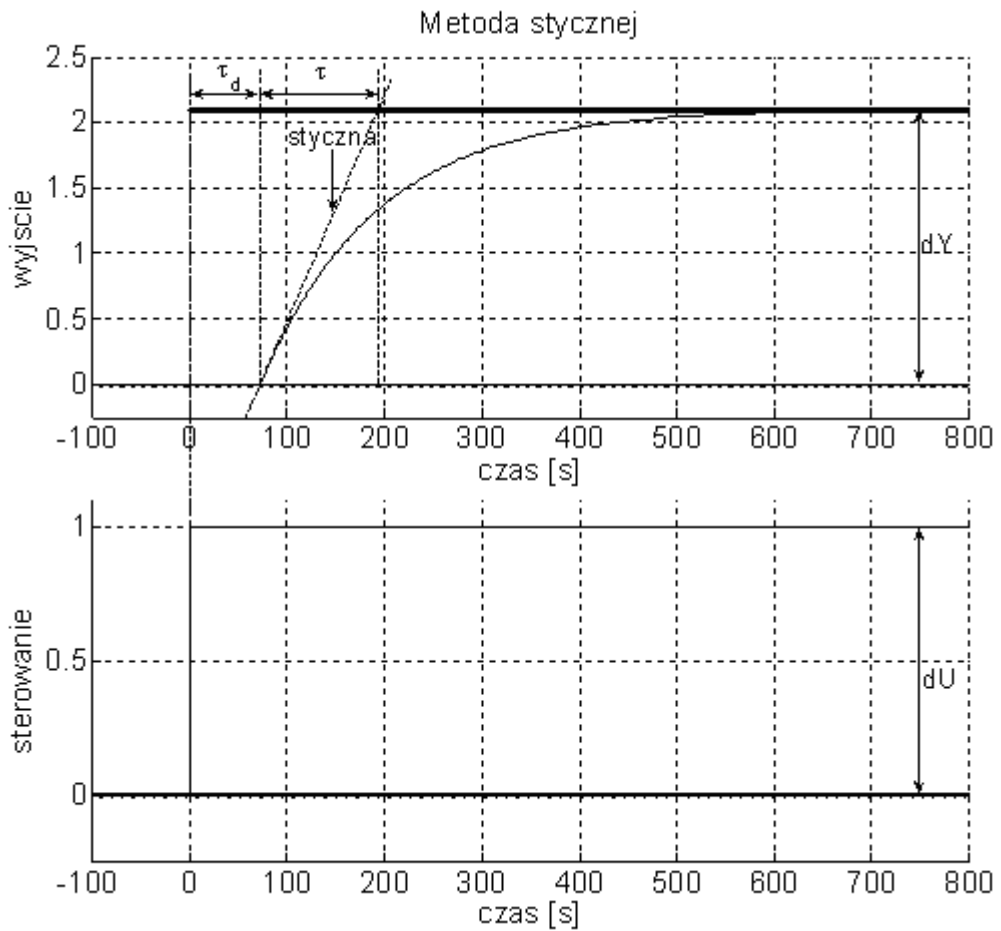
Sposób wyznaczania stycznej polega na znalezieniu prostej o największym współczynniku kierunkowym aproksymującej cztery kolejne punkty wykresu. Czyli dla każdego czterech kolejnych punktów uzyskanego przebiegu czasowego $\{ x_k, x_{k+1}, x_{k+2}, x_{k+3} \}$ wyznaczana jest prosta aproksymująca ($y = p_1 + p_2 x$). Podczas wyznaczania prostej aproksymującej brane jest pod uwagę kryterium najmniejszych kwadratów:

$$\min S(p_1, p_2) = \min \sum_{i=1}^4 [p_1 + p_2 x_i - y_i]^2$$

Wśród wszystkich wyznaczonych prostych wybierana jest ta o największym współczynniku kierunkowym. Prosta ta jest uznawana za styczną do wykresu. Dalej wyznaczane są punkty przecięcia stycznej z prostą odpowiadającą stanowi ustalonemu oraz z prostą odpowiadającą stanowi początkowemu (patrz Rysunek 5.3). Na podstawie tych dwóch punktów są wyznaczane odpowiednie parametry obiektu tj. opóźnienie (τ_D) i zastępcza stała czasowa inercji (τ). Wzmocnienie obiektu to stosunek $\frac{dY}{dU}$.



Rysunek 5.2. Przykład wyznaczenia kolejnych stycznych.



Rysunek 5.3. Identyfikacja obiektu metodą stycznej.

5.2 Metoda Cohena-Coona.

Najpierw znajdujemy wartość sygnału wyjściowego w stanie ustalonym. W kolejnym etapie obliczeń wstępnie wyznaczane są czasy, po których wartość sygnału wyjściowego osiąga odpowiednio 50% i 63.2% wartości ustalonej. Oznaczmy:

t'_2 - czas po którym wartość sygnału wyjściowego osiąga 50% wartości ustalonej.

t'_3 - czas po którym wartość sygnału wyjściowego osiąga 63.2% wartości ustalonej.

Wyznaczana jest prosta aproksymująca przebieg przez te punkty. Dalej na podstawie równania prostej wyznaczane są dokładne punkty t_2 i t_3 .

Inne oznaczenia w metodzie Cohena-Coona:

t_0 - określa moment realizacji skoku wartości sterowania.

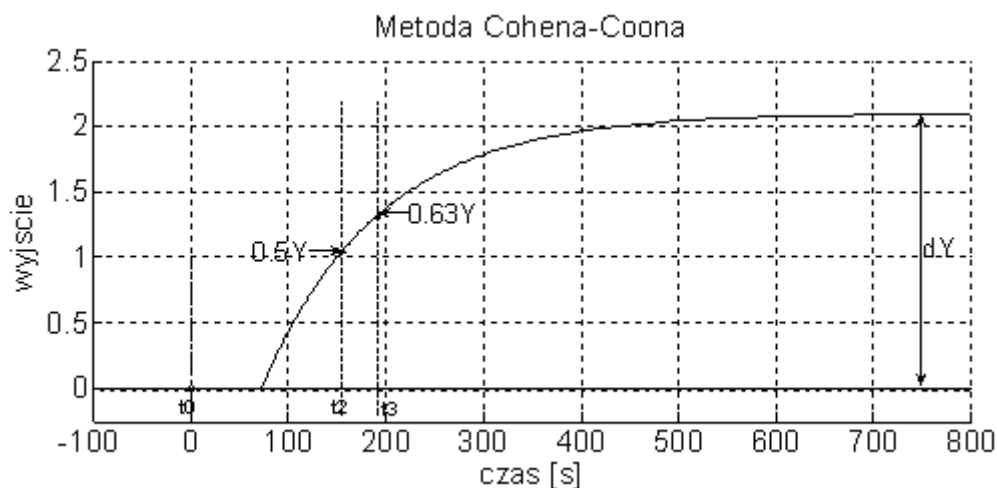
dU – jest to wartość skoku sterowania.

dY – jest to przyrost wielkości wyjściowej.

Na podstawie powyższych wartości wyznaczamy wartość $t_1 = \frac{t_2 - \ln(2)t_3}{1 - \ln(2)}$ i dalej

odpowiednie parametry obiektu tj. opóźnienie ($\tau_D = t_1 - t_0$) i zastępczą stałą czasową

inercji ($\tau = t_3 - t_1$). Wzmocnienie obiektu to stosunek $\frac{dY}{dU}$.



Rysunek 5.4. Identyfikacja obiektu metodą Cohena-Coona.

Używając metody dwóch punktów do identyfikacji obiektu otrzymujemy przeszacowane wartości opóźnienia tego obiektu oraz niedoszacowaną wartość stałej czasowej inercji.

6. Ocena jakości działania algorytmów identyfikacji.

Badanie algorytmów samostrojzenia polegało na przeprowadzeniu serii doświadczeń przy użyciu dwóch metod identyfikacji dostępnych w regulatorze LB-600. Każda metoda samostrojzenia była uruchamiana z różnymi wskaźnikami jakości dla nastaw regulatora PID. Spodziewamy się, że parametry obiektu uzyskane przy użyciu dostępnych w regulatorze LB-600 metod identyfikacji będą zbliżone do parametrów obiektu uzyskanych przeze mnie (patrz rozdział 3, Tabela 3-1. kolumna „Obiekt w konfiguracji nr 1”).

6.1 Metoda stycznej.

Wszystkie opisywane poniżej doświadczenia były przeprowadzane dla obiektu w konfiguracji nr 1 (patrz rozdział 3). Przed zadaniem skoku sterowania obiekt znajdował się w punkcie pracy (40, 42).

Doświadczenie nr 1 (Tabela 6-1):

Parametry procedury samostrojzenia:

- skok sterowania wynosił **5%**,
- czas stabilizacji 20 sekund,
- dopuszczalne zmiany wartości wyjściowej w stanie ustalonym 1%.

Doświadczenie nr 2 (Tabela 6-2):

Parametry procedury samostrojzenia:

- skok sterowania wynosił **10%**,
- czas stabilizacji 20 sekund,
- dopuszczalne zmiany wartości wyjściowej w stanie ustalonym 1%.

Analiza wyników:

- Opóźnienie (kolumna P2)

Rzeczywista wartość opóźnienia w obiekcie wynosi **6 sekund**. Średnia wartość opóźnienia w przypadku doświadczenia nr 2 (**5.93 sekundy**) jest bliższa wartości rzeczywistej opóźnienia niż w przypadku doświadczenia nr 1 (**6.27 sekundy**). Metoda stycznej dość dokładnie oszacowuje opóźnienie obiektu.

- Wzmocnienie obiektu (kolumna P3)

Oba doświadczenia były przeprowadzane dla tego samego punktu pracy. Wyznaczone w rozdziale 3 wzmocnienie obiektu w konfiguracji nr 1 wynosi **1.74**. Otrzymane wyniki z obu doświadczeń (odpowiednio **0.87** i **1.35**) są zatem mało wiarygodne. Wyniki z doświadczenia nr 2 są jednak bardziej powtarzalne i bliższe wartości rzeczywistej. Widać zatem, że metoda stycznej zaimplementowana w regulatorze LB-600 zaniża wartość wzmocnienia obiektu.
- Stała czasowa inercji (kolumna P1)

Średnie wartości stałej czasowej z obu doświadczeń (odpowiednio **44.2 sekundy** i **65.37 sekundy**) znacznie się od siebie różnią. Różnice te wynikają z wielkości skoku sterowania co przekłada się na czas trwania eksperymentu (doświadczenie nr 1 kończy się zbyt szybko) i dokładność uzyskanych wyników. Wyznaczona w rozdziale 3 wartość stałej czasowej inercji wynosi **78.32 sekundy** i jest większa od wartości uzyskanych przez LB-600. Widać zatem, że metoda stycznej dostępna w LB-600 zaniża wartość stałej czasowej inercji.
- Powtarzalność wyników

Analizując otrzymane z kolejnych procedur identyfikacji wartości parametrów obiektu widać, że bardziej powtarzalne jest doświadczenie nr 2. Dokładność i powtarzalność otrzymywanych wyników zależy w dużej mierze od wartości skoku sterowania. W przypadku większego skoku sterowania eliminujemy wpływ zakłóceń na przebieg sygnału wyjściowego. Powtarzalność w uzyskiwaniu parametrów obiektu przekłada się na powtarzalność w wyznaczaniu nastaw dla regulatora PID.

Inne uwagi:

Nastawy regulatora PID dla wskaźnika jakości według Zieglera-Nicholsa obliczone przez regulator LB-600 różnią się od tych obliczonych na podstawie odpowiednich wzorów (patrz rozdział 4). Regulator LB-600 błędnie oblicza wyżej wymienione nastawy.

6.2 Metoda Cohena-Coona.

Poniższe doświadczenie było przeprowadzane dla obiektu w konfiguracji nr 1 (patrz rozdział 3). Przed zadaniem skoku sterowania obiekt znajdował się w punkcie pracy (40, 42).

Doświadczenie nr 3 (Tabela 6-3):

Parametry procedury samostrojzenia:

- skok sterowania wynosił 10%.
- czas stabilizacji 20 sekund,
- dopuszczalne zmiany wartości wyjściowej w stanie ustalonym 1%.

Analiza wyników:

- Opóźnienie obiektu (kolumna P2)
Średnia wartość opóźnienia (**11.62 sekundy**) jest znacznie większa od jego rzeczywistej wartości opóźnienia (**6 sekund**). Według teorii metoda Cohena-Coona przeszacowuje opóźnienie obiektu i zaniża wartość stałej czasowej inercji. Pokrywa się to zatem ze sposobem działania metody Cohena-Coona dostępnej w regulatorze LB-600.
- Wzmocnienie obiektu (kolumna P3)
Uzyskiwane wartości wzmocnienia (**1.24**) są porównywalne z tymi uzyskiwanymi w doświadczeniu nr 2 (**1.35**). Porównując powtarzalność doświadczenia nr 3 i nr 2 widać, że lepsze wyniki daje to drugie. W obu przypadkach otrzymane wzmocnienie obiektu jest mniejsze od oczekiwanego (**1.74**). Dostępna w regulatorze LB-600 metoda Cohena-Coona podobnie jak metoda stycznej zaniża wartość wzmocnienia obiektu.
- Stała czasowa inercji (kolumna P1)
Uzyskiwane wartości stałej czasowej (**46.21 sekundy**) są znacznie mniejsze od tych uzyskanych w doświadczeniu nr 2 (**65.37 sekundy**). Otrzymana wartość stałej czasowej inercji jest ponownie mniejsza od wartości oczekiwanej (**75.15 sekundy**). Widać zatem, że różne metody w tym samym punkcie pracy i dla tego samego skoku sterowania (doświadczenie nr 2 i nr 3) dają różne modele tego samego obiektu. Podobnie jak metoda stycznej metoda Cohena-Coona jest

bardziej powtarzalna dla większych skoków sterowania (porównaj Tabela 6-3 i Tabela 13-1).

Podsumowanie:

Celem przeprowadzania procedury samostrojzenia nie jest jednak uzyskanie dokładnego modelu obiektu lecz uzyskanie nastaw dla regulatora PID, które zapewnią stabilną pracę obiektu w zamkniętym układzie regulacji z uwzględnieniem wybranego kryterium jakości.

Uzyskiwane parametry modelu obiektu nie muszą zatem pokrywać się z rzeczywistymi parametrami obiektu. Ważne jest jednak to, by kolejne próby identyfikacji tego samego obiektu (w tym samym punkcie pracy) dawały powtarzalne (zbliżone do siebie) wyniki.

Jak czytać tabele:

- W górnej części tabeli znajdują się parametry z jakimi została uruchomiona metoda samostrojzenia tj. czas stabilizacji (np. 20 sekund), skok sterowania po rozpoczęciu eksperymentu (+5% lub +10%), rodzaj użytej metody identyfikacji (metoda stycznej lub metoda Cohena-Coona). Znajdują się tam też informacje na temat punktu pracy w jakim został przeprowadzony eksperyment samostrojzenia.
- Kolumny oznaczone jako P1, P2 i P3 to odpowiednio stała czasowa inercji, opóźnienie i wzmocnienie obiektu, czyli parametry obiektu uzyskane z procesu identyfikacji przeprowadzonego przez regulator LB-600.
- „Wskaźnik jakości dla procesu samostrojzenia” - to wskaźnik jakości jaki został użyty do wyznaczenia nastaw dla regulatora PID.
- „Nastawy z procesu” – w kolumnie tej znajdują się nastawy obliczone przez regulator LB-600 na podstawie parametrów obiektu (P1, P2, P3) i odpowiednich wzorów. Są to zatem nastawy obliczone dla różnych parametrów obiektu i dla różnych wskaźników jakości.
- Kolejna część tabeli czyli „Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu” to nastawy regulatora PID obliczone przeze mnie na podstawie parametrów obiektu (P1,P2, P3) i każdego z rozpatrywanych wskaźników

jakości. Nastawy te były wyznaczone na podstawie odpowiednich wzorów zawartych w rozdziale 4.

- Zacięniowane komórki – oznaczone w ten sposób nastawy regulatora PID mogą być porównywane z nastawami z kolumny „nastawy z procesu” ponieważ oba komplety nastaw zostały wyznaczone dla tych samych parametrów obiektu i tego samego wskaźnika jakości.
- Dolna część tabeli zawiera wartości minimalne, wartości maksymalne, średnie i uchyby zarówno parametrów obiektu jak i nastaw regulatora PID uzyskanych w kolejnych eksperymentach.

Tabela 6-1 Samostrojzenie - metoda stycznzej - obiekt w konfiguracji nr 1 - Doświadczenie nr 1.

Czas stabilizacji				20 sek																		
Skok sterowania				5																		
Punt pracy				(40 ; 42)																		
Obiekt				z opóźnieniem																		
metoda identyfikacji				Styczna																		
P1	stała czasowa obiektu																					
P2	opóźnienie obiektu																					
P3	wzmocnienie obiektu																					
				wskaźnik jakości dla procesu samostrojzenia	Nastawy z procesu			Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu														
								Z-N			2.5% przereg.			20% przereg.			ISE			ITAE		
Lp.	P1	P2	P3		P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D
1	45.75	5.797	0.965	Zieglera-Nicholsa	0.869	19.130	0	7.360	19.13	0	4.907	27.51	0	5.725	19.52	0	8.178	19.52	0	6.699	16.66	0
2	43.05	6.846	0.755	2.5 % przereg.	4.996	27.000	0	7.496	22.59	0	4.997	27.00	0	5.830	19.76	0	8.329	19.76	0	6.858	18.29	0
3	38.55	6.586	0.765	20 % przereg.	5.358	18.150	0	6.886	21.73	0	4.591	24.54	0	5.356	18.15	0	7.651	18.15	0	6.311	17.20	0
4	44.90	6.017	0.944	ISA	7.906	19.480	0	7.114	19.86	0	4.743	27.26	0	5.533	19.49	0	7.905	19.49	0	6.484	16.98	0
5	48.77	6.082	0.939	ITAE	6.995	17.560	0	7.686	20.07	0	5.124	29.25	0	5.978	20.71	0	8.540	20.71	0	6.993	17.57	0
wartość min	38.55	5.80	0.76		wartość min			6.89	19.13	0	4.59	24.54	0	5.36	18.15	0	7.65	18.15	0	6.31	16.66	0
wartość max	48.77	6.85	0.97		wartość max			7.69	22.59	0	5.12	29.25	0	5.98	20.71	0	8.54	20.71	0	6.99	18.29	0
średnia	44.20	6.27	0.87		średnia			7.31	20.68	0	4.87	27.11	0	5.68	19.53	0	8.12	19.53	0	6.67	17.34	0
uchyb +	4.57	0.58	0.09		uchyb +			0.38	1.92	0	0.25	2.14	0	0.29	1.19	0	0.42	1.19	0	0.32	0.95	0
uchyb -	5.65	0.47	0.12		uchyb -			0.42	1.55	0	0.28	2.57	0	0.33	1.38	0	0.47	1.38	0	0.36	0.68	0
uchyb + [%]	10.33	9.26	10.46		uchyb + [%]			5.16	9.26	0	5.16	7.88	0	5.16	6.07	0	5.16	6.07	0	4.85	5.50	0
uchyb - [%]	12.79	7.48	13.58		uchyb - [%]			5.78	7.48	0	5.78	9.48	0	5.78	7.05	0	5.78	7.05	0	5.37	3.93	0

Tabela 6-2 Samostrojzenie - metoda stycznej - obiekt w konfiguracji nr 1 - Doświadczenie nr 2.

Czas stabilizacji				20 sek																		
Skok sterowania				10																		
Punt pracy				(40 ; 42)																		
Obiekt				z opóźnieniem																		
metoda identyfikacji				Styczna																		
P1	stała czasowa obiektu																					
P2	opóźnienie obiektu																					
P3	wzmocnienie obiektu																					
				wskaźnik jakości dla procesu samostrojzenia	Nastawy z procesu samostrojzenia			Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu														
Lp.					P	I	D	Z-N			2..5% przereg.			20% przereg.			ISE			ITAE		
	P1	P2	P3					P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D
1	65.91	5.883	1.394	Zieglera-Nicholsa	1.255	19.410	0	7.233	19.41	0	4.822	37.66	0	5.626	25.66	0	8.037	25.66	0	6.531	18.91	0
2	65.38	5.893	1.385	2..5 % przereg.	4.806	37.400	0	7.209	19.45	0	4.806	37.40	0	5.607	25.51	0	8.010	25.51	0	6.511	18.88	0
3	69.26	5.821	1.382	20 % przereg.	6.027	26.600	0	7.749	19.21	0	5.166	39.29	0	6.027	26.60	0	8.609	26.60	0	6.986	19.08	0
4	64.38	5.669	1.399	ISE	8.117	24.980	0	7.306	18.71	0	4.871	36.73	0	5.682	24.98	0	8.118	24.98	0	6.594	18.30	0
5	61.94	6.361	1.201	ITAE	6.608	19.550	0	7.297	20.99	0	4.865	36.06	0	5.675	24.94	0	8.108	24.94	0	6.609	19.55	0
wartość min	61.94	5.67	1.20		wartość min			7.21	18.71	0	4.81	36.06	0	5.61	24.94	0	8.01	24.94	0	6.51	18.30	0
wartość max	69.26	6.36	1.40		wartość max			7.75	20.99	0	5.17	39.29	0	6.03	26.60	0	8.61	26.60	0	6.99	19.55	0
średnia	65.37	5.93	1.35		średnia			7.36	19.55	0	4.91	37.43	0	5.72	25.54	0	8.18	25.54	0	6.65	18.95	0
uchyb +	3.89	0.44	0.05		uchyb +			0.39	1.44	0	0.26	1.86	0	0.30	1.06	0	0.43	1.06	0	0.34	0.61	0
uchyb -	3.43	0.26	0.15		uchyb -			0.15	0.85	0	0.10	1.37	0	0.12	0.59	0	0.17	0.59	0	0.14	0.64	0
uchyb + [%]	5.94	7.35	3.46		uchyb + [%]			5.30	7.35	0	5.30	4.97	0	5.30	4.16	0	5.30	4.16	0	5.12	3.20	0
uchyb - [%]	5.25	4.33	11.18		uchyb - [%]			2.03	4.33	0	2.03	3.66	0	2.03	2.33	0	2.03	2.33	0	2.04	3.39	0

Tabela 6-3 Samostrojzenie - metoda Cohena-Coona - obiekt w konfiguracji nr 1 - Doświadczenie nr 3.

