

UNIwersYTET MORSKI**Gdynia dnia 2024-03-01****Katedra Podstaw Techniki****Laboratorium Automatyki – dynamika**

Instrukcja ćwiczenia 8.1

Ćwiczenie nr	8.1
Temat:	Badanie układu regulacji Regulator cyfrowy PID
Stanowisko laboratoryjne	Modułowy układ pompowy
Opracował:	A. Mielewczyk

UNIWERSYTET MORSKI
Katedra Podstaw Techniki
Laboratorium Automatyki

Instrukcja ćwiczenia nr 8A

Temat: Badanie układu regulacji z regulatorem PID

Sygnały analogowe

1. Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest wykreślenie charakterystyk regulacyjnych w układzie z regulatorem PID oraz zapoznanie się z nastawami regulatora: wzmocnieniem, całkowaniem i różniczkowaniem za pomocą programu **FluidLab Closed loop** i przetwornika analogowo-cyfrowego **EasyPort**.

2. Zakres wymaganych wiadomości:

- sygnały analogowe i cyfrowe,
- charakterystyka statyczna i dynamiczna obiektu,
- charakterystyka regulatora PID,
- nastawy: wzmocnienie K_P , całkowanie T_I , różniczkowanie T_D ,
- wybór kanału pomiarowego i rejestracja sygnału,

3. Przebieg ćwiczenia:

Połączyć stanowisko modułowego układu pompowego z komputerem, wybrać regulację PID, wprowadzić parametry regulatora PID, załączyć program, zarejestrować charakterystyki według wybranego algorytmu strojenia regulatora PID, wyznaczyć parametry i opracować wyniki, przedstawić wnioski odnośnie jakości regulacji.

4. Stanowisko laboratoryjne:

Stanowisko modułowe układu pompowego, układ pomiarowy i sterowania, program FluidLab Closed loop.

5. Sprawozdanie z ćwiczenia:

Część wstępna, opis elementów, parametry konfigurowane regulatora PID, parametry odpowiedzi układu regulacji z regulatorem PID.

Stanowisko modułowe układu pompowego - regulacja cyfrowana PID

Spis treści

Instrukcja ćwiczenia nr 8A	2
1. Wprowadzenie.....	4
1.1 Metody strojenia pętli regulacji z regulatorem PID	7
1.2 Ręczne strojenie parametrów sterowania (ze znajomością zachowania systemu)	8
1.3 Strojenie parametrów sterowania (z prostą oceną odpowiedzi).....	10
1.4 Zasady strojenia Zieglera-Nicholsa – metoda oscylacyjna.....	12
1.5 Metoda szybkości przyrostu sygnału	15
1.6 Zasady strojenia Chien-Hrones-Reswicka	18
1.7 Metody optymalizacji ustawień regulatora	20
2. Stanowisko laboratoryjne	22
2.1 Dane techniczne wybranych elementów układu	24
2.2 Program FluidLab Closed Loop.....	31
3. Regulacja ciągła PID	36
3.1 Strojenie regulatora typu P	37
3.2 Strojenie regulatora typu I.....	39
3.3 Strojenie regulatora typu PI	41
3.4 Strojenie regulatora typu PI math	43
3.5 Strojenie regulatora typu PD.....	44
3.6 Strojenie regulatora typu PID	46
4. Przebieg ćwiczenia	47
Spis ilustracji	48

1. Wprowadzenie

Do regulacji procesów ciągłych stosuje się w szerokim zakresie regulatory PID. Konstrukcja regulatorów PID dawała transmitancję, która była zbliżona do równania:

$$G(s) = \frac{Y_1(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + \frac{T_D \cdot s}{T \cdot s + 1} \right)$$

W regulatorze występuje działanie proporcjonalne K_P wspólne dla całego układu, dodane działanie całkujące T_I oraz dodane działanie różniczkujące T_D rzeczywiste (człon różniczkujący z inercją T). Taka transmitancja dobrze opisywała działanie regulatora. Regulator konstrukcyjnie posiadał cechy niekorzystne – zjawisko interakcji nastaw i rzeczywisty człon różniczkujący. Układy regulacji w wersji elektronicznej eliminowały w pewnym stopniu podane wady, co poprawiało parametry transmitancji i jakość regulacji.

Wprowadzenie regulacji cyfrowej dało swobodę programowania własności regulatora i eliminację jego wad, transmitancja nie zmieniła się.

Regulatory cyfrowe są programowane według podanej transmitancji z licznymi modyfikacjami. Najważniejsza modyfikacja to ograniczenie inercji członu różniczkującego. Wprowadzenie różniczkowania idealnego nie daje dobrych wyników regulacji w każdym procesie – układ reaguje zbyt szybko na zakłócenia szybkozmiennie, szумы sygnału regulowanego. Często zmieniana pozycja elementu wykonawczego powoduje jego zużycie i nie idzie to w parze z jakością regulacji.

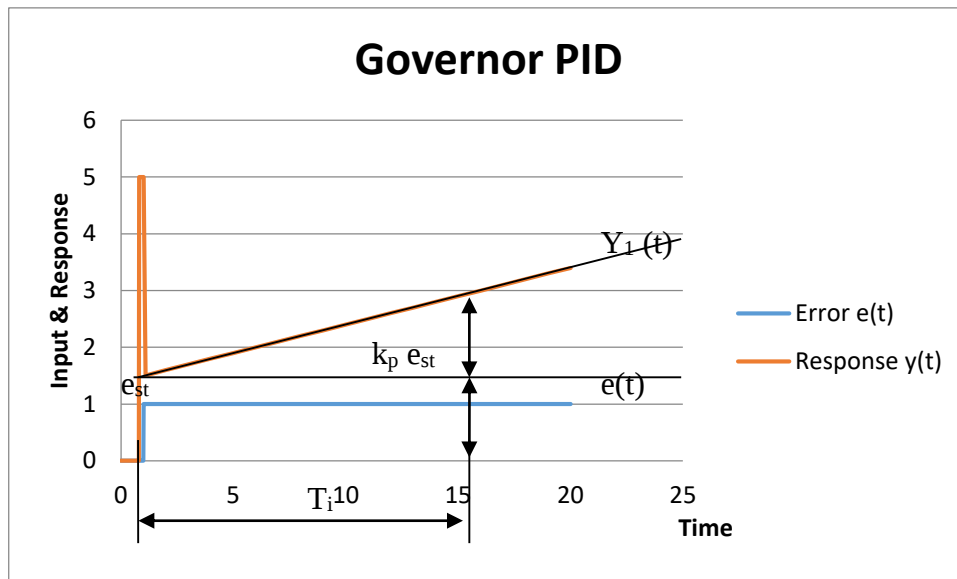
Druga istotna modyfikacja transmitancji regulatora to pełne rozdzielenie parametrów regulatora – człon wzmacniający stał się niezależny w stosunku do działania całkującego i różniczkującego, tzw. regulator o nastawach niezależnych, przydatne w wybranych procesach.

- Regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący PID idealny

$$G(s) = \frac{Y_1(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right) ;$$