Czas stabilizacji				20 sek																		
Skok sterowania				10																		
Punt pracy				(40 ; 42)																		
Obiekt				z opóźnieniem																		
metoda identyfikacji				Cohena-Coona																		
P1	stała czasowa obiektu																					
P2	opóźnienie obiektu																					
P3	wzmocnienie obiektu																					
				wskaźnik jakości dla procesu samostrojzenia	Nastawy z procesu samostrojzenia			Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu														
								Cohena-Coona			2.5% przereg.			20% przereg.			ISE			ITAE		
Lp.	P1	P2	P3		P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D
1	49.98	10.820	1.305	Cohena-Coona	3.250	24.880	0	3.250	24.88	0	2.124	33.65	0	2.478	25.81	0	3.540	25.81	0	2.935	26.20	0
2	46.11	11.490	1.278	2.5 % przereg.	1.884	32.250	0	2.891	25.26	0	1.884	32.25	0	2.198	25.32	0	3.140	25.32	0	2.613	26.59	0
3	44.61	13.000	1.197	20 % przereg.	2.006	26.390	0	2.650	27.07	0	1.720	32.71	0	2.007	26.38	0	2.867	26.38	0	2.394	28.62	0
4	48.28	11.000	1.207	ISE	3.635	25.480	0	3.342	24.90	0	2.182	32.94	0	2.545	25.48	0	3.636	25.48	0	3.019	26.20	0
5	42.06	11.790	1.202	ITAE	2.476	26.270	0	2.740	24.89	0	1.781	30.46	0	2.078	24.41	0	2.968	24.41	0	2.476	26.28	0
wartość min	42.06	10.82	1.20		wartość min			2.65	24.88	0	1.72	30.46	0	2.01	24.41	0	2.87	24.41	0	2.39	26.20	0
wartość max	49.98	13.00	1.31		wartość max			3.34	27.07	0	2.18	33.65	0	2.55	26.38	0	3.64	26.38	0	3.02	28.62	0
średnia	46.21	11.62	1.24		średnia			2.97	25.40	0	1.94	32.40	0	2.26	25.48	0	3.23	25.48	0	2.69	26.78	0
uchyb +	3.77	1.38	0.07		uchyb +			0.37	1.67	0	0.24	1.25	0	0.28	0.90	0	0.41	0.90	0	0.33	1.84	0
uchyb -	4.15	0.80	0.04		uchyb -			0.32	0.52	0	0.22	1.94	0	0.25	1.07	0	0.36	1.07	0	0.29	0.58	0
uchyb + [%]	8.16	11.88	5.43		uchyb + [%]			12.35	6.56	0	12.58	3.85	0	12.58	3.53	0	12.58	3.53	0	12.35	6.88	0
uchyb - [%]	8.98	6.88	3.30		uchyb - [%]			10.92	2.05	0	11.25	5.98	0	11.25	4.22	0	11.25	4.22	0	10.93	2.17	0

7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.

W rozdziale tym zajmę się sprawdzeniem poprawności działania zamkniętego układu regulacji z regulatorem, w którym zastosowałem nastawy uzyskane z procedur samostrojzenia zaimplementowanych w regulatorze LB-600 oraz nastawy obliczone na podstawie modelu obiektu z rozdziału 3 (patrz wzór 3.1) i wybranego wskaźnika jakości.

Procedury samostrojzenia były przeprowadzane dla urządzenia w konfiguracji nr 1 (patrz rozdział 3) dla punktu pracy równego **40%**. Zakres zmian wartości zadanej pokrywa się z przedziałem, gdzie obiekt posiada w przybliżeniu liniową charakterystykę statyczną. Badanie zamkniętego układu regulacji polegało na zmianie wartości zadanej z **40%** na **50%** i rejestracji przebiegu czasowego wartości wyjściowej. Dalej oceniana jest jakość uzyskanego przebiegu wartości wyjściowej pod kątem realizacji wybranego wskaźnika jakości.

7.1 Metoda stycznej.

W podrozdziale tym zostanie poddana ocenie jakość działania zamkniętego układu regulacji dla nastaw znajdujących się w tabeli 6-2 (wiersz 5). Nastawy te zostały uzyskane przy użyciu skoku sterowania na początku eksperymentu samostrojzenia wynoszącego **10%**. Dodatkowo działanie tego układu regulacji będzie porównywane z działaniem zamkniętego układu regulacji dla nastaw znajdujących się w tabeli 6-1 (wiersz 3). Nastawy te zostały uzyskane przy użyciu mniejszego skoku sterowania na początku eksperymentu samostrojzenia wynoszącego **5%**.

7.1.1 Wg Zieglera-Nicholsa (Rysunek 7.1).

Dla wskaźnika jakości wg Zieglera-Nicholsa spodziewamy się wystąpienia dość dużego przeregulowania i szybko gasnących oscylacji (o małym współczynniku tłumienia ≤ 0.25).

W układzie wystąpiło małe przeregulowanie wynoszące 4% oraz wolno gasnące oscylacje (współczynnik tłumienia $\frac{A_{k+2}}{A_k} = 0.48$). Układ regulacji dość wolno (78 sekund) osiąga stan ustalony.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło większe przeregulowanie wynoszące 5.1% i mniejszy współczynnik tłumienia $\frac{A_{k+2}}{A_k} = 0.35$ (patrz Rysunek 13.2).

Układ regulacji działał także szybciej (62 sekundy).

Mimo, że w obu przypadkach układ regulacji jest stabilny to przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości ponieważ współczynnik tłumienia jest za duży.

7.1.2 2...5% przeregulowania (Rysunek 7.2).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się wystąpienia przeregulowania rzędu 2-5%.

W układzie wystąpiło przeregulowanie wynoszące około 5.2%. Układ regulacji szybko (47 sekund) osiąga stan ustalony. Ponieważ uzyskane przeregulowanie przekroczyło dopuszczalne granice to przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło jeszcze większe przeregulowanie wynoszące około 7% (Rysunek 13.3). Czas regulacji jest prawie identyczny.

7.1.3 20% przeregulowania (Rysunek 7.3).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się wystąpienia przeregulowania rzędu 20%.

W układzie wystąpiło przeregulowanie wynoszące około 6.3%. Układ regulacji szybko (53 sekundy) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości ponieważ wskaźnik ten zakłada wystąpienie większego przeregulowania. Próbowałam modyfikować nastawy regulatora tak, aby uzyskać większe przeregulowanie. Mimo wielu prób nie udało mi się uzyskać przeregulowania znacznie większego niż 8%.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło większe przeregulowanie wynoszące około 8% (patrz Rysunek 13.4). Układ regulacji działał szybciej (55 sekund).

7.1.4 ISE (Rysunek 7.4).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się szybkiej likwidacji dużego uchybu.

Układ regulacji szybko stara się zlikwidować uchyb powstały w wyniku zmiany wartości zadanej. Sygnał wyjściowy narasta krócej niż dla innych rozpatrywanych wskaźników jakości, jednocześnie występuje stosunkowo małe przeregulowanie. Przez dłuższy czas w układzie występują małe, wolno gasnące oscylacje, mają one jednak mały wpływ na wartość wskaźnika jakości. Układ bardzo długo (100 sekund) osiąga powoli stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło większe przeregulowanie na początku eksperymentu a oscylacje gasły szybciej (patrz Rysunek 13.5). Czas działania układu regulacji jest porównywalny z omówionym wcześniej przypadkiem.

7.1.5 ITAE SP (Rysunek 7.5).

Stosując to kryterium jakości spodziewamy się zaobserwować duży, krótko trwający uchyb regulacji po wystąpieniu zakłócenia, szybkie tłumienie oscylacji i brak uchybu w stanie ustalonym.

Układ regulacji dość wolno likwiduje uchyb powstały w wyniku zmiany wartości zadanej. Likwidacja uchybu trwa wolniej niż w przypadku wskaźnika ISE, jednak w przypadku wskaźnika ITAE ma to mniejszy wpływ na jego wartość (waga czasu na początku eksperymentu jest mniejsza). Występuje bardzo małe przeregulowanie i brak uchybu w stanie ustalonym. Układ regulacji szybko (43 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

W drugim przypadku układ regulacji wydaje się szybciej likwidować powstały w wyniku zmiany wartości zadanej uchyb, jest to jednak okupione większym przeregulowaniem i dłuższym czasem regulacji wynoszącym 53 sekundy (patrz Rysunek 13.6).

7.1.6 ITAE LOAD (Rysunek 7.6).

Badanie zamkniętego układu regulacji dla tego wskaźnika jakości polegało na wprowadzeniu zakłócenia (zamknięcie zaworu nr 2), gdy układ znajdował się w stanie ustalonym. Oczekiwania względem układu regulacji są takie same jak dla ITAE SP.

Układ regulacji dość szybko likwiduje uchyb powstały w wyniku wprowadzenia zakłócenia. Występują szybko gasnące oscylacje, uchyb w stanie ustalonym dąży do 0. Układ regulacji szybko (54 sekundy) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji uzyskujemy prawie identyczny przebieg wartości wyjściowej (patrz Rysunek 13.7).

7.1.7 Wg Cohena-Coona (Rysunek 7.7).

W tym przypadku zastosowałem nastawy regulatora dla wskaźnika jakości według Cohena-Coona, ale obliczone na podstawie parametrów obiektu uzyskanych za pomocą identyfikacji metodą stycznej.

Dla wskaźnika jakości wg Cohena-Coona spodziewamy się wystąpienia dość dużego przeregulowania i szybko gasnących oscylacji (o małym współczynniku tłumienia ≤ 0.25).

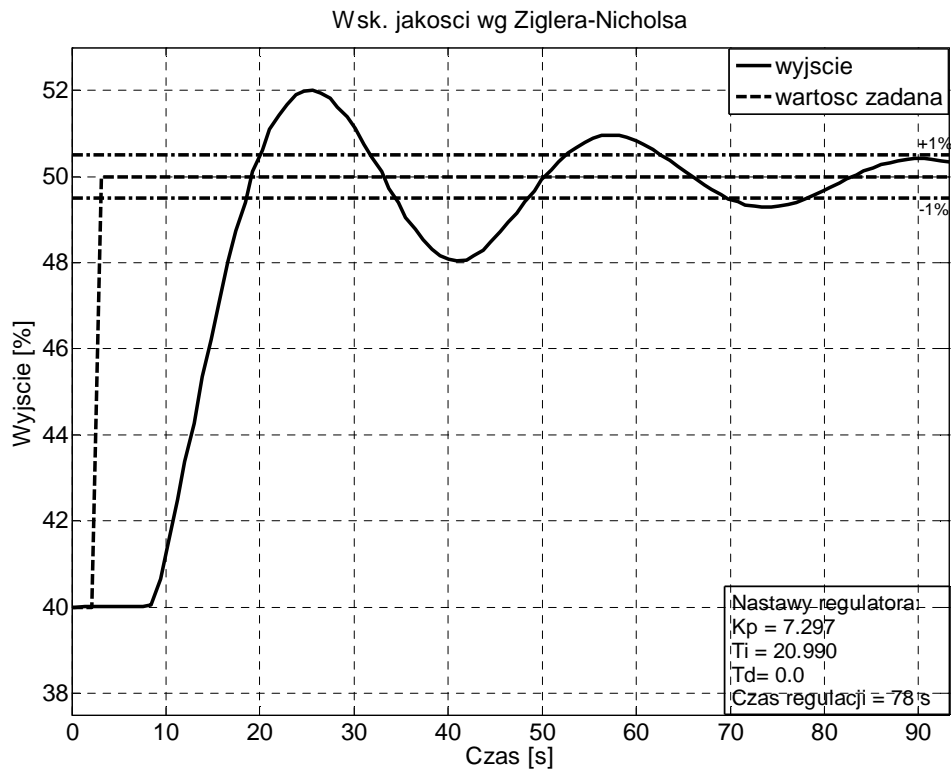
W układzie wystąpiło małe przeregulowanie wynoszące około 5% oraz wolno gasnące oscylacje (współczynnik tłumienia $\frac{A_{k+2}}{A_k} = 0.55$). Układ regulacji wolno (93 sekundy) osiąga stan ustalony. Mimo, że układ regulacji jest stabilny to przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło większe przeregulowanie wynoszące 5.6% i szybciej gasnące oscylacje (współczynnik tłumienia $\frac{A_{k+2}}{A_k} = 0.44$). Układ regulacji szybciej (79 sekund) osiągnął stan ustalony (patrz Rysunek 13.1).

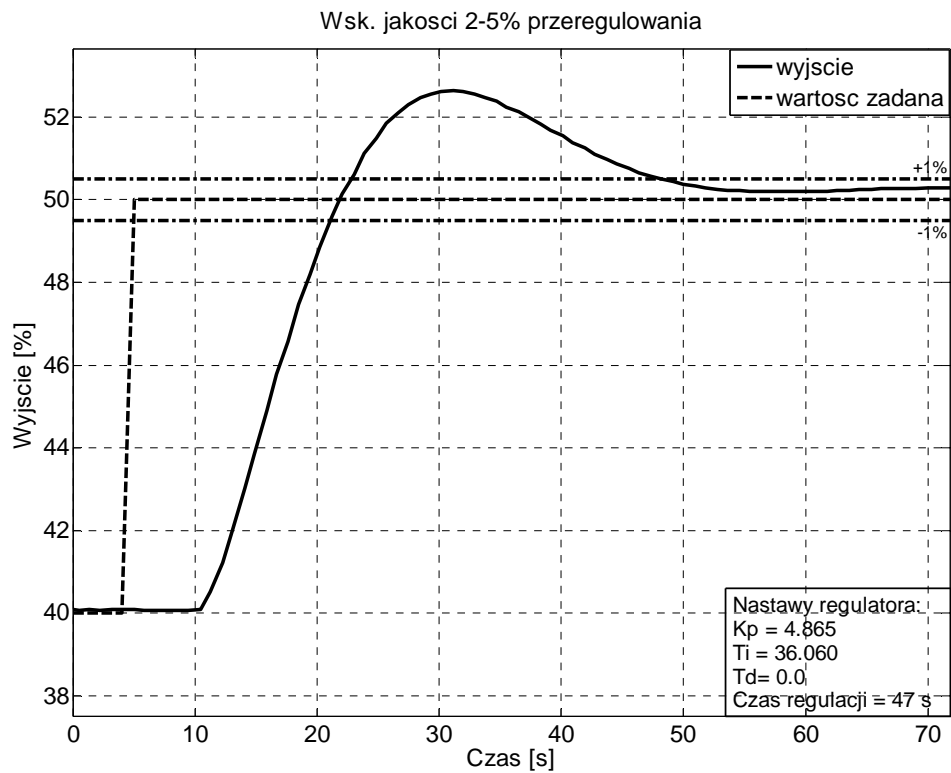
Wnioski:

Mimo, że wartości parametrów obiektu uzyskane dla różnych skoków sterowania na początku eksperymentu samostrojania różnią się dość znacznie, to nie przekłada się to w znaczący sposób na działanie zamkniętego układu regulacji. Dla obu wybranych modeli obiektów (uzyskanych z procedur samostrojania) możemy wybrać wskaźniki jakości, które są lepiej lub gorzej realizowane. Dodatkowo można zauważyć, że czas regulacji dla obu modeli i poszczególnych wskaźników jakości jest bardzo zbliżony.

7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.

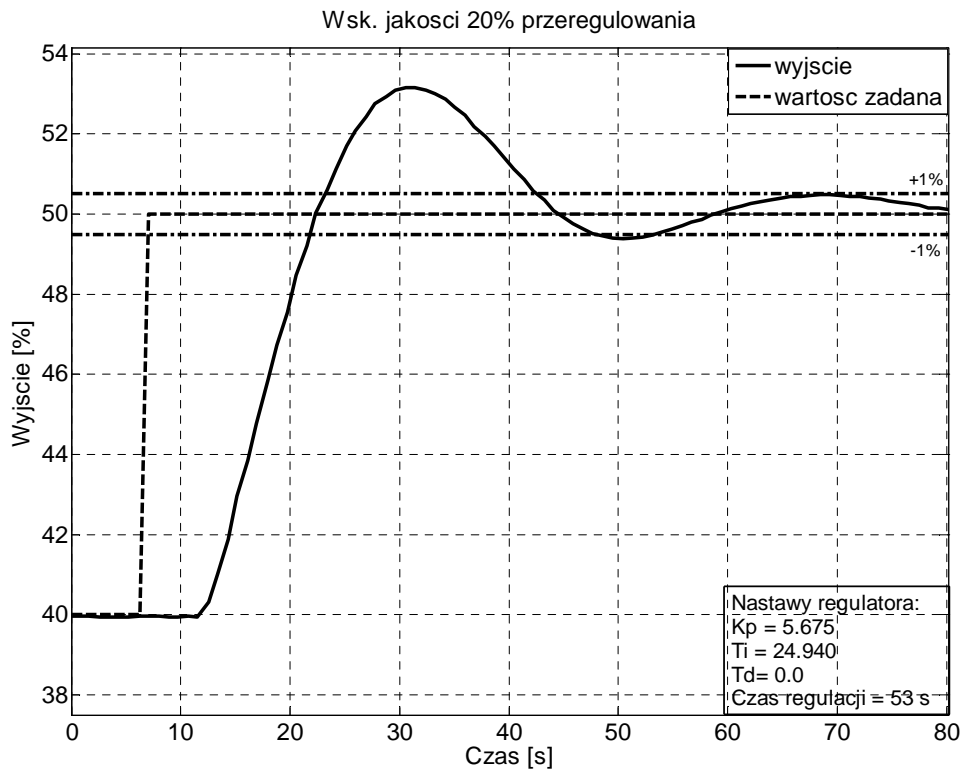


Rysunek 7.1 Metoda stycznej – wskaźnik jakości wg Zieglera-Nicholsa.

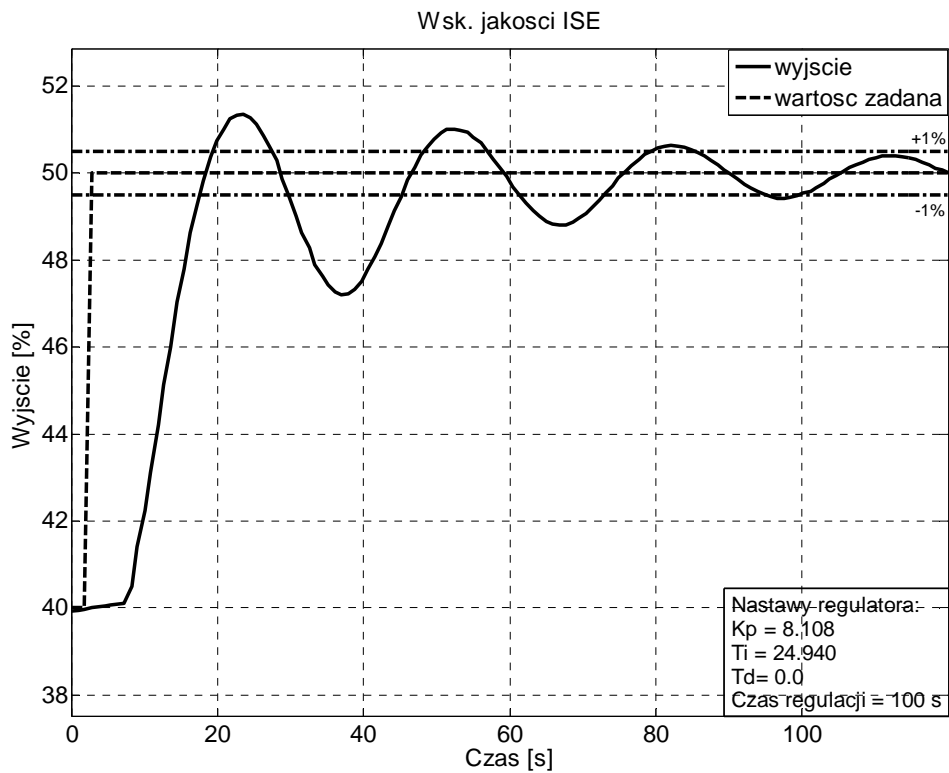


Rysunek 7.2 Metoda stycznej – 2...5% przeregulowania.

7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.

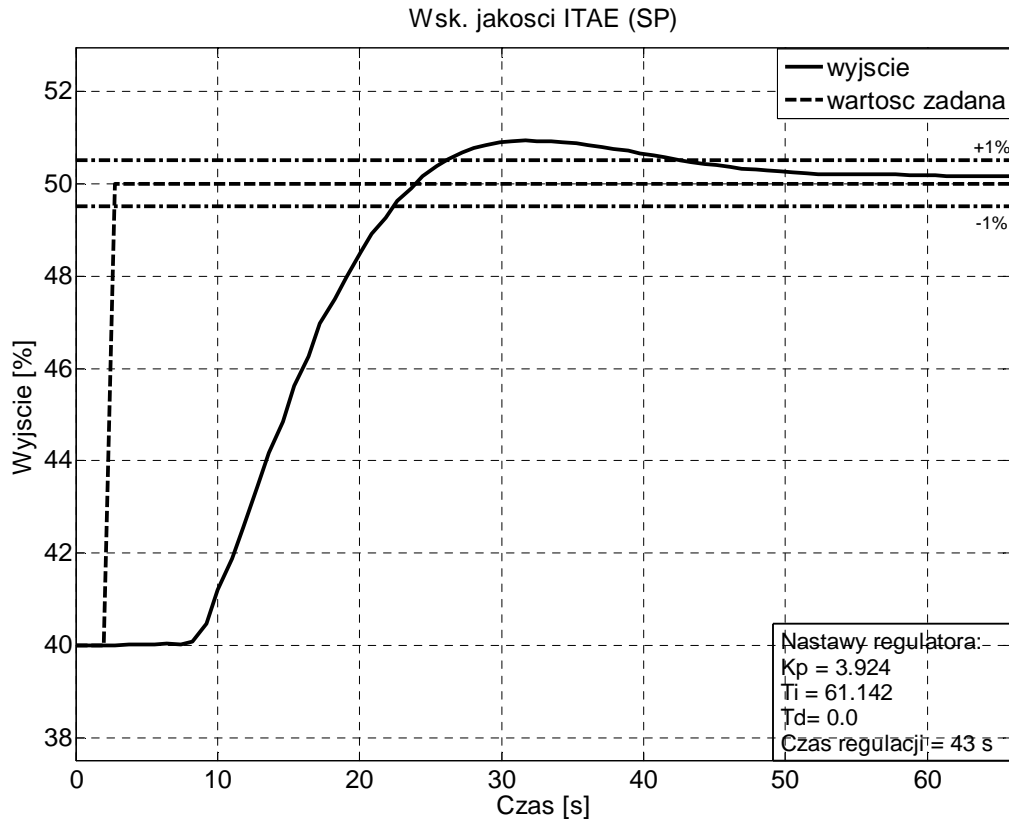


Rysunek 7.3 Metoda stycznej – 20% przeregulowania.