i jego odpowiedź na uchyb skokowy

$$y_1(t) = K_P e_{st} \left(1 + \frac{1}{T_I} t + T_D \cdot \delta(t) \right)$$

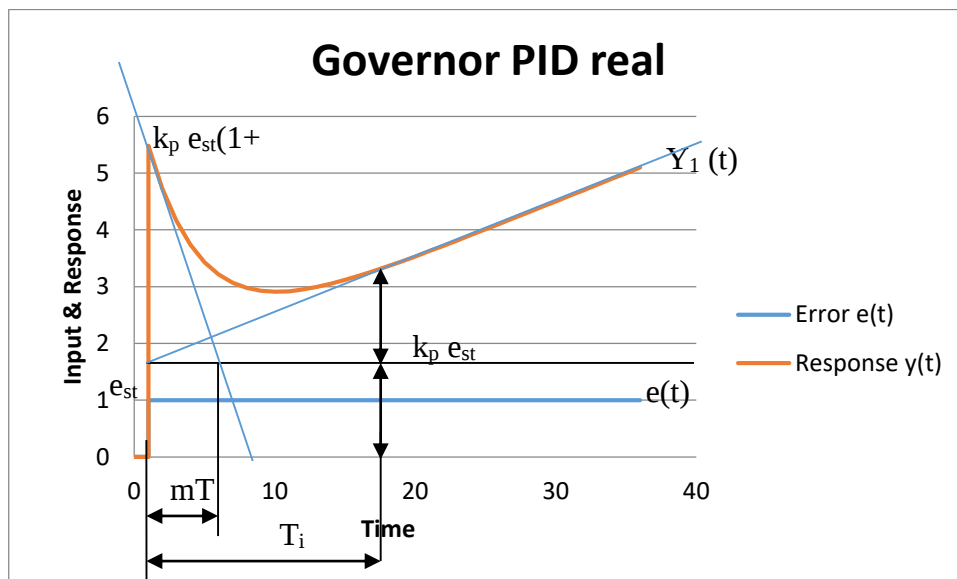


- Regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący PID rzeczywisty

$$G(s) = \frac{Y_1(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + \frac{T_D \cdot s}{T \cdot s + 1} \right)$$

i jego odpowiedź na uchyb skokowy

$$y_1(t) = K_P e_{st} \left(1 + \frac{1}{T_I} t + \frac{T_D}{T} e^{-\frac{t}{T}} \right)$$



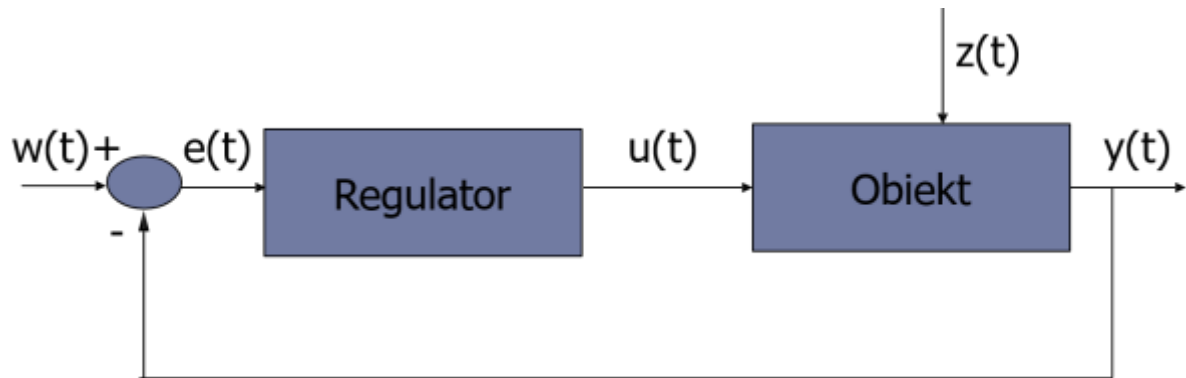
- Regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący PID o nastawach niezależnych

$$G(s) = \frac{Y_1(s)}{E(s)} = K_P + \frac{1}{T_I \cdot s} + \frac{T_D \cdot s}{T \cdot s + 1} ;$$

i jego odpowiedź na uchyb skokowy

$$y_1(t) = e_{st} \cdot \left(K_P + \frac{1}{T_I} t + T_D \cdot e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Klasyczny układ regulacji przedstawiono na rys. 2.



Rys.2 Podstawowy układ regulacji, $y(t)$ – wielkość wyjściowa (regulowana), $u(t)$ – sygnał sterujący, $w(t)$ – wartość zadana, $e(t)$ – uchyb sterowania, $z(t)$ - zakłócenie

Parametry wybranego regulatora można teoretycznie obliczyć za pomocą algorytmów matematycznych lub wyznaczyć praktycznie metodami strojenia.

Przedstawione metody strojenia regulatora PID dotyczą transmitancji podstawowej. Każda zmiana równania transmitancji regulatora wymaga korekcji obliczonych parametrów.