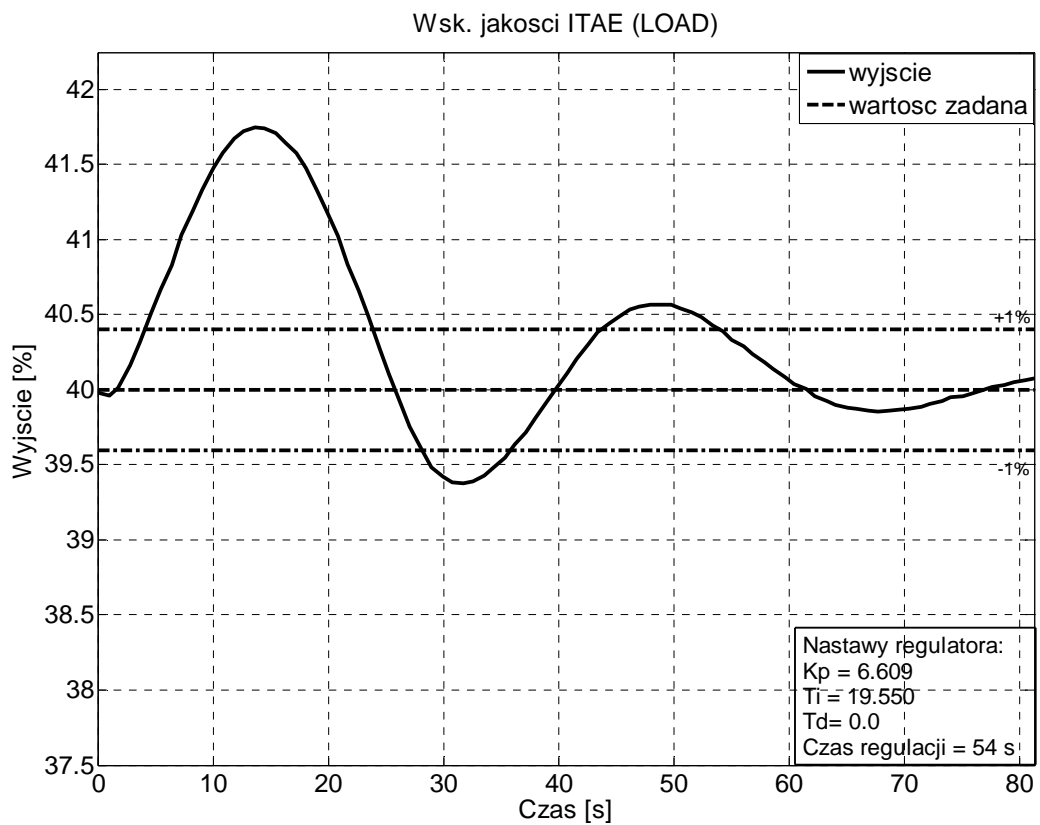


Rysunek 7.4 Metoda stycznej – ISE

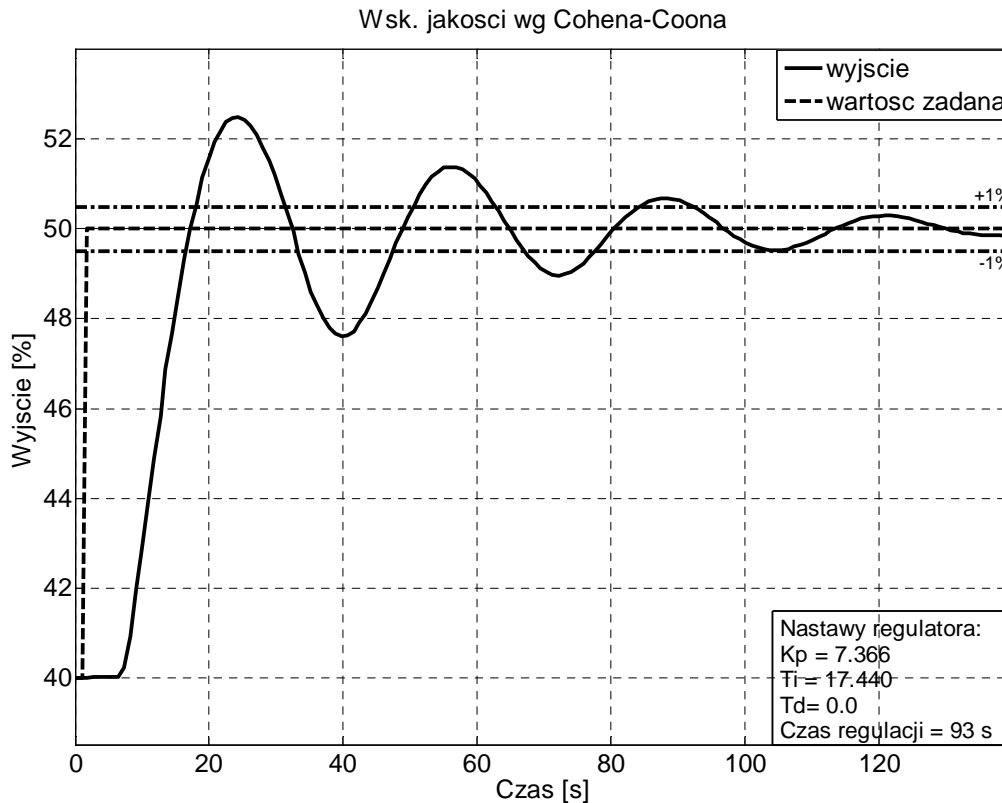
7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.



Rysunek 7.5 Metoda stycznej – ITAE SP.



Rysunek 7.6 Metoda stycznej – ITAE LOAD.



Rysunek 7.7 Metoda stycznej – wskaźnik jakości wg Cohena-Coona

7.2 Metoda Cohena-Coona.

W podrozdziale tym zostanie poddana ocenie jakość działania zamkniętego układu regulacji dla nastaw znajdujących się w tabeli 6-3 (wiersz 3). Nastawy te zostały uzyskane dla czasu stabilizacji wynoszącego **20 sekund**. Dodatkowo działanie tego układu regulacji będzie porównywane z działaniem zamkniętego układu regulacji dla nastaw znajdujących się w tabeli 13-2 (wiersz 3). Nastawy te zostały uzyskane dla czasu stabilizacji wynoszącego **40 sekund**.

7.2.1 Wg Cohena-Coona (Rysunek 7.8).

Dla wskaźnika jakości wg Cohena-Coona spodziewamy się wystąpienia dość dużego przeregulowania i szybko gasnących oscylacji (o małym współczynniku tłumienia ≤ 0.25).

W układzie wystąpiło małe przeregulowanie wynoszące 4.3%, nie wystąpiły natomiast oscylacje. Układ regulacji dość wolno (81 sekund) osiąga stan ustalony. Mimo, że układ regulacji jest stabilny to przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło znacznie większe przeregulowanie wynoszące około 8%, nie wystąpiły natomiast oscylacje (patrz Rysunek 13.8). Układ regulacji szybciej (44 sekundy) osiągnął stan ustalony.

7.2.2 2...5% przeregulowania (Rysunek 7.9).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się wystąpienia przeregulowania rzędu 2-5%.

W układzie wystąpiło przeregulowanie wynoszące około 3.2%. Układ regulacji bardzo wolno (105 sekund) osiąga stan ustalony. Ponieważ uzyskane przeregulowanie mieści się w dopuszczalnych granicach to przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło nieznacznie mniejsze przeregulowanie (patrz Rysunek 13.10). Układ regulacji szybciej (70 sekund) osiągnął stan ustalony.

7.2.3 20% przeregulowania (Rysunek 7.10).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się wystąpienia przeregulowania rzędu 20%.

W układzie wystąpiło małe przeregulowanie wynoszące około 4.3%, układ regulacji bardzo wolno (93 sekundy) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości ponieważ dla tego wskaźnika jakości spodziewaliśmy się wystąpienia większego przeregulowania.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło nieznacznie większe przeregulowanie (patrz Rysunek 13.11). Układ regulacji szybciej (57 sekund) osiągnął stan ustalony.

7.2.4 ISE (Rysunek 7.11).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się szybkiej likwidacji dużego uchybu.

Układ regulacji szybko stara się zlikwidować uchyb powstały w wyniku zmiany wartości zadanej. Sygnał wyjściowy narasta szybciej niż dla innych rozpatrywanych wskaźników jakości. W układzie występuje duże przeregulowanie (większe niż dla wskaźników jakości 5% i 20% przeregulowania). Układ dość wolno (70 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika

jakości – używając tego wskaźnika jakości spodziewamy się jednak uzyskać mniejsze przeregulowanie.

W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło większe przeregulowanie na początku eksperymentu i krótszy czas regulacji wynoszący 40 sekund (patrz Rysunek 13.12).

7.2.5 ITAE SP (Rysunek 7.12).

Stosując to kryterium jakości spodziewamy się zaobserwować duży, krótko trwający uchyb regulacji po wystąpieniu zakłócenia, szybkie tłumienie oscylacji i brak uchybu w stanie ustalonym.

Układ regulacji dość wolno likwiduje uchyb powstały w wyniku zmiany wartości zadanej. Likwidacja uchybu trwa wolniej niż w przypadku wskaźnika ISE, jednak w przypadku wskaźnika ITAE ma to mniejszy wpływ na jego wartość. Występuje bardzo małe przeregulowanie i brak uchybu w stanie ustalonym. Układ regulacji bardzo wolno (124 sekundy) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji występuje bardzo małe przeregulowanie i brak uchybu w stanie ustalonym (patrz Rysunek 13.13). Układ regulacji działa znacznie szybciej i osiąga stan ustalony w 31 sekund.

7.2.6 ITAE LOAD (Rysunek 7.13).

Badanie zamkniętego układu regulacji dla tego wskaźnika jakości polegało na wprowadzeniu zakłócenia, gdy układ znajdował się w stanie ustalonym – zamknięcie zaworu nr 2 (patrz rozdział 3). Oczekiwania względem układu regulacji takie same jak dla ITAE SP.

Układ regulacji dość wolno likwiduje uchyb powstały w wyniku wprowadzenia zakłócenia. Uchyb w stanie ustalonym dąży do 0. Układ regulacji dość wolno (70 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

W przypadku drugiego układu regulacji, następuje szybsza likwidacja uchybu powstałego w wyniku wprowadzenia zakłócenia (Rysunek 13.14). Układ regulacji osiąga ponownie stan ustalony po upływie 32 sekund.

7.2.7 Wg Zieglera-Nicholsa (Rysunek 7.14).

W tym przypadku zastosowałem nastawy regulatora dla wskaźnika jakości według Zieglera-Nicholsa, ale obliczone na podstawie parametrów obiektu uzyskanych za pomocą identyfikacji metodą Cohena-Coona.

Dla wskaźnika jakości wg Zieglera-Nicholsa spodziewamy się wystąpienia dość dużego przeregulowania i szybko gasnących oscylacji (o małym współczynniku tłumienia ≤ 0.25).

W układzie wystąpiło dość duże przeregulowanie wynoszące około 7%. Układ regulacji dość wolno (78 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

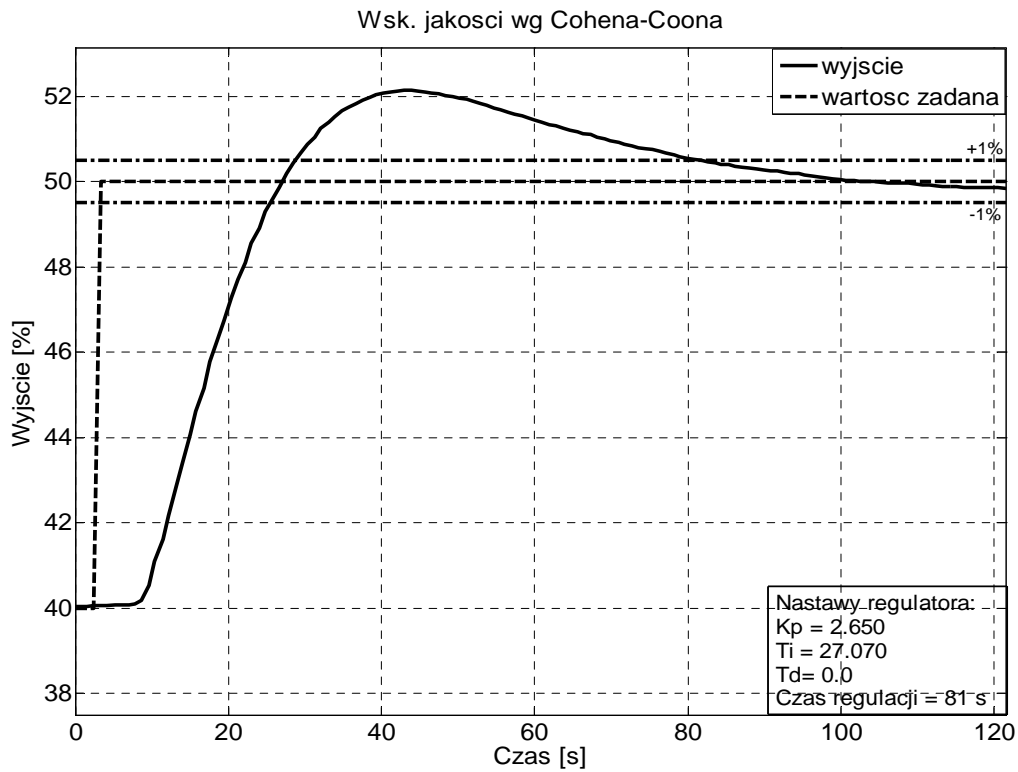
W przypadku drugiego układu regulacji wystąpiło znacznie mniejsze przeregulowanie i wolno gasnące oscylacje (współczynnik tłumienia $\frac{A_{k+2}}{A_k} = 0.54$). Układ regulacji wolno (85 sekund) osiąga stan ustalony (patrz Rysunek 13.9).

Wnioski:

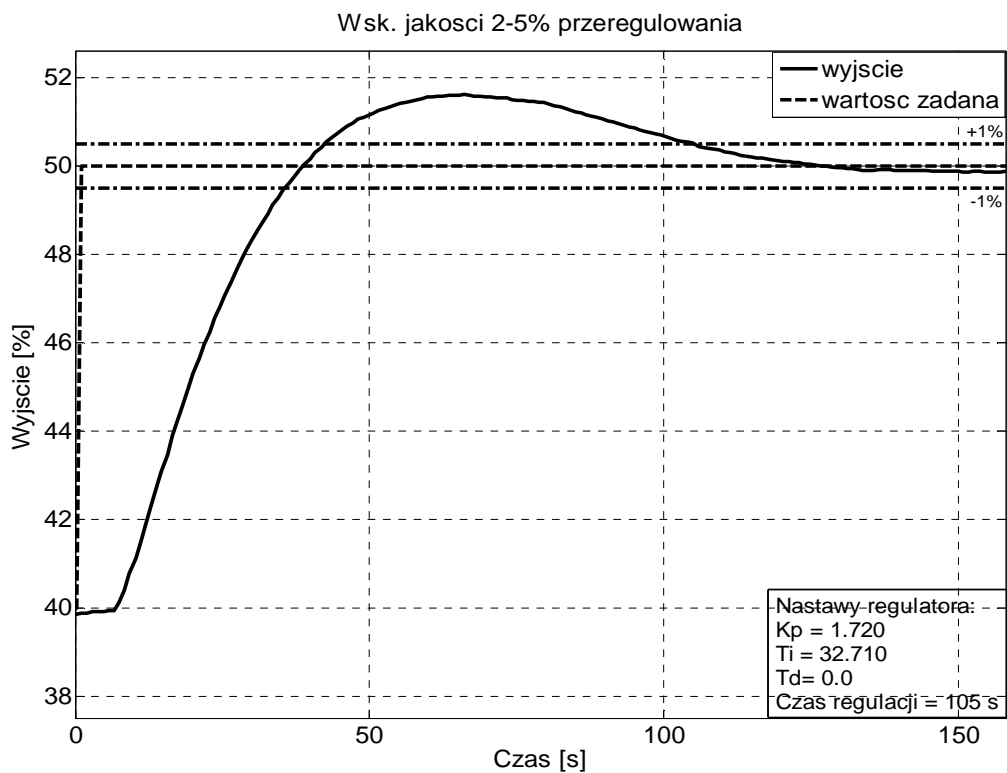
W przypadku zastosowania metody Cohena-Coona do identyfikacji obiektu, uzyskujemy przeszacowane opóźnienie obiektu. Działanie zamkniętego układu regulacji jest prawie identyczne dla wszystkich rozpatrywanych wskaźników jakości. Nie widać między nimi znaczących różnic, jakie można zaobserwować dla wskaźników jakości i parametrów obiektu uzyskanych za pomocą metody stycznej. Wydaje mi się, że metoda identyfikacji wg Cohena-Coona nie pasuje do badanego obiektu – przeszacowane opóźnienie obiektu negatywnie odbija się na jakości działania zamkniętego układu regulacji.

Dla modelu obiektu uzyskanego z procedur samostrojzenia, gdzie zastosowano czas stabilizacji procesu wynoszący 40 sekund, układ regulacji działa znacznie szybciej.

7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.

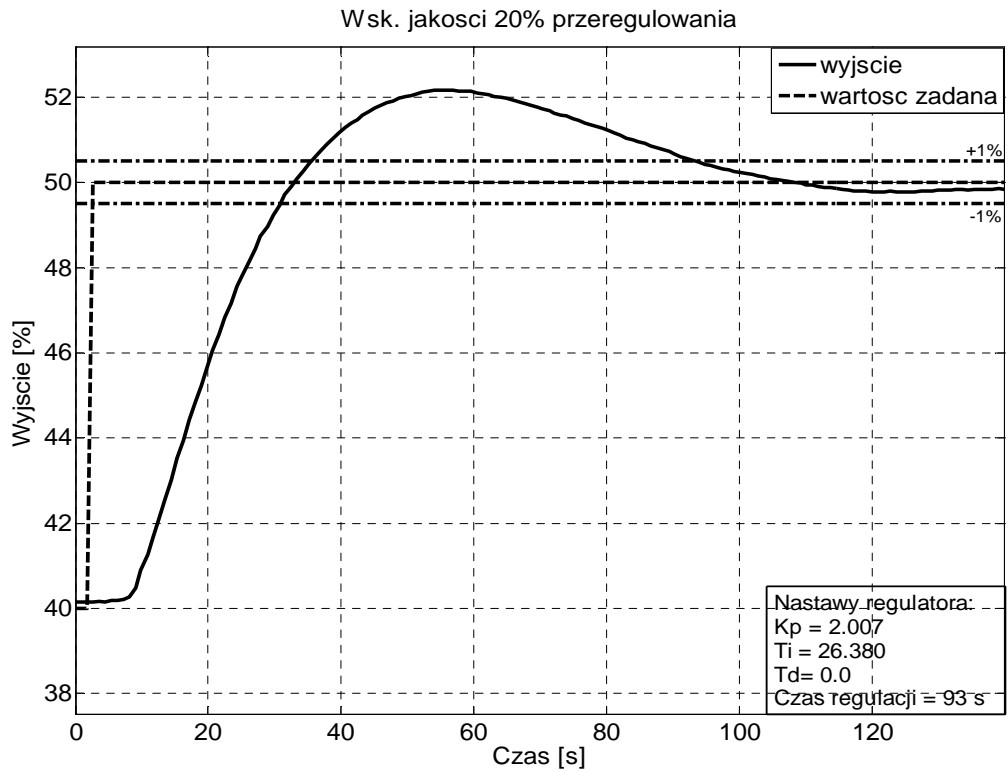


Rysunek 7.8 Metoda Cohena-Coona – wskaźnik jakości wg Cohena-Coona.

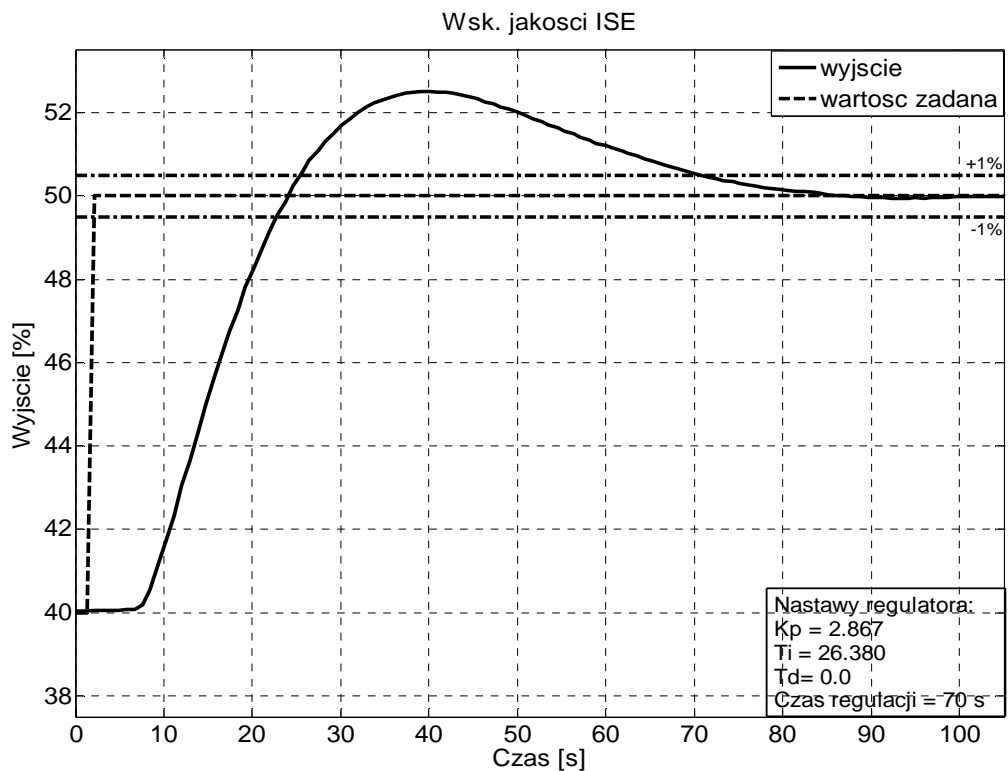


Rysunek 7.9 Metoda Cohena-Coona – 2...5% przeregulowania.

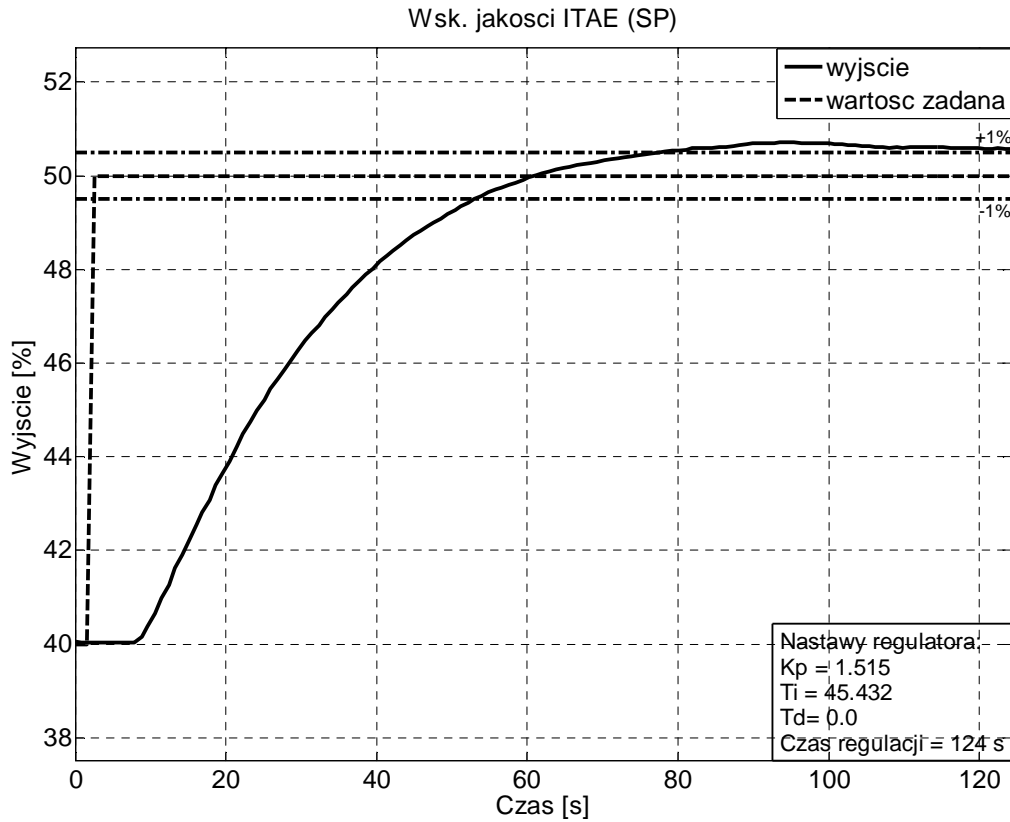
7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.