Praktyczne metody dostrajania parametrów kontrolnych regulatora to:

- metoda empiryczna czyli „próba i błąd”
- metody oscylacyjne według Zieglera-Nicholsa dla układów szybkozmiennych
- metoda odpowiedzi skokowej wykorzystująca model stycznej w punkcie przegięcia według Chien-Hrones-Reswicka dla układów sterowanych wyższego rzędu.
- metoda szybkości narastania dla procesów wolno zmiennych

Ważne punkty, które należy wziąć pod uwagę przy rozwiązywaniu problemów ze sterowaniem w pętli zamkniętej:

1. Przypisanie zmiennych sterujących w pętli zamkniętej

- Która zmienna maszyny lub systemu jest zmienną sterowaną, zmienną referencyjną, zmienną manipulowaną itp.?
- Gdzie i jak występują zmienne zakłócające?
- Na tej podstawie dokonuje się doboru czujników i elementów wykonawczych.

2. Podział problemu sterowania na układy

- Gdzie mierzona jest zmienna kontrolowana?
- Gdzie można wpływać na system?
- Jaka jest natura poszczególnych systemów?

3. System kontrolowany

- Gdzie należy dostosować zmienną sterowaną do wartości zadanej?

- Jaka jest odpowiedź czasowa sterowanego układu (wolna czy szybka)?
- Nastawiana reakcja sterownika opiera się na tych czynnikach.

4. Kontroler

- Jaki typ reakcji sterownika jest wymagany?
- Jaki czas reakcji musi mieć sterownik, zwłaszcza na zakłócenia?
- Jakie wartości muszą mieć parametry sterownika?

5. Typ kontrolera

- Jaki rodzaj kontroli jest wymagany?
- Czy reakcja czasowa i kontrolowany system wymagają regulatora P, I, PI lub PID?

1.1 Metody strojenia pętli regulacji z regulatorem PID

Sterownik PID można regulować w celu zapewnienia pożądanego zachowania w szerokiej gamie zastosowań procesu, zmieniając od 1 do 3 parametrów. Można to zrobić z lub bez wiedzy na temat procesu. Jeśli jest to wykonywane bez znajomości procesu, należy to zrobić przynajmniej przy użyciu prostej metody, aby zmniejszyć błąd regulacji.

Istnieją podstawowe techniki regulacji:

- Strojenie śladów i błędów
- Strojenie w oparciu o dane odpowiedzi w otwartej pętli
- Strojenie w oparciu o dane odpowiedzi w zamkniętej pętli
- Ulepszanie strojenia „na podstawie ustaleń” (inteligentna metoda prób i błędów)

Sterowanie techniczne w obiegu zamkniętym jest częścią zautomatyzowanych procesów, których zadaniem jest stabilizacja odpowiedzi:

- ustalanie określonych stanów procesu (trybów pracy) i automatyczne ich utrzymywanie,
- eliminacja wpływu zakłóceń na proces,
- zapobieganie niepożądanemu łączeniu procesów cząstkowych w procesie technicznym.

Określone stany procesów dotyczą głównie określonych parametrów procesu, takich jak ciśnienie, przepływ, temperatura i poziom.

Zasadniczym zadaniem jest optymalizacja ustawień sterownika, który regulator i jakie nastawy są odpowiednie i dla jakiego sterowanego procesu?”

Celem strojenia sterownika, jeśli to możliwe, jest uzyskać:

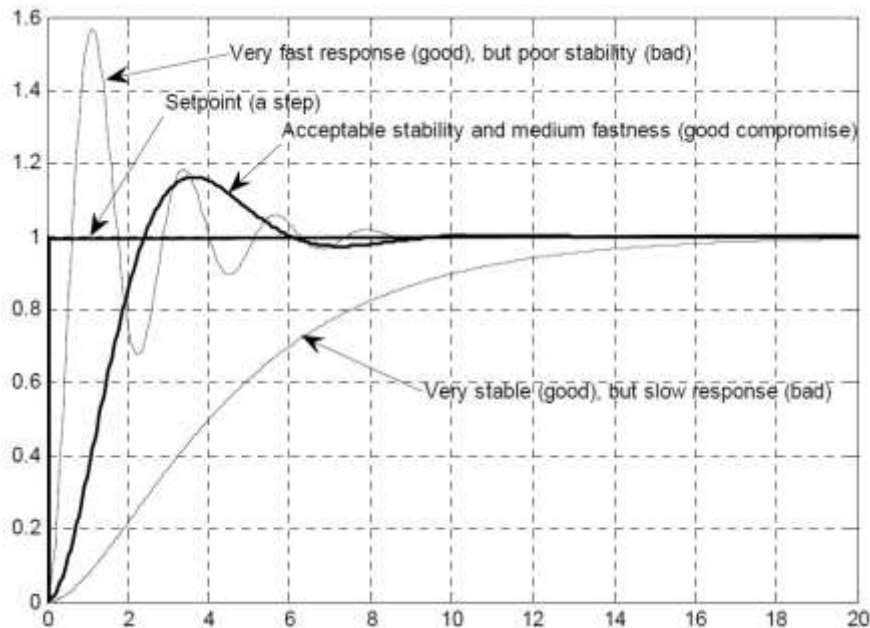
- szybką reakcję na zmianę wartości procesowej,
- dobrą stabilność systemu.

W przypadku systemów praktycznych tych dwóch stanów nie można spełnić jednocześnie:

- im szybsza reakcja, tym gorsza stabilność i

- im lepsza stabilność, tym wolniejsza reakcja.

Szukamy kompromisu pomiędzy: akceptowalna stabilność i średnia szybkość reakcji.



Przykład zachowania układów technicznych.

1.2 Ręczne strojenie parametrów sterowania (ze znajomością zachowania systemu)

Zakładamy, że nie są znane parametry sterowania zapewniające optymalną kontrolę systemu. Aby zachować stabilność pętli sterującej w każdych warunkach, należy wykonać następujące ustawienia wstępne:

Składnik P	Współczynnik proporcjonalny	$K_p = 0,1$
Składnik I	Czas całkowania	$T_i = 500 \text{ s}$
Składnik D	Czas różniczkowania	$T_d = 0$

Kontroler P

1. Ustaw żadaną wartość zadaną i ręcznie zmniejsz odchylenie systemu do zera.
2. Przełącz na tryb automatyczny.
3. Powoli zwiększaj K_p , aż układ regulacji będzie dążył do oscylacji w wyniku małych zmian wartości zadanej.
4. Nieznacznie zmniejszaj K_p , aż do wyeliminowania oscylacji.

Kontroler PI

1. Ustaw żadaną wartość zadaną i ręcznie zmniejsz odchylenie systemu do zera.
2. Przełącz na tryb automatyczny.
3. Powoli zwiększaj K_p , aż układ regulacji będzie dążył do oscylacji w wyniku małych zmian wartości zadanej.
4. Nieznacznie zmniejszaj K_p , aż do wyeliminowania oscylacji.

5. Zmniejszaj T_i , aż pętla sterowania będzie skłonna do ponownych oscylacji.
6. Nieznacznie zwiększaj T_i , aż do wyeliminowania tendencji do oscylacji.