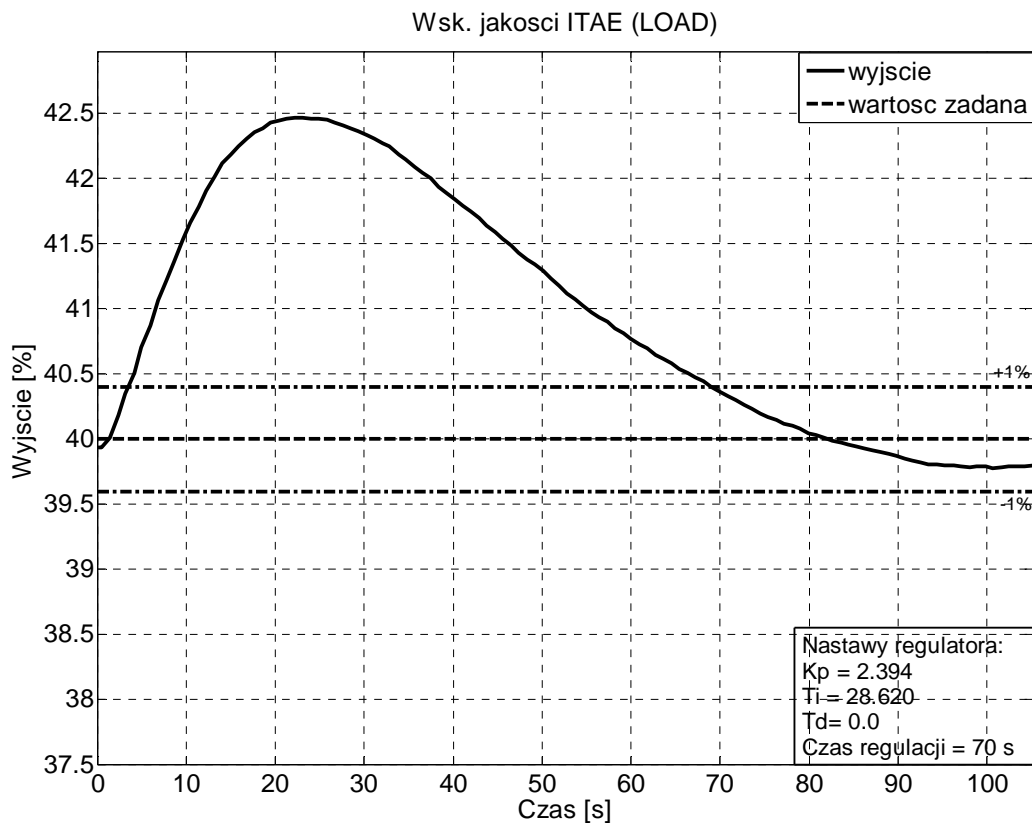
Rysunek 7.10 Metoda Cohena-Coona – 20% przeregulowania.



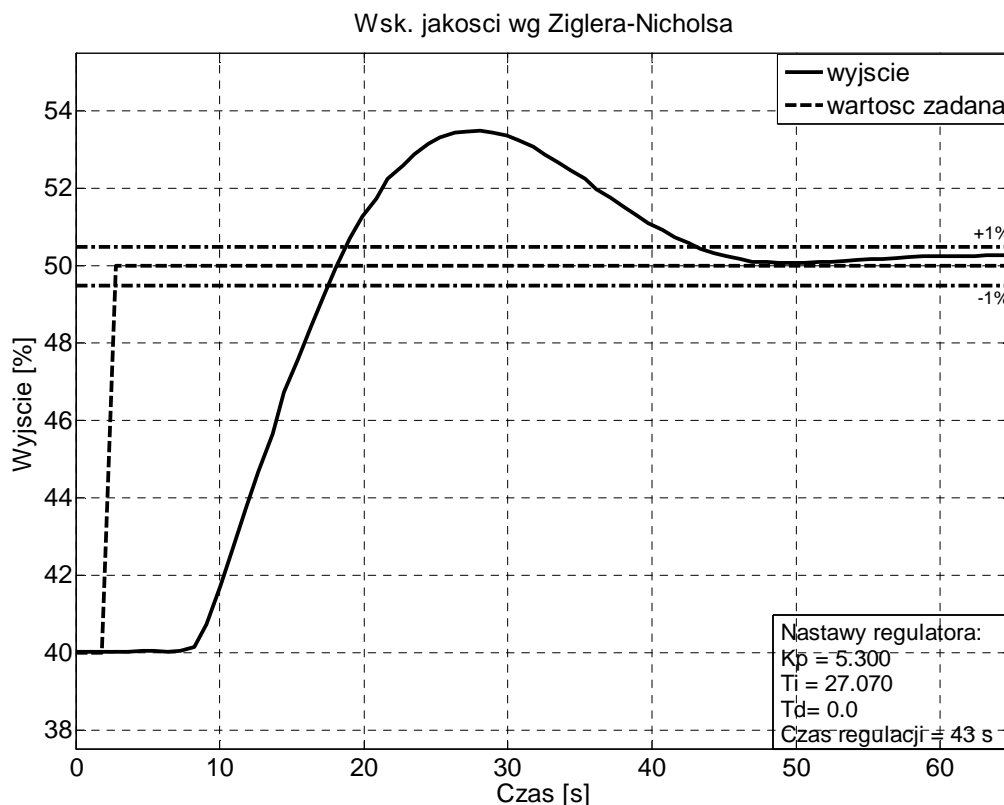
Rysunek 7.11 Metoda Cohena-Coona – ISE.



Rysunek 7.12 Metoda Cohena-Coona – ITAE SP.



Rysunek 7.13 Metoda Cohena-Coona – ITAE LOAD.



Rysunek 7.14 Metoda Cohena-Coona - wskaźnik jakości wg Zieglera-Nicholsa

7.3 Model obiektu.

7.3.1 Wg Cohena-Coona (Rysunek 7.15).

Dla wskaźnika jakości wg Cohena-Coona spodziewamy się wystąpienia dość dużego przeregulowania i szybko gasnących oscylacji (o małym współczynniku tłumienia ≤ 0.25).

W układzie wystąpiło małe przeregulowanie wynoszące około 5.6% oraz dość szybko gasnące oscylacje (współczynnik tłumienia $\frac{A_{k+2}}{A_k} = 0.33$). Układ regulacji dość szybko (66 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości ponieważ współczynnik tłumienia jest zbyt duży.

7.3.2 Wg Zieglera-Nicholsa (Rysunek 7.16).

Dla wskaźnika jakości wg Zieglera-Nicholsa spodziewamy się wystąpienia dość dużego przeregulowania i szybko gasnących oscylacji (o małym współczynniku tłumienia ≤ 0.25).

W układzie wystąpiło dość duże przeregulowanie wynoszące około 5.3% oraz szybko gasnące oscylacje (współczynnik tłumienia $\frac{A_{k+2}}{A_k} = 0.25$). Układ regulacji dość szybko (64 sekundy) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

7.3.3 2...5% przeregulowania (Rysunek 7.17).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się wystąpienia przeregulowania rzędu 2-5%.

W układzie wystąpiło przeregulowanie wynoszące około 3.5%. Układ regulacji szybko (41 sekund) osiąga stan ustalony. Ponieważ uzyskane przeregulowanie mieści się w dopuszczalnych granicach to przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

7.3.4 20% przeregulowania (Rysunek 7.18).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się wystąpienia przeregulowania rzędu 20%.

W układzie wystąpiło przeregulowanie wynoszące około 6.7%. Układ regulacji szybko (41 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej nie spełnia założeń wybranego wskaźnika jakości – dla tego wskaźnika jakości spodziewaliśmy się większego przeregulowania.

7.3.5 ISE (Rysunek 7.19).

Dla tego wskaźnika jakości spodziewamy się szybkiej likwidacji dużego uchybu.

Układ regulacji szybko stara się zlikwidować uchyb powstały w wyniku zmiany wartości zadanej. Sygnał wyjściowy narasta krócej niż dla innych rozpatrywanych wskaźników jakości, jednocześnie występuje stosunkowo małe przeregulowanie. Przez dłuższy czas w układzie występują małe, wolno gasnące oscylacje, mają one jednak mały wpływ na wartość wskaźnika jakości. Układ dość długo (72 sekundy) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

7.3.6 ITAE SP (Rysunek 7.20).

Stosując to kryterium jakości spodziewamy się zaobserwować duży, krótko trwający uchyb regulacji po wystąpieniu zakłócenia, szybkie tłumienie oscylacji i brak uchybu w stanie ustalonym.

Układ regulacji bardzo szybko likwiduje uchyb powstały w wyniku zmiany wartości zadanej. Likwidacja uchybu trwa wolniej niż w przypadku wskaźnika ISE, jednak w przypadku wskaźnika ITAE ma to mniejszy wpływ na wartość wskaźnika jakości (waga czasu na początku eksperymentu jest mniejsza). Występuje bardzo małe przeregulowanie i brak uchybu w stanie ustalonym. Układ regulacji bardzo szybko (25 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

7.3.7 ITAE LOAD (Rysunek 7.21).

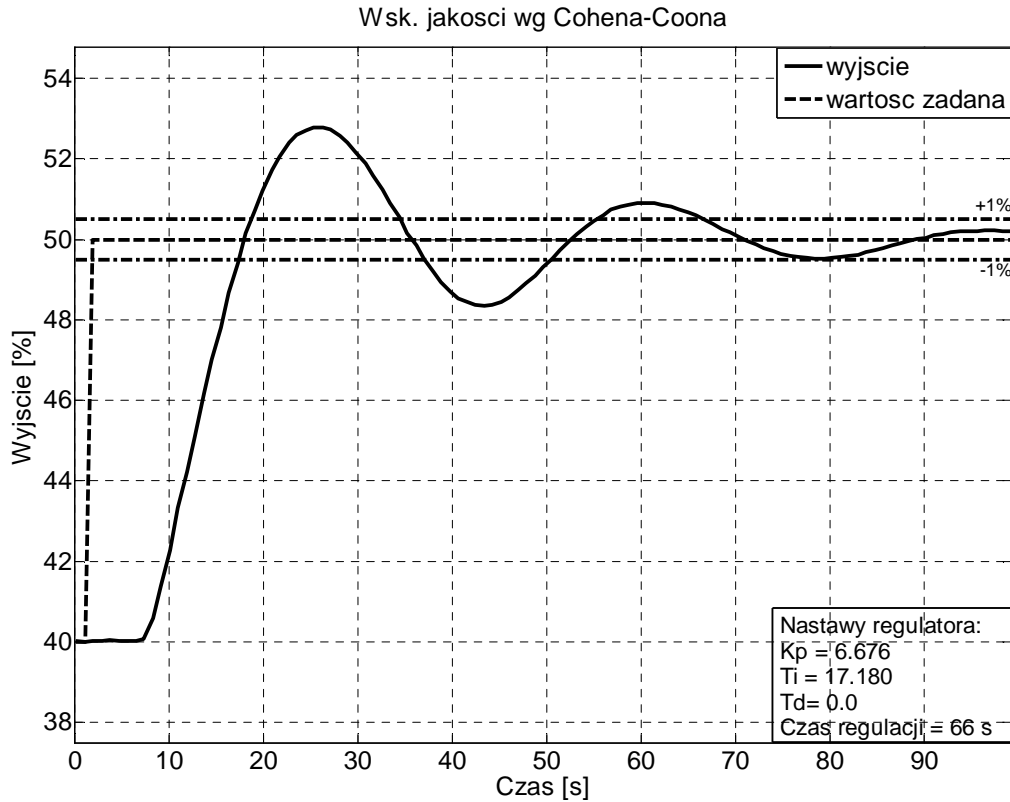
Badanie zamkniętego układu regulacji dla tego wskaźnika jakości polegało na wprowadzeniu zakłócenia (zamknięcie zaworu nr 2), gdy układ znajdował się w stanie ustalonym. Oczekiwania względem układu regulacji takie same jak dla ITAE SP.

Układ regulacji szybko likwiduje uchyb powstały w wyniku wprowadzenia zakłócenia. Występują szybko gasnące oscylacje, uchyb w stanie ustalonym dąży do 0. Układ regulacji szybko (55 sekund) osiąga stan ustalony. Przebieg wartości wyjściowej spełnia założenia wybranego wskaźnika jakości.

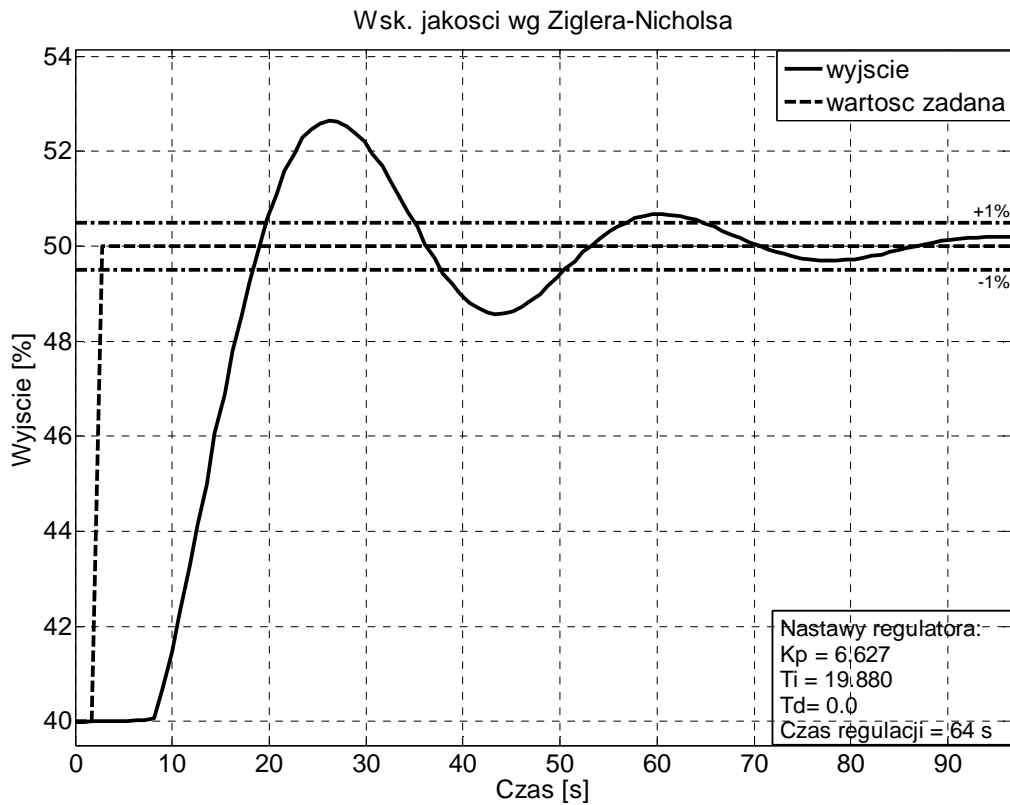
Wnioski:

Układ regulacji bazujący na wyznaczonym przeze mnie w rozdziale 3 modelu obiektu działa najlepiej, realizuje poprawnie większość wskaźników jakości i działa przy tym dość szybko.

7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.

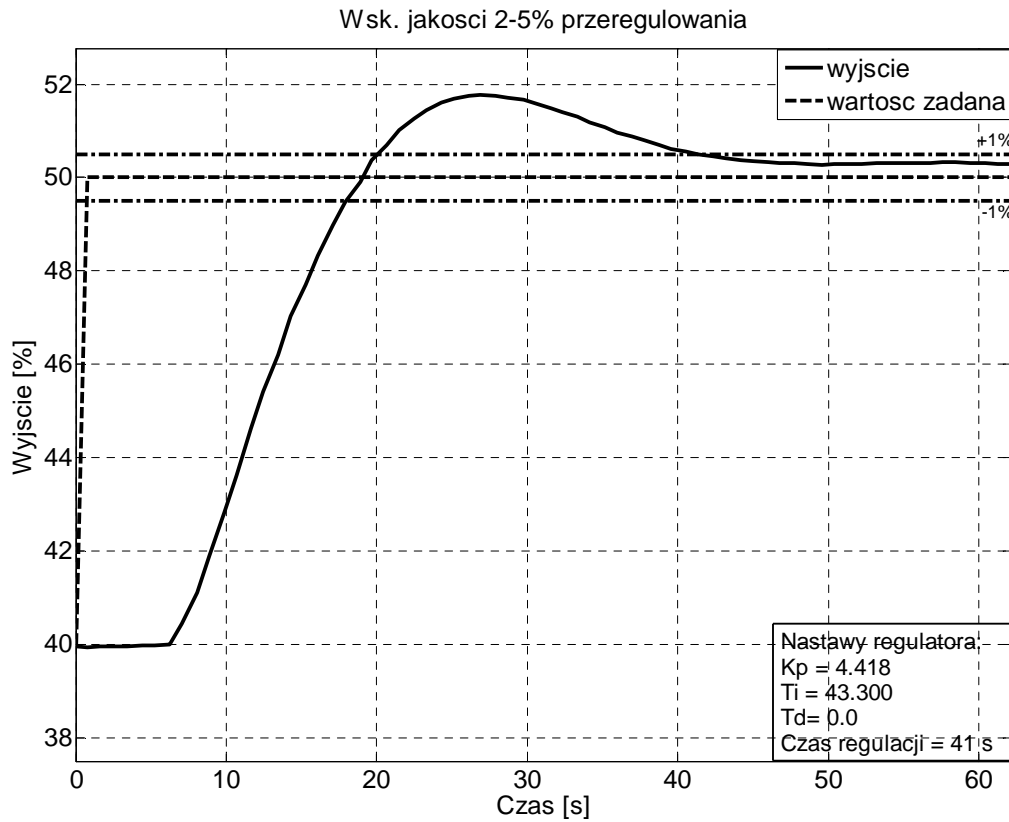


Rysunek 7.15 Model - wskaźnik jakości wg Cohena-Coona

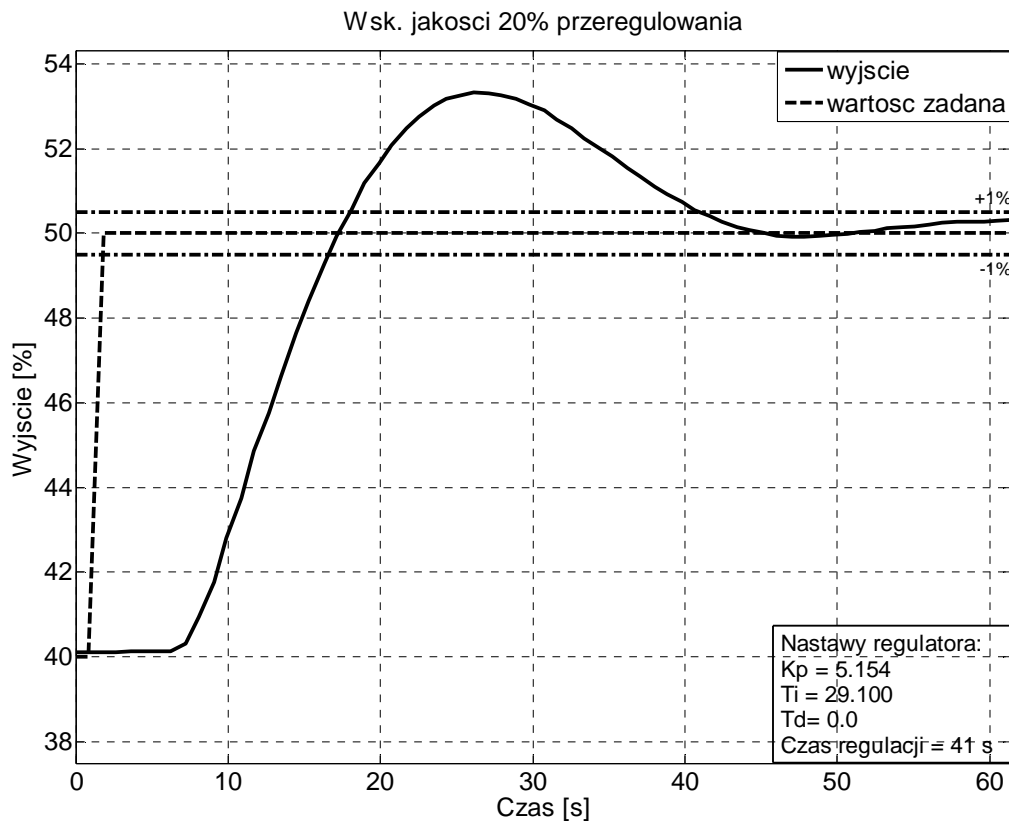


Rysunek 7.16 Model - wskaźnik jakości wg Zieglera-Nicholsa

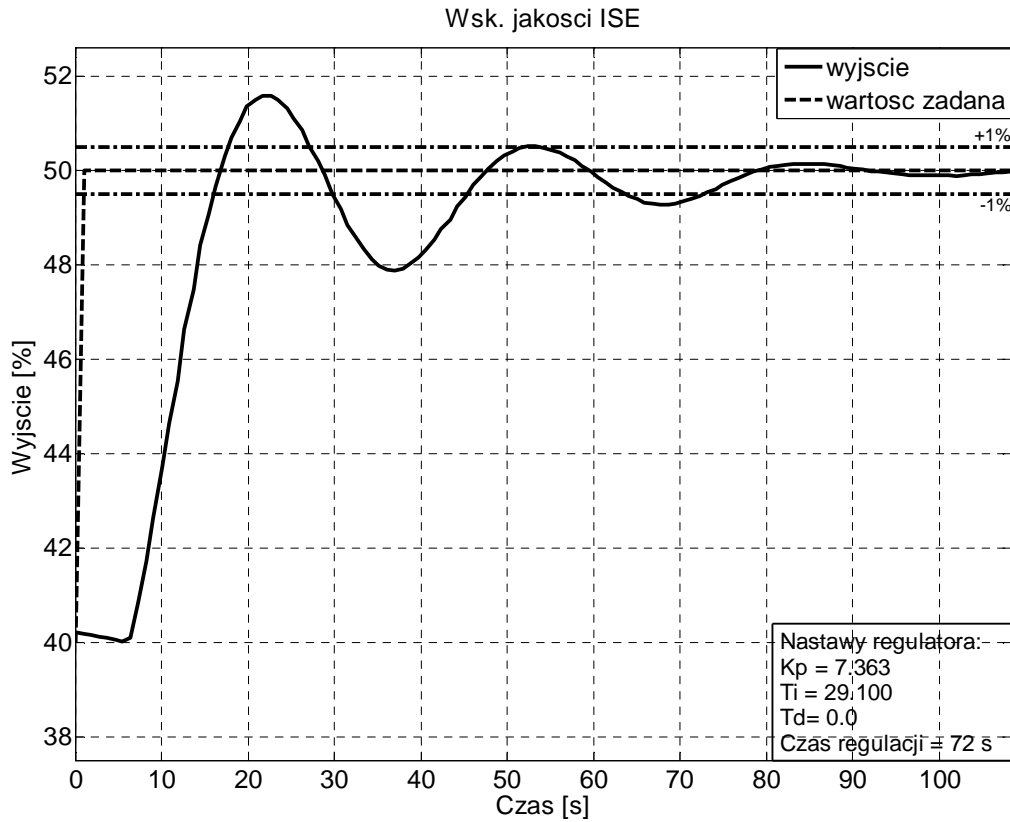
7. Ocena jakości działania zamkniętego układu regulacji.



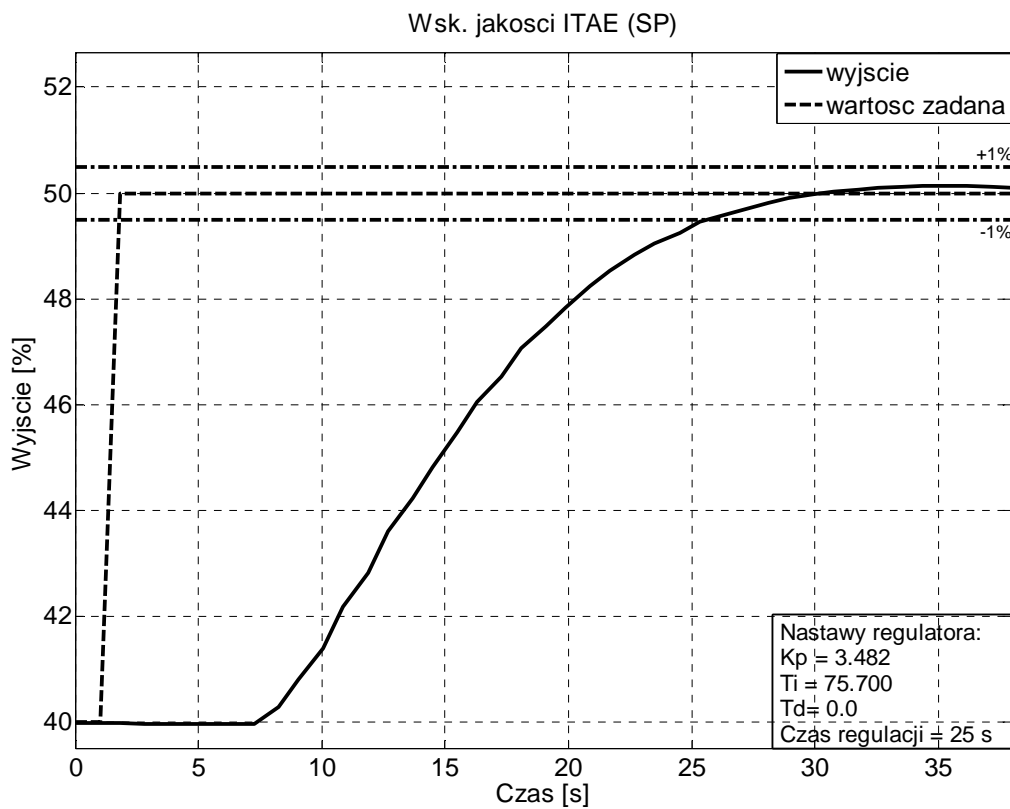
Rysunek 7.17 Model - 2...5% przeregulowania.



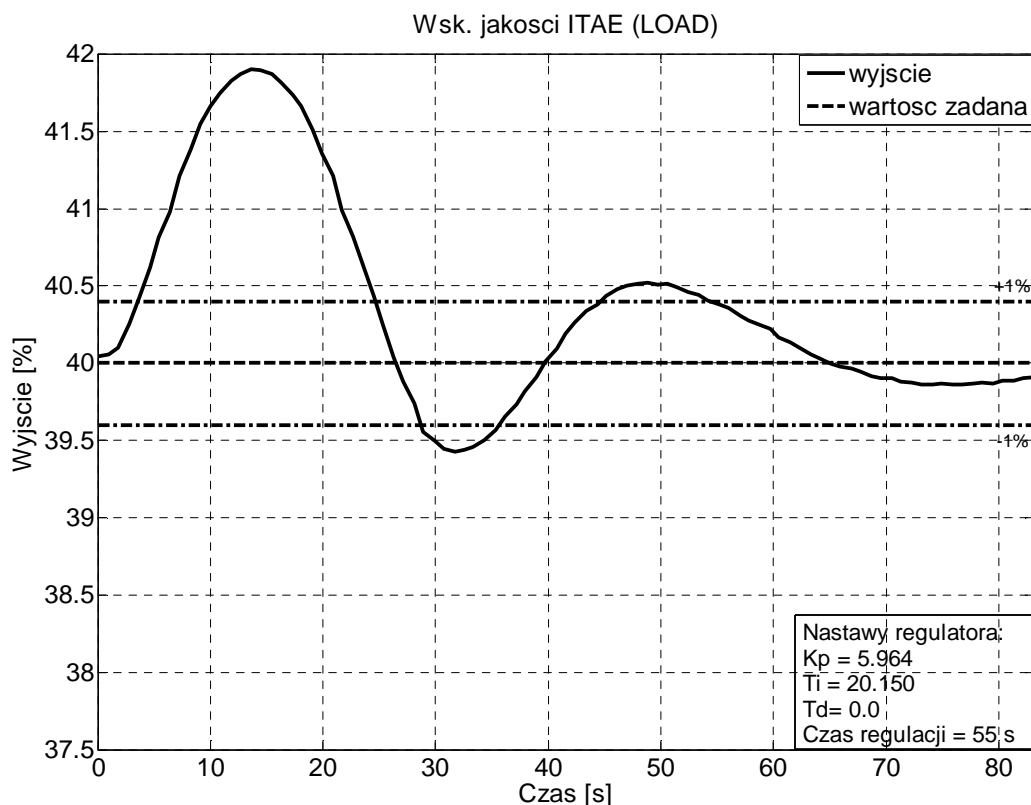
Rysunek 7.18 Model - 20% przeregulowania.



Rysunek 7.19 Model - ISE.



Rysunek 7.20 Model - ITAE SP



Rysunek 7.21 Model - ITAE LOAD

7.4 Wnioski.

Dla obu metod samostrojania uzyskane nastawy regulatora PID zapewniały stabilność zamkniętego układu regulacji. W przypadku, gdy nastawy regulatora były obliczone na podstawie wybranego wskaźnika jakości i parametrów obiektu, uzyskanych przy użyciu metody stycznej, układ regulacji działał szybciej niż w przypadku, gdy parametry tego obiektu były uzyskane przy użyciu metody Cohena-Coona.

Dla parametrów obiektu uzyskanych przy użyciu metody stycznej zamknięty układ regulacji realizuje poprawie większość wskaźników jakości, poza przypadkiem wskaźnika 2...5% przeregulowania, gdzie przeregulowanie przekroczyło dopuszczalne granice i wskaźnika jakości 20% przeregulowania, gdzie uzyskane przeregulowanie jest znacznie niższe od zakładanego.

Dla parametrów obiektu uzyskanych przy użyciu metody Cohena-Coona uzyskane przebiegi czasowe sygnału wyjściowego są bardzo podobne dla wszystkich wskaźników jakości. Wydaje mi się, że metoda identyfikacji wg Cohena-Coona nie

pasuje do badanego obiektu, co przekłada się na słabą realizację wybranych wskaźników jakości.

Dla wyznaczonego modelu obiektu. Zamknięty układ regulacji realizuje poprawnie większość wskaźników jakości, poza przypadkiem wskaźnika jakości 20% przeregulowania, gdzie przeregulowanie jest znacznie niższe od zakładanego. Pozostałe wskaźniki jakości są lepiej realizowane niż w przypadku, gdy parametry obiektu były uzyskane przy użyciu metody stycznej. Samodzielnie przeprowadzona identyfikacja (metodą stycznej) obiektu jest zatem najdokładniejsza, co przekłada się na działanie zamkniętego układu regulacji. W trakcie trwania procedury samostrojenia regulator LB-600 zbiera od 50 do 100 próbek sygnału wyjściowego, natomiast przeprowadzana przeze mnie identyfikacja bazowała na ponad 300 próbkach. Uważam, że warto przeanalizować dokładność uzyskiwanych parametrów obiektu od liczby zbieranych próbek.

8. Analiza algorytmów identyfikacji.

Działanie procedury samostrojzenia w dużej mierze zależy od powtarzalności i dokładności procesu identyfikacji parametrów modelu obiektu. Zdecydowałem się zatem przeprowadzić pewną analizę dostępnych w regulatorze LB-600 metod identyfikacji.

8.1 Metoda stycznej.

Pierwszym etapem tej metody jest wyznaczenie stycznej o największym współczynniku kierunkowym. Badanie metody stycznej będzie uwzględniać dokładność uzyskiwanych parametrów obiektu w zależności od liczby punktów użytych do aproksymowania prostej stycznej do wykresu oraz liczby zebranych próbek z odpowiedzi skokowej obiektu.

8.1.1 Obiekt bez zakłóceń.

Rozważmy obiekt bez zakłóceń o zastępczej stałej czasowej równej 120, wzmacnieniu równym 2.1 oraz opóźnieniu wynoszącym 12 sekund. Obiekt taki ma transmitancję wyrażoną następującym wzorem: $G(s) = \frac{2.1}{120s + 1} e^{-12s}$.

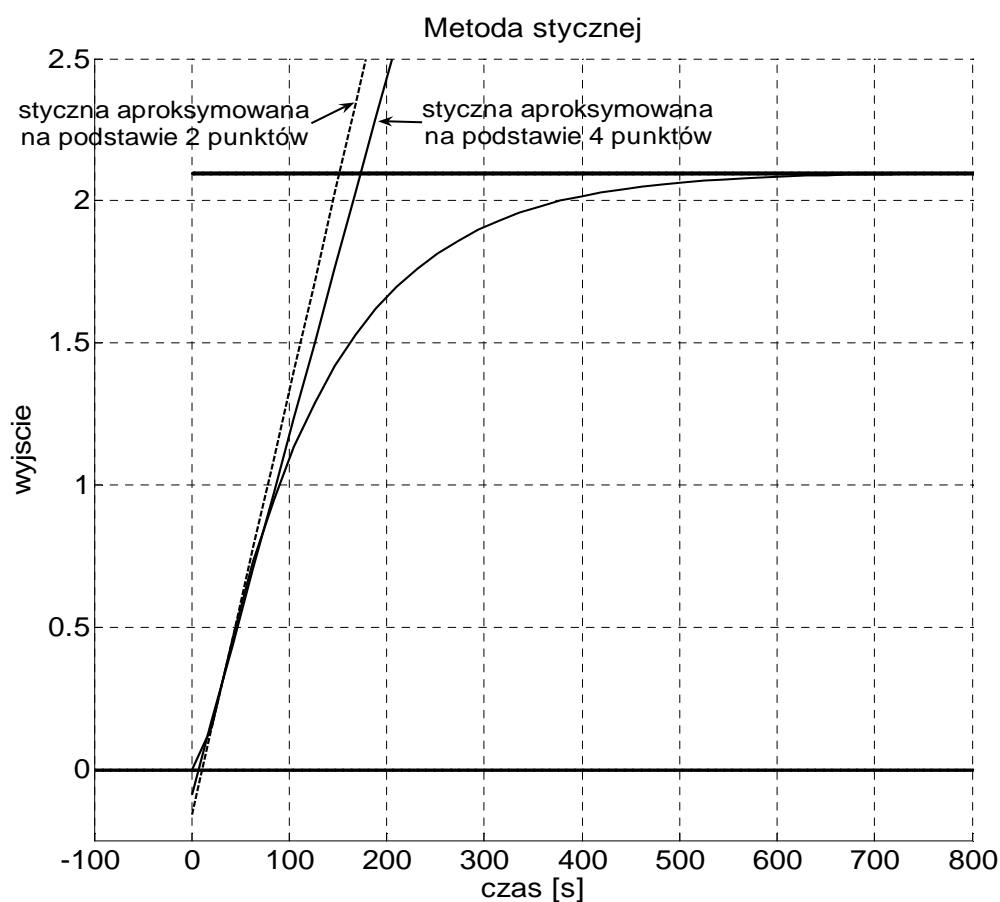
Tabela 8-1 Metoda stycznej (zależność od liczby zebranych próbek).

Liczba próbek	Liczba punktów użytych do aproksymacji stycznej	Wzmocnienie obiektu	Stała czasowa obiektu	Opóźnienie obiektu
1000	2	2.1	120.98	12.00
500	2	2.1	121.48	12.00
200	2	2.1	123.00	12.00
150	2	2.1	125.58	11.92
100	2	2.1	136.47	11.09
75	2	2.1	129.24	11.86
50	2	2.1	140.96	10.81
1000	4	2.1	123.00	11.98
500	4	2.1	124.53	11.96
200	4	2.1	129.21	11.85
150	4	2.1	132.99	11.60
100	4	2.1	140.49	10.83
75	4	2.1	144.65	10.78
50	4	2.1	166.38	7.11
1000	6	2.1	125.04	11.94
500	6	2.1	127.64	11.87

200	6	2.1	135.65	11.49
150	6	2.1	140.73	10.98
100	6	2.1	151.00	9.85
75	6	2.1	161.43	8.52
50	6	2.1	185.63	2.05

Analizując dane z przeprowadzonych doświadczeń można powiedzieć, że zwiększenie liczby próbek poprawia znacznie dokładność uzyskiwanych wyników. Taki sam wpływ na uzyskiwane wyniki ma zmniejszenie liczby punktów branych do aproksymacji prostej.

Aktualnie regulator LB-600 zbiera od 50 do 100 próbek. Mając na uwadze ograniczone zasoby pamięciowe regulatora i jego wydajność proponowałbym zwiększenie liczby zbieranych próbek do 200-250. W przypadku obiektu z zakłóceniami zwiększenie liczby zbieranych próbek może mieć jednak negatywny wpływ na jakość sygnału – mogą pojawić się zakłócenia, które aktualnie są niewidoczne z powodu małej liczby próbek.



Rysunek 8.1. Metoda stycznej – obiekt bez zakłóceń.

Powyższy rysunek przedstawia wykresy uzyskanych stycznych dla liczby próbek równej 50 oraz odpowiednio dla 2 punktów aproksymacji (linia przerywana) oraz 4 punktów aproksymacji (linia ciągła). Z wykresu widać, że prosta aproksymowana na podstawie 4 punktów ma mniejszy współczynnik kierunkowy niż prosta aproksymowana na podstawie 2 punktów. W przypadku prostej o większym współczynniku kierunkowym uzyskujemy dokładniejsze wartości parametrów obiektu.

Tabela 8-2 Metoda stycznej - zależność od liczby punktów branych do aproksymacji stycznej.

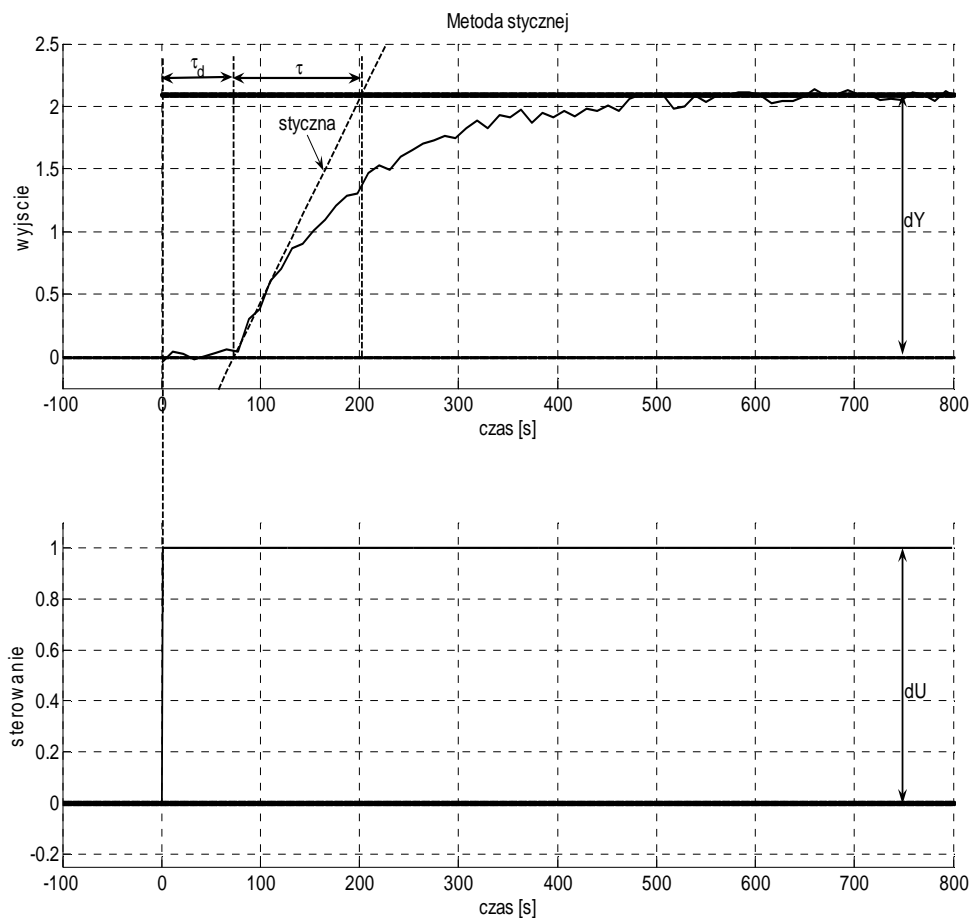
	Wzmocnienie	Stała czasowa	Opóźnienie
Aproksymacja na podstawie 2 punktów	2.0994	140.95	10.81
Aproksymacja na podstawie 4 punktów	2.0994	166.38	7.11

Regulator dysponuje tylko stoma próbkami, biorąc pod uwagę czas trwania eksperymentu samostrojania, kolejne próbki są najprawdopodobniej dość znacznie oddalone od siebie w czasie. Krzywa reprezentująca przebieg czasowy wartości wyjściowej charakteryzuje się największą szybkością narastania w początkowej fazie. Logiczne zatem się wydaje uwzględniając te dwa fakty, że aproksymując prostą na podstawie większej ilości punktów uzyskujemy prostą o mniejszym współczynniku kierunkowym, czyli mniej dokładne wartości parametrów obiektu.

8.1.2 Obiekt z zakłóceniami.

W rzeczywistym obiekcie uzyskany przebieg wartości wyjściowej będzie posiadał pewne zakłócenia. Rozważmy zatem nasz obiekt o transmitancji $G(s) = \frac{2.1}{120s + 1} e^{-12s}$ wprowadzając pewne zakłócenia do otrzymanej wartości wyjściowej (patrz Rysunek 8.2).

Tabela 8-3 przedstawia wyniki uzyskane dla algorytmu samostrojania metodą stycznej, która dysponowała stoma (100) próbkami sygnału wyjściowego. W przeprowadzonych doświadczeniach losowe zakłócenia (+/- 3% stanu ustalonego) były dodawane do idealnego sygnału. W przypadku sygnału zaszumionego aproksymacja większą ilością punktów daje lepsze wyniki, ponieważ eliminuje wpływ zakłóceń.



Rysunek 8.2. Metoda stycznej - obiekt z zakłóceniem.

Tabela 8-3 Metoda stycznej - zależność od liczby punktów branych do aproksymacji stycznej.

Lp.	Aproksymacja na podstawie 2 punktów			Aproksymacja na podstawie 4 punktów		
	Opóźnienie	Stała czasowa	Wzmocnienie	Opóźnienie	Stała czasowa	Wzmocnienie
1	15.50	110.14	2.1	10.58	135.07	2.1
2	15.72	96.56	2.1	13.57	130.07	2.1
3	13.54	90.07	2.1	10.20	140.02	2.1
4	19.56	108.15	2.1	10.66	129.09	2.1
5	13.45	105.40	2.1	9.52	147.64	2.1
6	16.02	107.39	2.1	13.82	126.32	2.1
7	25.50	107.64	2.1	12.60	132.74	2.1
8	13.20	83.70	2.1	12.68	131.03	2.1
9	14.21	101.18	2.1	13.98	122.36	2.1
10	11.49	114.69	2.1	13.31	122.52	2.1
średnia	15.82	102.49	2.1	12.09	131.69	2.1

Zwiększanie liczby zbieranych próbek powoduje większy wpływ szumu na wyniki, uzyskujemy mniej dokładne wyniki. W szczególności widać, że przeszacowywane jest opóźnienie obiektu i niedoszacowana stała czasowa inercji.

Tabela 8-4 Metoda stycznej - zależność od liczby zebranych próbek (aproksymacja 4 pkt).

Lp.	200 próbek			300 próbek		
	Opóźnienie	Stała czasowa	Wzmocnienie	Opóźnienie	Stała czasowa	Wzmocnienie
1	13.73	111.11	2.1	16.31	96.95	2.1
2	13.81	98.30	2.1	18.74	96.51	2.1
3	13.46	120.96	2.1	15.69	107.69	2.1
4	15.91	120.97	2.1	12.10	109.3	2.1
5	13.78	102.91	2.1	14.58	104.23	2.1
6	18.68	109.49	2.1	14.44	98.49	2.1
7	14.89	120.03	2.1	15.75	108.67	2.1
8	14.37	120.94	2.1	13.92	101.57	2.1
9	15.64	99.96	2.1	14.31	99.28	2.1
10	13.45	117.55	2.1	14.48	114.16	2.1
średnia	14.77	112.22	2.1	15.03	103.69	2.1

8.2 Metoda Cohena-Coona.

W metodzie Cohena-Coona pierwszym krokiem jest znalezienie wartości sygnału wyjściowego w stanie ustalonym. Nieodpowiedni dobór parametrów procedury samostrojzenia (patrz rozdział 5) takich jak „czas stabilizacji procesu, „dopuszczalne zmiany wartości mierzonej PV, jakie mogą nastąpić w czasie stabilizacji” oraz „skok sterowania CV na początku eksperymentu”, może skutkować tym, że procedura zostanie przerwana przed osiągnięciem w miarę dokładnego stanu ustalonego przez obiekt.

Badanie metody Cohena-Coona oprę więc na sprawdzeniu wpływu dokładności uzyskanego stanu ustalonego na parametry obiektu. W tym doświadczeniu rozpatrywany jest przypadek, gdy mamy do dyspozycji bardzo dużą liczbę zebranych próbek, tak więc nie dokonujemy żadnej aproksymacji w celu wyznaczenia punktów t_2 i t_3 (patrz 5.2 Metoda Cohena-Coona.).

W poniższym przykładzie będzie rozpatrywany obiekt o zastępczej stałej czasowej równej 120, wzmocnieniu równym 2.1 oraz opóźnieniu wynoszącym 12 sekund. Obiekt taki ma transmitancję wyrażoną następującym wzorem:

$$G(s) = \frac{2.1}{120s + 1} e^{-12s}$$

Na podstawie odpowiedzi skokowej uzyskanej w Matlabie dla obiektu o tej transmitancji możemy wyznaczyć wartość sygnału wyjściowego w stanie ustalonym, wartość ta jest równa $Y=2.0995$.

Tabela 8-5. Wpływ osiągniętego stanu ustalonego na dokładność parametrów obiektu.

Wartość Y przyjęta jako stan ustalony	Stała czasowa obiektu	Opóźnienie obiektu	Wzmocnienie obiektu
$Y_1 = Y$	119.60	12.10	2.1
$Y_1 = 0.99Y$	116.67	12.93	2.08
$Y_1 = 0.98Y$	113.74	13.86	2.05
$Y_1 = 0.97Y$	111.45	14.25	2.03
$Y_1 = 0.96Y$	108.85	14.85	2.01
$Y_1 = 0.95Y$	106.24	15.56	1.99
$Y_1 = 0.94Y$	103.63	16.27	1.97
$Y_1 = 0.93Y$	101.68	16.42	1.95
$Y_1 = 0.92Y$	99.40	16.90	1.93
$Y_1 = 0.91Y$	97.11	17.39	1.91
$Y_1 = 0.9Y$	94.83	17.87	1.89

Z przeprowadzonego doświadczenia widać, że dokładność uzyskanego stanu ustalonego ma znaczący wpływ na parametry obiektu. Im dalej od dokładnego stanu ustalonego zakończy się eksperyment tym gorsze uzyskamy wyniki, szczególnie odbija się to na opóźnieniu obiektu i zastępczej stałej czasowej.

8.3 Analiza wyników i wnioski.

Podczas przeprowadzania eksperymentu samostrojzenia metodą Cohena-Coona ważny jest taki dobór parametrów procedury aby zapewnić jak najdokładniejsze uzyskanie stanu ustalonego. Dokładniej rzecz biorąc, trzeba dobierać długi czas stabilizacji procesu oraz małe dopuszczalne zmiany wartości mierzonej, jakie mogą nastąpić w czasie stabilizacji.

Na podstawie przeprowadzonych badań zamkniętego układu regulacji możemy stwierdzić, że najlepiej zachowywał się on dla własnoręcznie wyznaczonego modelu obiektu (metodą stycznej). Model ten został wyznaczony na podstawie dużej liczby próbek (około 300) przebiegu czasowego wartości wyjściowej. Przeprowadzona w tym rozdziale analiza metody identyfikacji styczną również potwierdza słuszność używania większej liczby próbek sygnału wyjściowego do wyznaczania parametrów obiektu.

Oczywiście duża liczba zbieranych próbek w przypadku krótko trwającego eksperymentu będzie miała negatywny wpływ na wyniki identyfikacji obiektu. Wydaje

mi się, że warto jednak rozważyć możliwość zbierania większej liczby próbek przez regulator LB-600 i ewentualne, późniejsze redukowanie ich w przypadku krótko trwających eksperymentów. Można także wprowadzić jakiś minimalny odstęp między próbkami (np. 0.5 sekundy), co powinno zredukować wpływ zakłóceń.

9. Dobór parametrów dla procedury samostrojzenia.

W tym rozdziale chciałbym przedstawić kilka wskazówek odnośnie dobierania parametrów procedur samostrojzenia zaimplementowanych w regulatorze LB-600. Podczas dobierania parametrów procedury samostrojzenia bardzo istotna jest wiedza jaką posiadamy o naszym obiekcie i układzie regulacji.

1. Wprowadzenie minimalnej (parametr 7x46) i maksymalnej (parametr 7x47) bezpiecznej dla procesu wartości sygnału wyjściowego.

Parametry te mówią nam jakie wartości sygnału wyjściowego mogą wystąpić w obiekcie podczas trwania procedury samostrojzenia, aby nie uległ on awarii lub zniszczeniu. Przekroczenie tych wartości przez sygnał wyjściowy w trakcie trwania procedury samostrojzenia powoduje natychmiastowe jej przerwanie, co zapobiega zniszczeniu obiektu. Odpowiedni dobór tych parametrów zależy oczywiście od znajomości obiektu regulacji.

2. Wyznaczenie punktu pracy i skoku sterowania.

Pierwszym etapem w doborze parametrów procedury samostrojzenia powinno być wyznaczenie charakterystyki statycznej obiektu. Ponieważ wynikiem działania procedury samostrojzenia są nastawy dla liniowego regulatora PID ważne jest, aby eksperyment samostrojzenia odbył się w przedziale, gdzie charakterystyka statyczna obiektu jest liniowa, lub gdzie jej linearyzacja wprowadzi jak najmniejsze błędy.

Punkt pracy należy wybrać w sposób, który pozwoli nam na wykonanie możliwie dużego skoku sterowania na początku eksperymentu samostrojzenia i jednocześnie pozostanie w tym samym liniowym przedziale pracy obiektu.

Oczywiście w praktyce możemy się spotkać z obiektami nieliniowymi. W takim przypadku eksperyment powinien odbyć się w punkcie pracy i przedziale, w którym linearyzacja wprowadzi stosunkowo małe błędy. W przypadku wyznaczenia więcej niż jednego punktu pracy należy dla każdego z nich przeprowadzić eksperyment samostrojzenia, a następnie zastosować odpowiedni rodzaj i strukturę układu regulacji np. regulację tablicową umożliwiającą zmiany nastaw regulatora PID w zależności od punktu pracy.

Kolejnym krokiem jest wybranie odpowiedniej wartości skoku sterowania na początku eksperymentu samostrojzenia (parametr 7x51). Większa wartość skoku

sterowania sprawia, że wpływ zakłóceń na sygnał wyjściowy maleje. Pozwala to na uzyskanie dokładniejszych i bardziej powtarzalnych wyników.

3. Wybór metody identyfikacji (parametr 7x48).

Ponieważ metoda identyfikacji wg Cohena-Coona przeszacowuje mocno opóźnienie obiektu to na początku warto wybrać identyfikację metodą stycznej.

4. Wybór czasu stabilizacji procesu (parametr 7x49) i dopuszczalnych zmian wartości mierzonej (parametr 7x50).

Parametry te decydują o momencie zakończenia eksperymentu samostrojzenia. W przypadku, gdy przez czas określony parametrem 7x49 wartość sygnału wyjściowego zmieni się o wartość mniejszą niż ta określona przez parametr 7x50, to eksperyment samostrojzenia jest kończony.

Ekspertyment powinien trwać na tyle długo, aby pozwolić obiektowi na osiągnięcie możliwie dokładnego stanu ustalonego. Regulator LB-600 zbiera od 50 do 100 równoodległych w czasie próbek z przebiegu czasowego wartości wyjściowej. Zbytne przedłużanie trwania eksperymentu samostrojzenia powoduje zatem utratę istotnych informacji o przebiegu czasowym wartości wyjściowej zaraz po skoku sterowania. Dopierając te parametry należy także uwzględnić szybkość narastania wartości sygnału wyjściowego.

W tabeli 13-5 (metoda Cohena-Coona) i 13-6 (metoda stycznej) przedstawiono wpływ zwiększania czasu stabilizacji procesu (parametr 7x49) na otrzymywane parametry obiektu. W obu przypadkach można powiedzieć, że zwiększanie wartości omawianego parametru powoduje zwiększenie uzyskiwanych wartości stałej czasowej inercji, zwiększenie uzyskiwanych wartości wzmocnienia oraz zmniejszenie uzyskiwanych wartości opóźnienia. Dodatkowo, w przypadku metody Cohena-Coona, podczas zwiększania wartości czasu stabilizacji uzyskujemy czasem mało wiarygodne wyniki – różniące się znacząco od wyników uzyskanych dla zbliżonych wartości czasu stabilizacji. Wyjaśnienia takiego zachowania metody Cohena-Coona nie jest możliwe, ponieważ w regulatorze LB-600 nie ma dostępu do tablicy zebranych próbek w procesie identyfikacji, a tylko ich analiza pozwoliłaby na wyjaśnienie tego zjawiska. Najprawdopodobniej takie zachowanie metody Cohena-Coona jest spowodowane zbyt małą ilością próbek zebranych w procesie identyfikacji, co wpływa na dokładność oszacowania punktów, w których proces osiąga odpowiednio 50% i 63.2% wartości stanu ustalonego.

5. Uruchomienie procedury samostrojzenia.

Jednokrotne uruchomienie procedury samostrojzenia nie da nam odpowiedzi na pytanie czy dobrane przez nas parametry tejże procedury są prawidłowe. Szczególnie mam tu na myśli odpowiedni dobór czasu stabilizacji procesu i dopuszczalnych zmian wartości mierzonej.

Zalecane jest wielokrotne przeprowadzenie procedury samostrojzenia dla tych samych parametrów i punktu pracy w celu sprawdzenia powtarzalności uzyskiwanych parametrów obiektu tj. zastępczej stałej czasowej inercji, opóźnienia i wzmocnienia. Z kilku pomiarów możemy obliczyć średnią arytmetyczną i na jej podstawie oraz na podstawie uzyskanych kolejnych wyników obliczyć maksymalny błąd względny. W przypadku uzyskania błędu względnego $\leq 10\%$ możemy uznać, że procedura samostrojzenia jest powtarzalna. W innym przypadku należy zmodyfikować parametry procedury samostrojzenia np. wydłużyć czas stabilizacji procesu lub zmniejszyć dopuszczalne zmiany wartości mierzonej.

6. Weryfikacja modelu obiektu.

W przypadku, gdy udało nam się już uzyskać powtarzalne wyniki należy sprawdzić, czy nasz obiekt pasuje do używanych metod samostrojzenia tj. czy stosunek opóźnienia do zastępczej stałej czasowej inercji mieści się w przedziale $\langle 0.1; 0.6 \rangle$. Jeśli nie, to należy zachować ostrożność w stosowaniu uzyskiwanych nastaw dla regulatora PID oraz liczyć się z tym, że układ regulacji może działać niepoprawnie.

7. Weryfikacja działania zamkniętego układu regulacji.

Następnym krokiem jest sprawdzenie jak zachowuje się zamknięty układ regulacji dla nastaw wyznaczonych w procedurze samostrojzenia. Stosowanie nastaw uzyskanych z procedur samostrojzenia powinno zapewnić nam stabilność zamkniętego układu regulacji. Należy jednak pamiętać, że wyznaczone nastawy są tylko pewną propozycją i najprawdopodobniej będzie trzeba je zmodyfikować w celu poprawienia działania układu regulacji.

8. Zmiana metody identyfikacji.

Jeżeli nasz obiekt posiada duże opóźnienie i jakość działania zamkniętego układu regulacji nie spełnia naszych oczekiwań warto przeprowadzić procedurę samostrojzenia przy użyciu drugiej dostępnej metody identyfikacji tj. metody Cohena-Coona. Należy pamiętać, że w tym przypadku może być konieczna zmiana używanego wskaźnika jakości, ponieważ sposób konfiguracji metod samostrojzenia

9. Dobór parametrów dla procedury samostrojzenia.

w regulatorze LB-600 nie pozwala na pewne kombinacje (połączenia) metod identyfikacji i wskaźników jakości. W związku z tym wyniki nie są w pełni porównywalne. Pozostałe parametry procedury samostrojzenia mogą na początek zostać bez zmian.

10. Uwagi do instrukcji.

Podczas konfigurowania procedury samostrojzenia możemy wybrać wskaźnik jakości ITAE i w instrukcji jest napisane, że jest to ITAE SP (nadażanie za wartością zadaną). Nastawy są jednak wyznaczane według wzorów ITAE LOAD (redukcja zakłóceń wyjściowych).

W tabeli ze wzorami do wyznaczania nastaw dla regulatora PID dla wskaźnika jakości 2..5% przeregulowania, w przypadku regulatora P wzmocnienie statyczne powinno wyrażać się wzorem $k_p = 0.3 \frac{\tau}{K * \tau_D}$.

Regulator LB-600 źle oblicza nastawy dla regulatora PI dla wskaźnika jakości według Zieglera-Nicholsa. Badania pokazały, że wzmocnienie regulatora nie jest wyznaczane zgodnie ze wzorem zawartym w dokumentacji: $k_p = 0.9 \frac{\tau}{K * \tau_D}$.

W trakcie konfigurowania procedury samostrojzenia należy podać wartość dla „Numer RSB – START”. Według instrukcji dopuszczalne wartości to 0012 ... 0525 tymczasem RSB od 0012 do 0465 zarezerwowane są na różnego rodzaju alarmy itp.

11. Podsumowanie wyników pracy i wnioski.

Dostępne w regulatorze LB-600 metody samostrojzenia przeznaczone są dla obiektów statycznych, których stosunek opóźnienia do zastępczej stałej czasowej inercji zawiera się w przedziale $\langle 0.1; 0.6 \rangle$. W celu dokładnego przebadania i weryfikacji algorytmów samostrojzenia należałoby zatem sprawdzić jak działają one dla obiektów o różnych parametrach.

Na potrzeby mojej pracy dyplomowej dysponowałem tylko jednym obiektem, którego parametry w każdej rozważanej konfiguracji nie spełniały warunków wymaganych do stosowania dostępnych metod samostrojzenia, w związku z tym należy się liczyć ze zwiększonymi błędami, co z kolei ma wpływ na ostrość formułowania wniosków. Uwzględniając powyższe fakty trudno jest mi zatem jednoznacznie ocenić poprawność działania dostępnych w regulatorze LB-600 metod samostrojzenia na podstawie przeprowadzonych badań.

Dobór odpowiednich parametrów procedury samostrojzenia przekłada się na dokładność uzyskiwanego modelu obiektu. Dłużej trwające eksperymenty (osiągany jest dokładniejszy stan ustalony) dają lepsze oszacowanie wzmocnienia obiektu. Ze względu na ograniczoną liczbę zbieranych próbek sygnału wyjściowego tracona jest jednak duża ilość informacji o przebiegu przejściowym w początkowej fazie eksperymentu, co powoduje niedoszacowanie opóźnienia obiektu i przeszacowanie stałej czasowej inercji.

Wyznaczenie bardzo dokładnego modelu obiektu poprawiło, w porównaniu z modelem obiektu wyznaczonym przez LB-600, jakość działania zamkniętego układu regulacji. Jednak nawet bardzo dokładne parametry obiektu nie pociągnęły za sobą realizacji wszystkich rozpatrywanych wskaźników jakości przez zamknięty układ regulacji. W szczególności nie udało się uzyskać poprawnej realizacji wskaźnika jakości 20% przeregulowania dla żadnego z uzyskanych modeli obiektów. Może to wynikać z faktu, że stosowane metody identyfikacji i wskaźniki jakości nie były przeznaczone dla tego typu obiektu. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń można jednak stwierdzić, że dla badanego obiektu identyfikacja obiektu metodą stycznej przekładała się na lepsze działanie zamkniętego układu regulacji niż identyfikacja metodą Cohena-Coona.

Podsumowując wyniki mojej pracy poza paroma uwagami odnośnie błędów w instrukcji oraz błędów przy wyznaczaniu nastaw dla regulatora PI metodą stycznej, nie mam większych zastrzeżeń co do działania metod samostrojzenia w regulatorze LB-600.

W pracy zawarte zostały wskazówki odnośnie konfiguracji parametrów metod samostrojzenia. Mam nadzieję, że pozwolą one na lepsze zrozumienie znaczenia poszczególnych parametrów oraz pozwolą na bardziej efektywny ich dobór. Wszystko to powinno przełożyć się na uzyskiwanie dokładniejszych wyników i lepsze działanie zamkniętego układu regulacji.

Oczekiwane propozycje modyfikacji algorytmów samostrojzenia nie mogły być przedstawione ze względu na brak dostępu do algorytmów aktualnie działających. Ten brak nie pozwala dokonać oceny krytycznej (czy nie ma błędów), jak i przedstawienia własnej propozycji ich poprawy. Mogłem jedynie wskazać propozycje dotyczące sposobu używania dostępnych metod samostrojzenia.

Z punktu widzenia osoby badającej regulator LB-600 uważam, że w kolejnych wersjach tego regulatora warto rozważyć możliwość konfiguracji liczby zbieranych próbek w procesie identyfikacji. Dodatkowo pozwolenie na dostęp do tablicy, gdzie trzymane są zbierane próbki pozwoliłoby w przyszłości na dokładniejszą analizę i weryfikację działania metod samostrojzenia.

12. Bibliografia.

- [1] Brzózka Jerzy: „Regulatory i układy automatyki”, Wydawnictwo MIKOM, 2004.
- [2] „Poradnik inżyniera. Automatyka” pod red. W.Findeisena, WNT, Warszawa 1973.
- [3] Zygmunt Komor, Andrzej Łobzowski, Wojciech Szkolnikowski: „Technika regulacji. Regulator LB-600”, Agenda Wydawnicza PAK-u, Warszawa 2003

13. Załączniki.

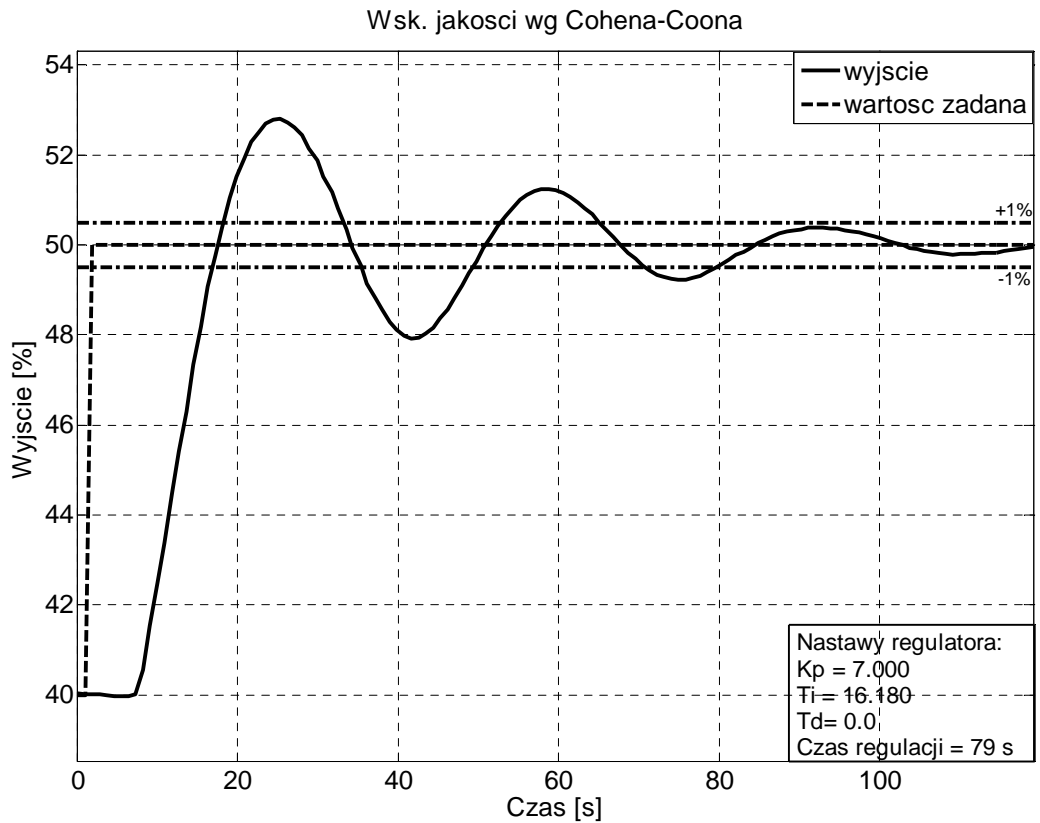
13.1 Układ regulacji.

Wszystkie metody samostrojzenia były przeprowadzane dla urządzenia w konfiguracji nr 1 (patrz Rozdział 3). Parametry konfiguracyjne poszczególnych metod samostrojzenia znajdują się w tabeli poniżej:

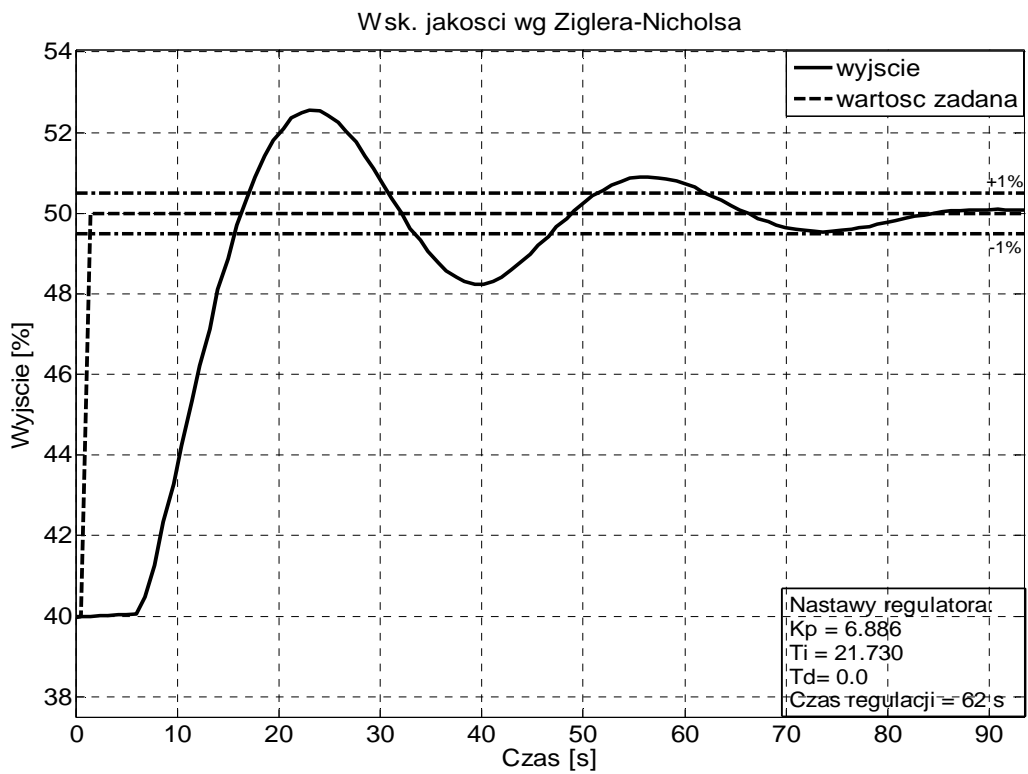
Nazwa podrozdziału	Metoda identyfikacji	Czas stabilizacji	Skok sterowania
Samostrojzenie_1	Styczna	20 sekund	+5%
Samostrojzenie_2	Cohena-Coona	40 sekund	+10%

Badanie zamkniętego układu regulacji polegało na zmianie wartości zadanej z **40%** na **50%** i rejestracji przebiegu czasowego wartości wyjściowej.

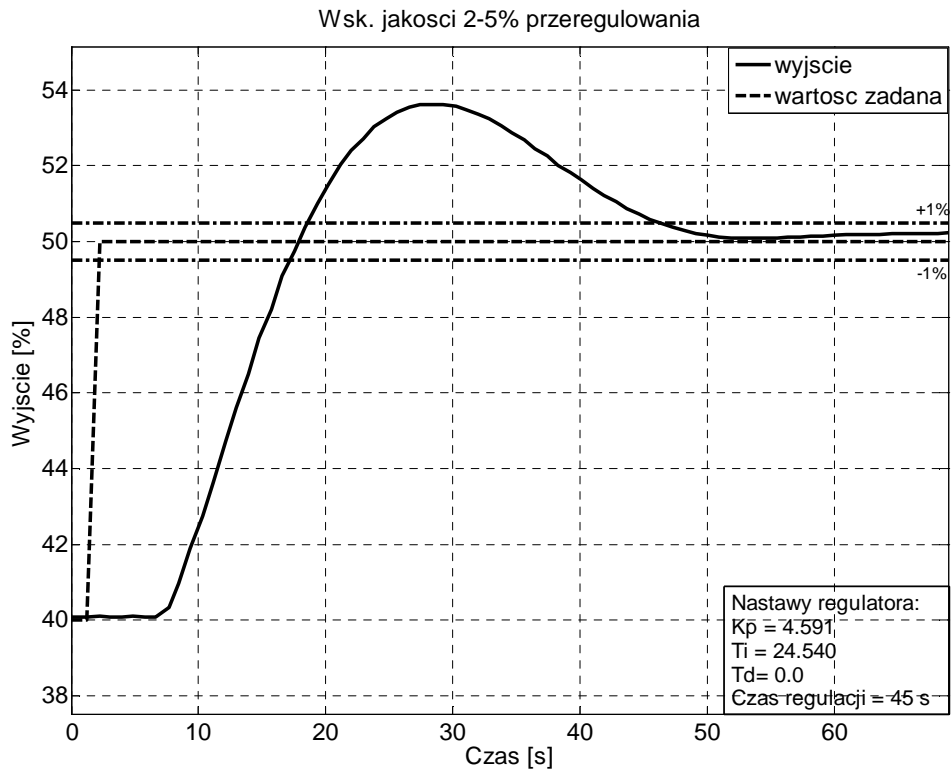
13.1.1 Wykresy dla „Samostrojenie_1”



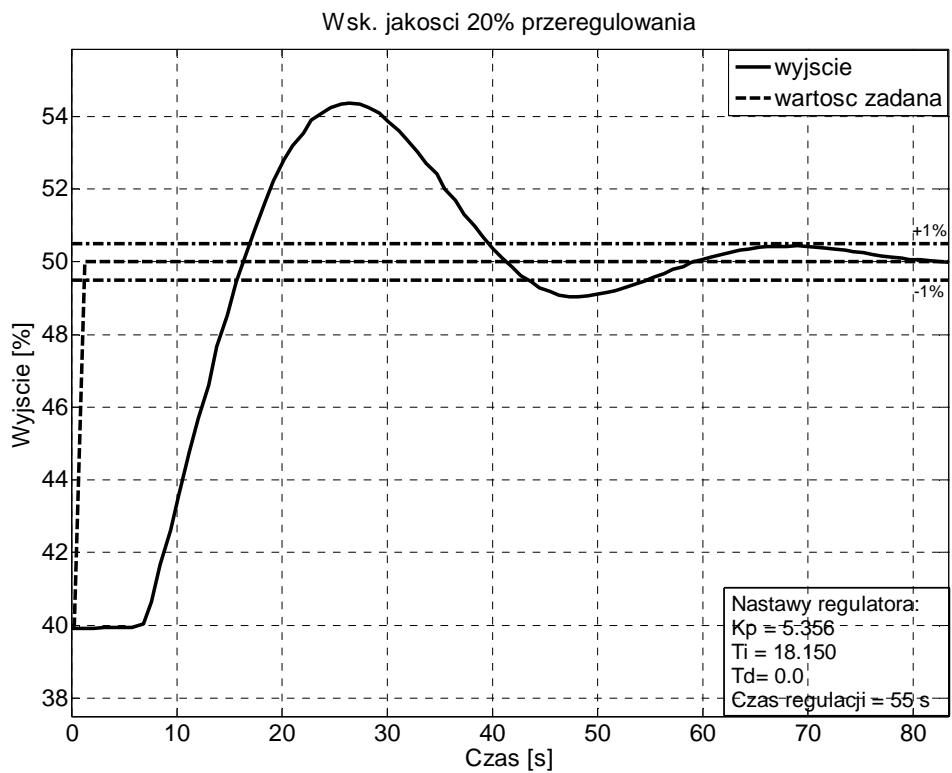
Rysunek 13.1 Metoda stycznej - wskaźnik jakości wg Cohena-Coona (S1)



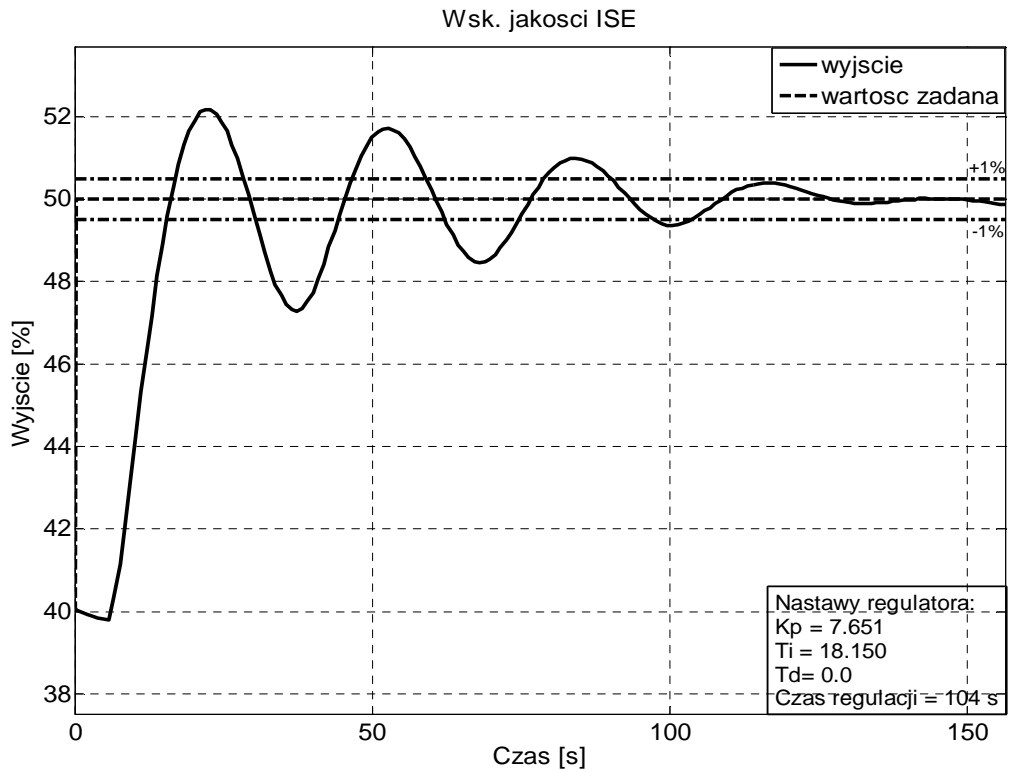
Rysunek 13.2 Metoda stycznej – wskaźnik jakości wg Zieglera-Nicholsa (S1).



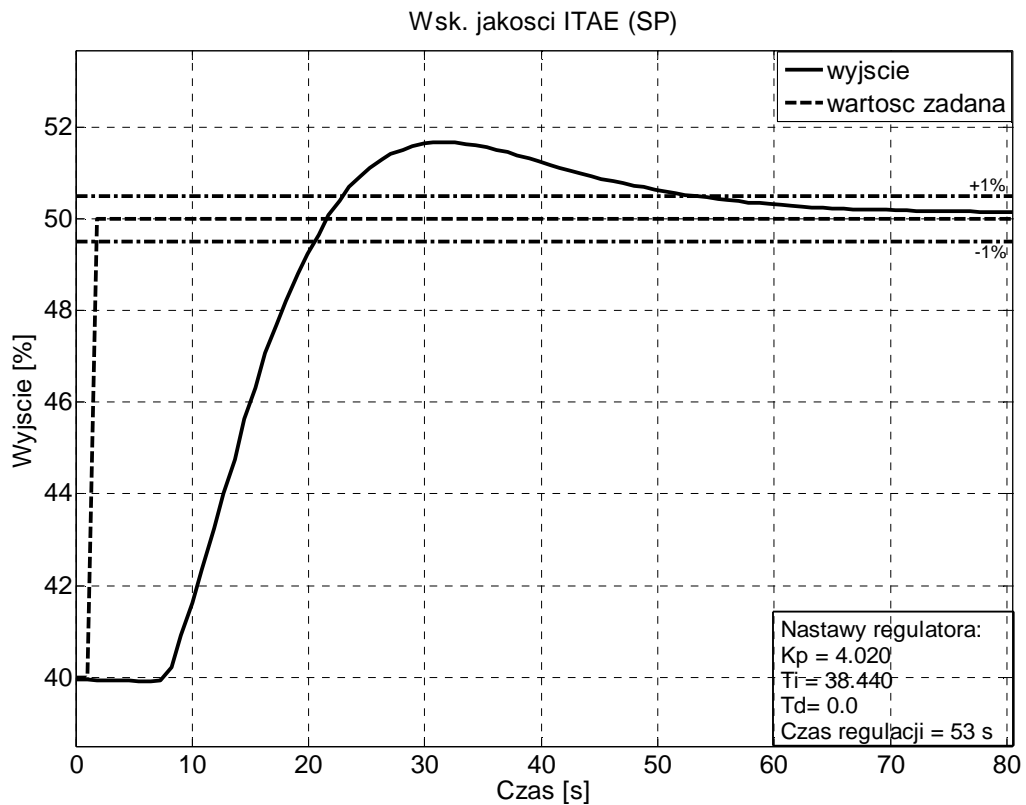
Rysunek 13.3 Metoda stycznej - 2...5% przeregulowania (S1).



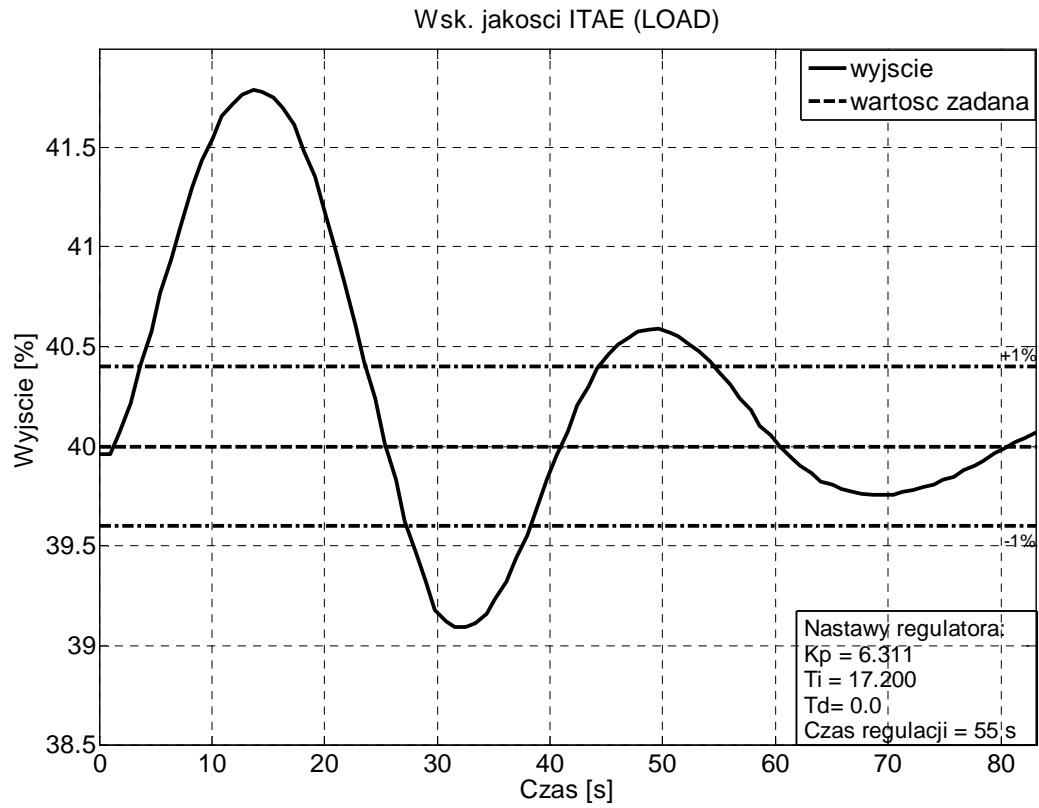
Rysunek 13.4 Metoda stycznej - 20% przeregulowania (S1).



Rysunek 13.5 Metoda stycznej - ISE (S1).

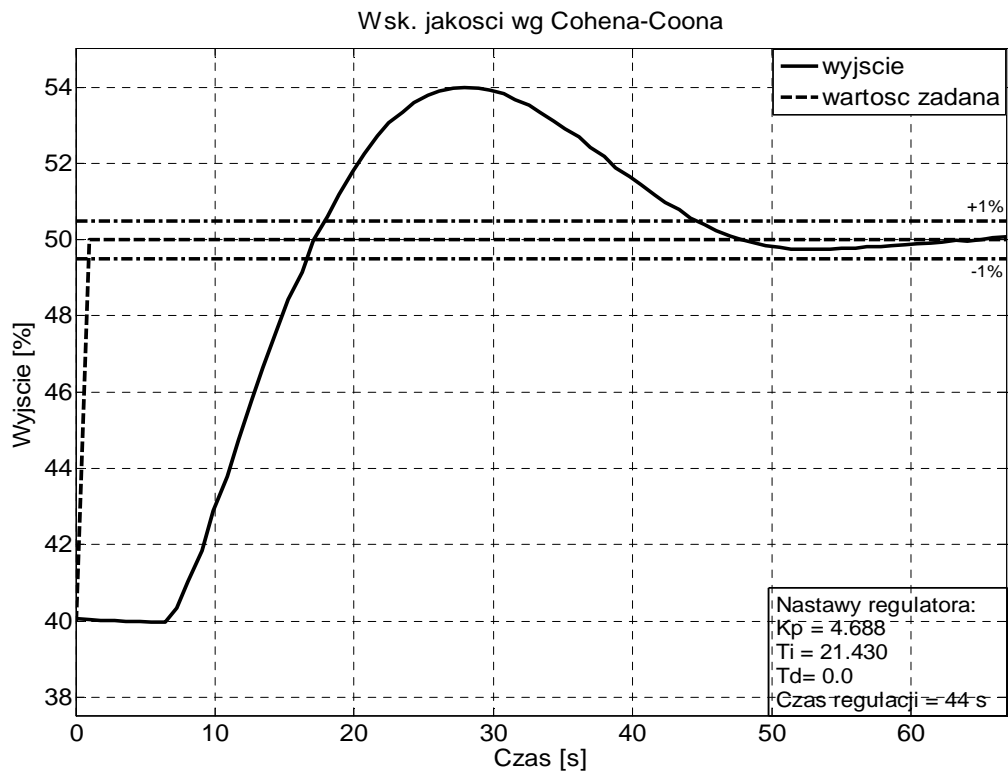


Rysunek 13.6 Metoda stycznej - ITAE SP (S1)

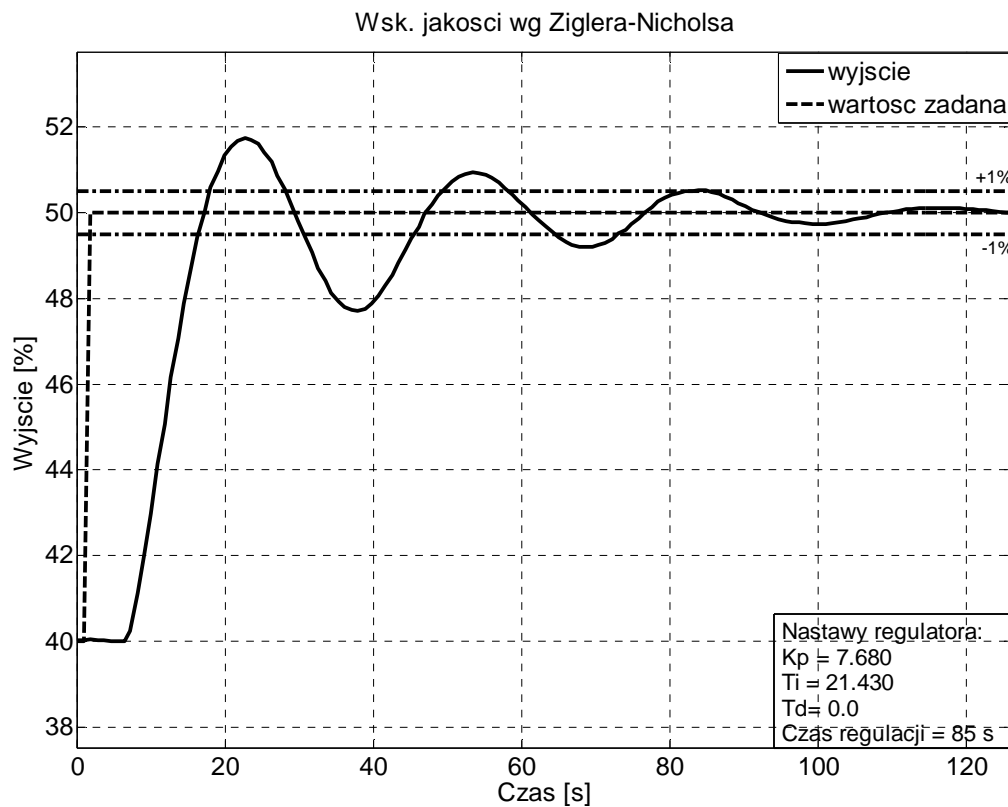


Rysunek 13.7 Metoda stycznej - ITAE LOAD (S1)

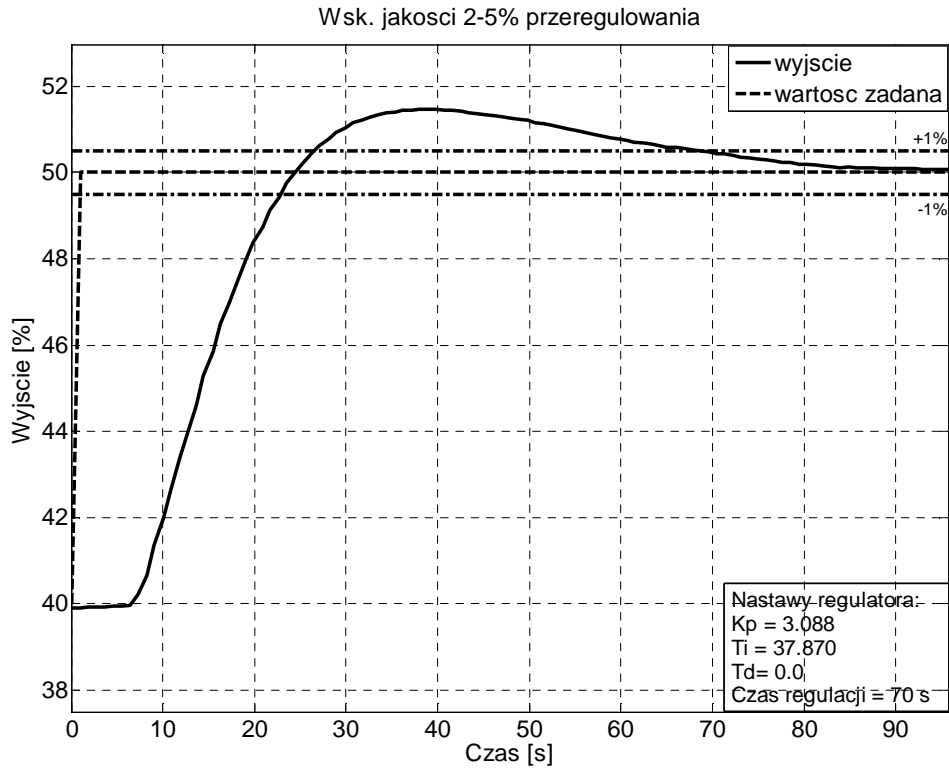
13.1.2 Wykresy do „Samostrojenie_2”.



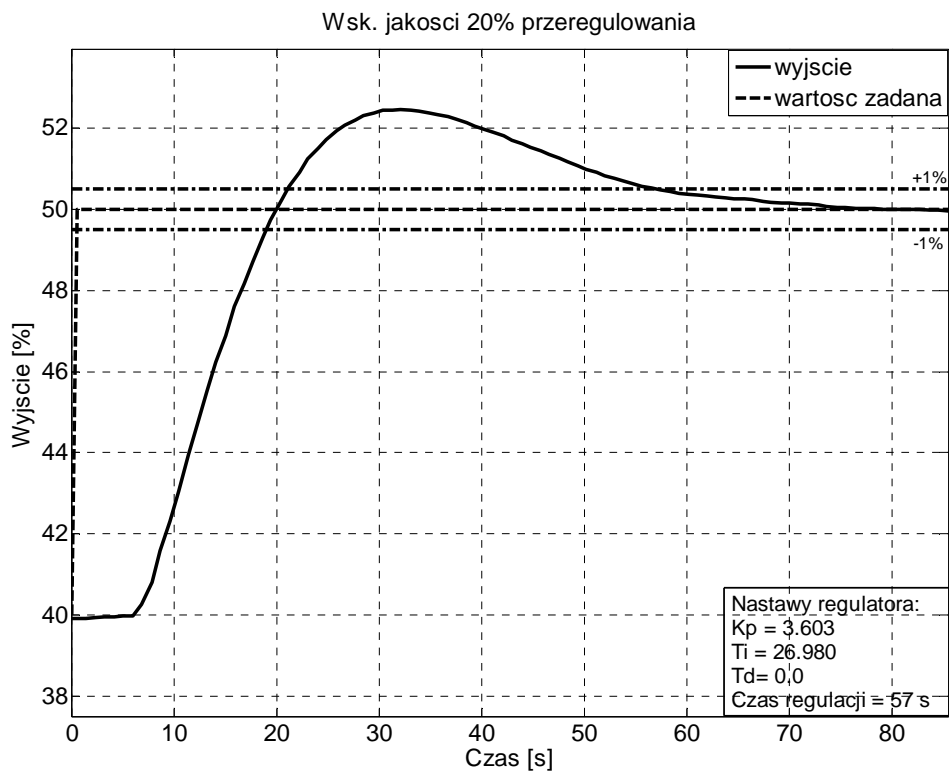
Rysunek 13.8 Metoda Cohena-Coona - wskaźnik jakości wg Cohena-Coona (S2).



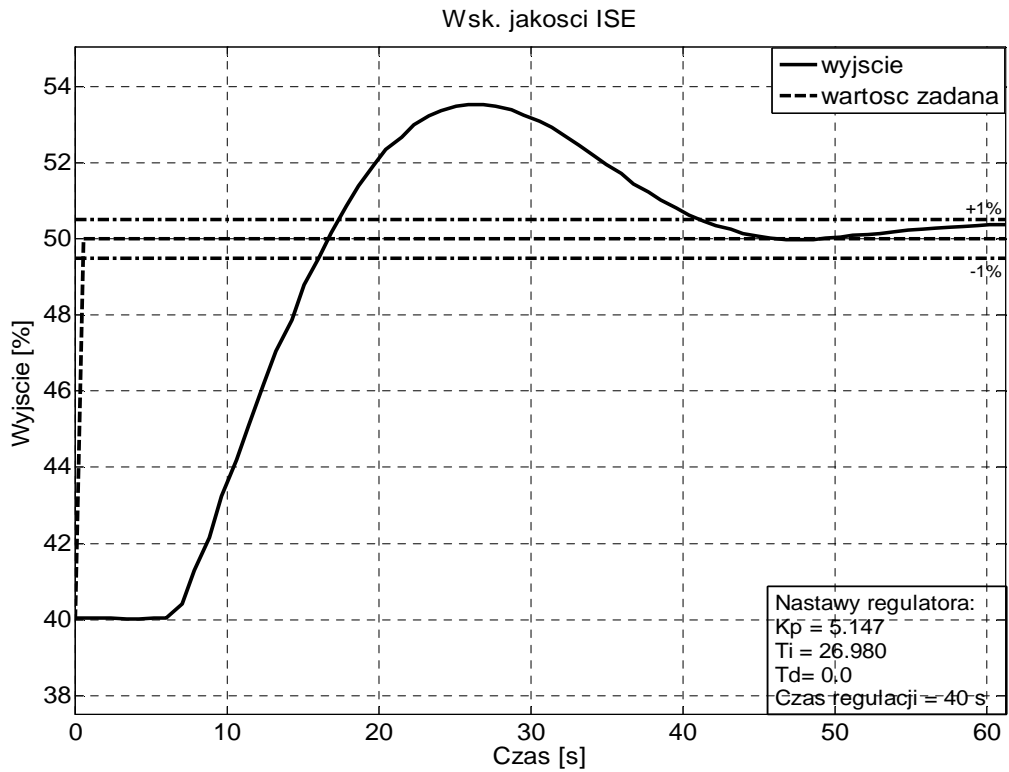
Rysunek 13.9 Metoda Cohena-Coona - wskaźnik jakości wg Zieglera-Nicholsa (S2)



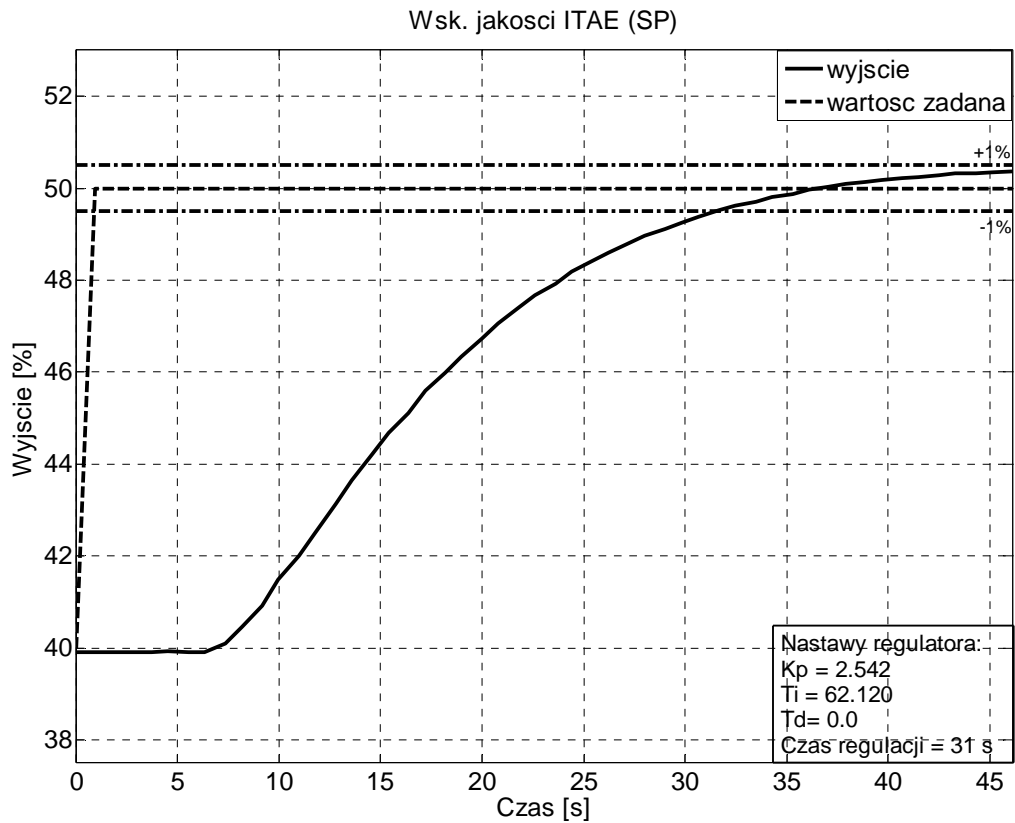
Rysunek 13.10 Metoda Cohena-Coona - 2...5% przeregulowania (S2).



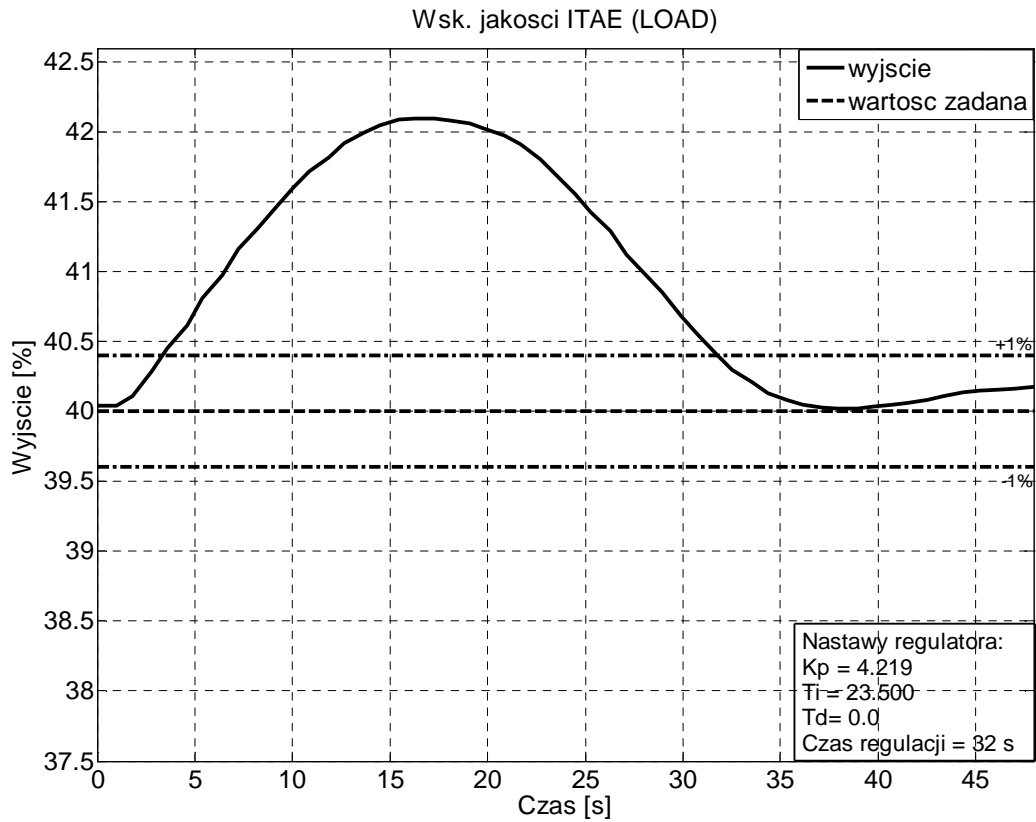
Rysunek 13.11 Metoda Cohena-Coona - 20% przeregulowania (S2).



Rysunek 13.12 Metoda Cohena-Coona - ISE (S2).



Rysunek 13.13 Metoda Cohena-Coona - ITAE SP (S2).



Rysunek 13.14 Metoda Cohena-Coona - ITAE LOAD (S2).

13.2 Samostrojzenie.

Tabela 13-1 Samostrojzenie - metoda Cohena-Coona - obiekt w konfiguracji nr 1 - Doświadczenie nr 4.

Czas stabilizacji				20 sek																		
Skok sterowania				5																		
Punt pracy				(40 ; 42)																		
Obiekt				z opóźnieniem																		
metoda identyfikacji				Cohena-Coona																		
P1	stała czasowa obiektu																					
P2	opóźnienie obiektu																					
P3	wzmocnienie obiektu																					
				wskaźnik jakości dla procesu samostrojzenia	Nastawy z procesu samostrojzenia			Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu														
								Cohena-Coona			2..5% przereg.			20% przereg.			ISE			ITAE		
Lp.	P1	P2	P3		P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D
1	23.12	13.150	0.555	Cohena-Coona	3.000	20.470	0	3.001	20.46	0	1.901	22.08	0	2.218	20.09	0	3.168	20.09	0	2.686	23.37	0
2	21.60	11.350	0.584	2..5 % przereg.	1.957	19.880	0	3.076	18.37	0	1.955	19.88	0	2.281	17.83	0	3.259	17.83	0	2.758	20.69	0
3	30.71	13.030	0.766	20 % przereg.	2.153	22.240	0	2.878	23.30	0	1.846	25.78	0	2.154	22.24	0	3.077	22.24	0	2.591	25.44	0
4	18.72	12.870	0.559	ISA	2.601	18.490	0	2.491	18.14	0	1.561	19.66	0	1.821	18.49	0	2.602	18.49	0	2.216	21.53	0
5	21.68	11.490	0.583	ITAE	2.743	20.890	0	3.056	18.52	0	1.942	20.03	0	2.266	17.99	0	3.236	17.99	0	2.740	20.89	0
wartość min	18.72	11.35	0.56		wartość min			2.49	18.14	0	1.56	19.66	0	1.82	17.83	0	2.60	17.83	0	2.22	20.69	0
wartość max	30.71	13.15	0.77		wartość max			3.08	23.30	0	1.96	25.78	0	2.28	22.24	0	3.26	22.24	0	2.76	25.44	0
średnia	23.17	12.38	0.61		średnia			2.90	19.76	0	1.84	21.49	0	2.15	19.33	0	3.07	19.33	0	2.60	22.38	0
uchyb +	7.54	0.77	0.16		uchyb +			0.18	3.54	0	0.11	4.29	0	0.13	2.92	0	0.19	2.92	0	0.16	3.05	0
uchyb -	4.45	1.03	0.05		uchyb -			0.41	1.62	0	0.28	1.83	0	0.33	1.50	0	0.47	1.50	0	0.38	1.69	0
uchyb + [%]	32.56	6.24	25.70		uchyb + [%]			6.04	17.94	0	6.20	19.98	0	6.20	15.08	0	6.20	15.08	0	6.15	13.64	0
uchyb - [%]	19.19	8.31	8.93		uchyb - [%]			14.11	8.20	0	15.20	8.51	0	15.20	7.75	0	15.20	7.75	0	14.71	7.56	0

Tabela 13-2 Samostrojzenie - metoda Cohena-Coona - obiekt w konfiguracji nr 1 - Doświadczenie nr 5.

Czas stabilizacji				40 sek																		
Skok sterowania				10																		
Punt pracy				(40 ; 42)																		
Obiekt				z opóźnieniem																		
metoda identyfikacji				Cohena-Coona																		
P1	stała czasowa obiektu																					
P2	opóźnienie obiektu																					
P3	wzmocnienie obiektu																					
				wskaźnik jakości dla procesu samostrojzenia	Nastawy z procesu			Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu														
					P			Cohena-Coona			2..5% przereg.			20% przereg.			ISE			ITAE		
Lp.	P1	P2	P3		P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D
1	61.71	8.404	1.483	Cohena-Coona	4.514	21.790	0	4.512	21.80	0	2.971	37.58	0	3.466	26.92	0	4.951	26.92	0	4.063	23.60	0
2	64.30	8.520	1.486	2..5 % przereg.	3.048	38.960	0	4.627	22.23	0	3.047	38.97	0	3.555	27.81	0	5.079	27.81	0	4.164	24.14	0
3	62.64	8.190	1.486	20 % przereg.	3.603	26.980	0	4.688	21.43	0	3.088	37.87	0	3.603	26.98	0	5.147	26.98	0	4.219	23.30	0
4	58.67	10.250	1.480	ISE	3.864	27.860	0	3.537	25.04	0	2.321	37.54	0	2.707	27.85	0	3.868	27.85	0	3.192	26.58	0
5	60.62	9.990	1.507	ITAE	3.318	26.390	0	3.679	24.78	0	2.416	38.30	0	2.819	28.18	0	4.027	28.18	0	3.318	26.39	0
wartość min	58.67	8.19	1.48		wartość min			3.54	21.43	0	2.32	37.54	0	2.71	26.92	0	3.87	26.92	0	3.19	23.30	0
wartość max	64.30	10.25	1.51		wartość max			4.69	25.04	0	3.09	38.97	0	3.60	28.18	0	5.15	28.18	0	4.22	26.58	0
średnia	61.59	9.07	1.49		średnia			4.21	23.06	0	2.77	38.05	0	3.23	27.55	0	4.61	27.55	0	3.79	24.80	0
uchyb +	2.71	1.18	0.02		uchyb +			0.48	1.99	0	0.32	0.92	0	0.37	0.63	0	0.53	0.63	0	0.43	1.78	0
uchyb -	2.92	0.88	0.01		uchyb -			0.67	1.62	0	0.45	0.52	0	0.52	0.63	0	0.75	0.63	0	0.60	1.50	0
uchyb + [%]	4.40	13.00	1.25		uchyb + [%]			11.39	8.62	0	11.55	2.41	0	11.55	2.28	0	11.55	2.28	0	11.29	7.16	0
uchyb - [%]	4.74	9.71	0.56		uchyb - [%]			15.96	7.05	0	16.18	1.36	0	16.18	2.29	0	16.18	2.29	0	15.82	6.05	0

Tabela 13-3 Samostrojzenie - metoda stycznej - obiekt w konfiguracji 1 - Doświadczenie nr 6.

Czas stabilizacji				40 sek																		
Skok sterowania				10																		
Punt pracy				(40 ; 42)																		
Obiekt				z opóźnieniem																		
metoda identyfikacji				Styczna																		
P1	stała czasowa obiektu																					
P2	opóźnienie obiektu																					
P3	wzmocnienie obiektu																					
				wskaźnik jakości dla procesu samostrojzenia	Nastawy z procesu			Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu														
								Z-N			2..5% przereg.			20% przereg.			ISE			ITAE		
Lp.	P1	P2	P3		P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D
1	74.03	5.265	1.480	Zieglera-Nicholsa	1.332	17.377	0	8.550	17.37	0	5.700	41.23	0	6.650	27.47	0	9.501	27.47	0	7.680	18.20	0
2	73.61	5.680	1.472	2..5 % przereg.	5.283	41.350	0	7.924	18.74	0	5.282	41.35	0	6.163	27.76	0	8.804	27.76	0	7.130	19.13	0
3	76.17	5.660	1.479	20 % przereg.	6.371	28.510	0	8.189	18.68	0	5.459	42.61	0	6.369	28.51	0	9.099	28.51	0	7.363	19.29	0
4	74.05	5.364	1.567	ISE	8.812	27.580	0	7.929	17.70	0	5.286	41.32	0	6.167	27.58	0	8.810	27.58	0	7.124	18.43	0
5	71.57	5.158	1.504	ITAE	7.462	17.750	0	8.303	17.02	0	5.535	39.91	0	6.458	26.63	0	9.226	26.63	0	7.460	17.76	0
wartość min	71.57	5.16	1.47		wartość min			7.92	17.02	0	5.28	39.91	0	6.16	26.63	0	8.80	26.63	0	7.12	17.76	0
wartość max	76.17	5.68	1.57		wartość max			8.55	18.74	0	5.70	42.61	0	6.65	28.51	0	9.50	28.51	0	7.68	19.29	0
średnia	73.89	5.43	1.50		średnia			8.18	17.90	0	5.45	41.28	0	6.36	27.59	0	9.09	27.59	0	7.35	18.56	0
uchyb +	2.28	0.25	0.07		uchyb +			0.37	0.84	0	0.25	1.33	0	0.29	0.92	0	0.41	0.92	0	0.33	0.73	0
uchyb -	2.32	0.27	0.03		uchyb -			0.26	0.88	0	0.17	1.37	0	0.20	0.96	0	0.28	0.96	0	0.23	0.81	0
uchyb + [%]	3.09	4.69	4.44		uchyb + [%]			4.54	4.69	0	4.54	3.22	0	4.54	3.33	0	4.54	3.33	0	4.47	3.94	0
uchyb - [%]	3.13	4.93	1.89		uchyb - [%]			3.12	4.93	0	3.12	3.32	0	3.12	3.49	0	3.12	3.49	0	3.09	4.35	0

Tabela 13-4 Samostrojanie - metoda stycznej - obiekt w konfiguracji nr 2.

Czas stabilizacji				20 sek																		
Skok sterowania				10																		
Punt pracy				(35 ; 50)																		
Obiekt				z opóźnieniem																		
metoda identyfikacji				Styczna																		
P1	stała czasowa obiektu																					
P2	opóźnienie obiektu																					
P3	wzmocnienie obiektu																					
				wskaźnik jakości dla procesu samostrojania	Nastawy z procesu			Nastawy obliczone na podstawie parametrów obiektu														
								Z-N			2..5% przereg.			20% przereg.			ISA			ITAE		
Lp.	P1	P2	P3		P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D
1	96.06	5.892	2.108	Zieglera-Nicholsa	1.897	19.440	0	6.961	19.44	0	4.640	52.74	0	5.414	34.71	0	7.734	34.71	0	6.230	21.36	0
2	96.26	6.075	2.204	2..5 % przereg.	4.314	52.990	0	6.470	20.05	0	4.314	52.99	0	5.033	34.95	0	7.189	34.95	0	5.795	21.82	0
3	92.43	5.506	2.114	20 % przereg.	5.558	33.230	0	7.147	18.17	0	4.765	50.62	0	5.559	33.24	0	7.941	33.24	0	6.393	20.15	0
4	100.60	5.753	2.206	ISA	7.931	35.950	0	7.134	18.98	0	4.756	54.90	0	5.549	35.93	0	7.927	35.93	0	6.375	21.33	0
5	99.91	6.174	2.076	ITAE	6.279	22.320	0	7.015	20.37	0	4.677	54.89	0	5.456	36.15	0	7.795	36.15	0	6.281	22.33	0
wartość min	92.43	5.51	2.08		wartość min			6.47	18.17	0	4.31	50.62	0	5.03	33.24	0	7.19	33.24	0	5.80	20.15	0
wartość max	100.60	6.17	2.21		wartość max			7.15	20.37	0	4.76	54.90	0	5.56	36.15	0	7.94	36.15	0	6.39	22.33	0
średnia	97.05	5.88	2.14		średnia			6.95	19.40	0	4.63	53.23	0	5.40	35.00	0	7.72	35.00	0	6.21	21.39	0
uchyb +	3.55	0.29	0.06		uchyb +			0.20	0.97	0	0.13	1.67	0	0.16	1.15	0	0.22	1.15	0	0.18	0.93	0
uchyb -	4.62	0.37	0.07		uchyb -			0.48	1.23	0	0.32	2.61	0	0.37	1.76	0	0.53	1.76	0	0.42	1.25	0
uchyb + [%]	3.66	5.00	3.01		uchyb + [%]			2.90	5.00	0	2.90	3.14	0	2.90	3.29	0	2.90	3.29	0	2.86	4.35	0
uchyb - [%]	4.76	6.36	3.06		uchyb - [%]			6.84	6.36	0	6.84	4.90	0	6.84	5.03	0	6.84	5.03	0	6.75	5.84	0

Poniższa tabela przedstawia wyniki uzyskane z przeprowadzenia procedury samostrojzenia dla różnych wartości czasu stabilizacji procesu w procedurach samostrojzenia (parametr 7x49). Opis parametrów procedury samostrojzenia:

- Obiekt w konfiguracji nr 1.
- Metoda identyfikacji – wg Cohena-Coona.
- Wskaźnik jakości – wg Cohena-Coona.
- Skok sterowania na początku eksperymentu = +10%.
- Początkowy punkt pracy = (40;42).

Tabela 13-5

Czas stabilizacji	Metoda Cohena-Coona					
	Parametry modelu obiektu			Nastawy z procesu (CC)		
	Stała czasowa	Opóźnienie	Wzmocnienie	P	I	D
5 s	6.024	8.338	0.293	2.506	7.763	0
10 s	28.790	11.010	0.979	2.489	20.600	0
15 s	39.540	11.370	1.196	2.687	23.780	0
20 s	49.980	10.820	1.305	3.250	24.880	0
25 s	49.620	12.150	1.380	2.723	26.870	0
30 s	63.130	7.565	1.490	5.096	20.150	0
35 s	63.970	7.591	1.497	5.122	20.260	0
40 s	69.090	8.481	1.677	4.421	22.480	0
45 s	61.940	7.528	1.491	5.022	19.990	0
50 s	63.630	8.498	1.581	4.314	22.130	0
60 s	70.160	7.323	1.594	5.460	20.020	0
70 s	62.830	11.510	1.643	3.041	27.770	0
80 s	76.400	6.077	1.645	6.928	17.350	0
90 s	64.690	6.557	1.654	5.419	18.010	0
100 s	80.050	2.247	1.674	19.200	7.069	0
120 s	78.220	6.595	1.661	6.475	18.670	0
140 s	73.900	4.228	1.757	8.877	12.730	0
160 s	84.560	0.512	1.728	86.030	1.695	0
180 s	72.160	7.361	1.744	5.108	20.200	0
200 s	72.610	7.645	1.687	5.117	20.86	0

Poniższa tabela przedstawia wyniki uzyskane z przeprowadzenia procedury samostrojzenia dla różnych wartości czasu stabilizacji procesu w procedurach samostrojzenia (parametr 7x49). Opis parametrów procedury samostrojzenia:

- Obiekt w konfiguracji nr 1.
- Metoda identyfikacji – metoda stycznej.
- Wskaźnik jakości – wg Zieglera-Nicholsa.
- Skok sterowania na początku eksperymentu = +10%.
- Początkowy punkt pracy = (40;42).

Tabela 13-6

Czas stabilizacji	Metoda stycznej					
	Parametry modelu obiektu			Nastawy z procesu (ZN)		
	Stała czasowa	Opóźnienie	Wzmocnienie	P	I	D
5 s	11.33	6.911	0.288	0.259	22.80	0
10 s	39.10	6.071	0.901	0.811	20.03	0
15 s	60.42	6.040	1.294	1.164	19.93	0
20 s	65.91	5.883	1.394	1.263	19.51	0
25 s	68.88	5.364	1.490	1.341	17.70	0
30 s	66.88	5.450	1.403	1.263	17.98	0
35 s	68.99	5.394	1.401	1.261	17.80	0
40 s	73.54	5.696	1.489	1.340	18.79	0
45 s	77.08	5.719	1.497	1.348	18.87	0
50 s	76.72	5.690	1.486	1.337	18.77	0
60 s	84.40	4.500	1.655	1.490	14.85	0
70 s	81.81	4.826	1.567	1.410	15.92	0
80 s	74.32	4.958	1.586	1.427	16.36	0
90 s	83.95	5.763	1.606	1.446	15.71	0
100 s	81.34	4.987	1.640	1.476	16.45	0
120 s	83.03	4.812	1.658	1.492	15.88	0
140 s	85.75	4.426	1.695	1.526	14.60	0
160 s	89.17	4.621	1.760	1.584	15.25	0
180 s	85.74	4.738	1.677	1.509	15.03	0
200 s	85.54	4.669	1.749	1.574	15.40	0

Tabela 14-9 zawiera nastawy uzyskane bezpośrednio z procedury samostrojzenia. Ponieważ regulator LB-600 błędnie oblicza wzmocnienie statyczne regulatora dla wybranej metody identyfikacji (metoda stycznej) i wskaźnika jakości (wg Zieglera-Nicholsa), to kolejna tabela 14-10 zawiera poprawione (obliczone na podstawie uzyskanych parametrów obiektu) nastawy dla regulatora PID.

13. Załączniki.

Tabela 13-7

Czas stabilizacji	Metoda stycznej					
	Parametry modelu obiektu			Nastawy obliczone (ZN)		
	Stała czasowa	Opóźnienie	Wzmocnienie	P	I	D
5 s	11.33	6.911	0.288	5.123	22.80	0
10 s	39.10	6.071	0.901	6.433	20.03	0
15 s	60.42	6.040	1.294	6.957	19.93	0
20 s	65.91	5.883	1.394	7.233	19.51	0
25 s	68.88	5.364	1.490	7.756	17.70	0
30 s	66.88	5.450	1.403	7.872	17.98	0
35 s	68.99	5.394	1.401	8.216	17.80	0
40 s	73.54	5.696	1.489	7.804	18.79	0
45 s	77.08	5.719	1.497	8.103	18.87	0
50 s	76.72	5.690	1.486	8.166	18.77	0
60 s	84.40	4.500	1.655	10.199	14.85	0
70 s	81.81	4.826	1.567	9.736	15.92	0
80 s	74.32	4.958	1.586	8.506	16.36	0
90 s	83.95	5.763	1.606	8.163	15.71	0
100 s	81.34	4.987	1.640	8.951	16.45	0
120 s	83.03	4.812	1.658	9.366	15.88	0
140 s	85.75	4.426	1.695	10.287	14.60	0
160 s	89.17	4.621	1.760	9.868	15.25	0
180 s	85.74	4.738	1.677	9.712	15.03	0
200 s	85.54	4.669	1.749	9.428	15.40	0