Kontroler PD

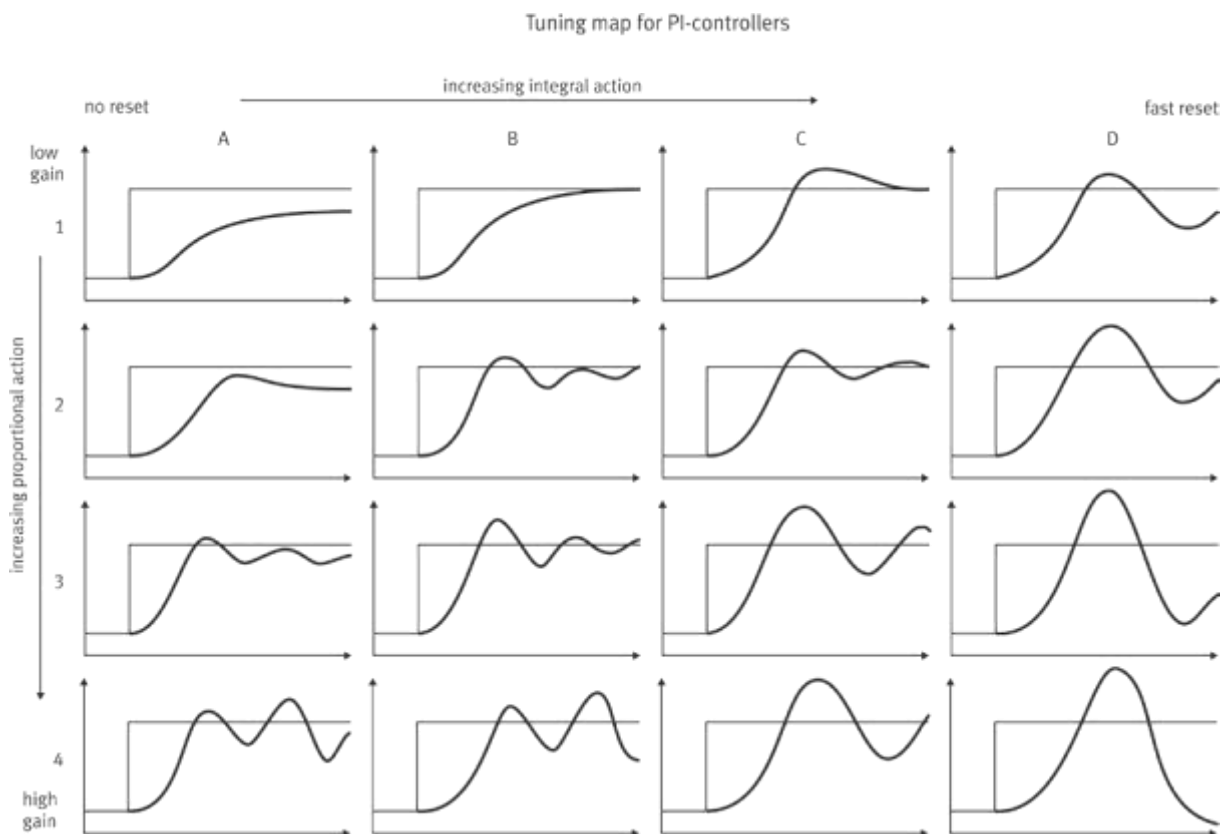
1. Ustaw żadaną wartość zadaną i ręcznie zmniejsz odchylenie systemu do zera.
2. Przełącz na tryb automatyczny.
3. Powoli zwiększaj K_p , aż układ regulacji będzie dążył do oscylacji w wyniku małych zmian wartości zadanej.
4. Zmień T_d z 0 na 1s.
5. Zwiększaj T_d aż do wyeliminowania oscylacji.
6. Powoli zwiększaj K_p , aż oscylacje się powtórzą.
7. Powtarzaj ustawienie w krokach 5 i 6, aż do wyeliminowania oscylacji.
8. Nieznacznie zmniejszaj T_d i K_p , aż do wyeliminowania oscylacji.

Kontroler PID

1. Ustaw żadaną wartość zadaną i ręcznie zmniejsz odchylenie systemu do zera.
2. Przełącz na tryb automatyczny.
3. Powoli zwiększaj K_p , aż układ regulacji będzie dążył do oscylacji w wyniku małych zmian wartości zadanej.
4. Zmień T_d z 0 na 1s.
5. Zwiększaj T_d aż do wyeliminowania oscylacji.
6. Ponownie powoli zwiększaj K_p , aż oscylacje się powtórzą.
7. Powtarzaj ustawienie zgodnie z krokami 5 i 6, aż do wyeliminowania oscylacji.
8. Nieznacznie zmniejszaj T_d i K_p , aż oscylacje ustaną.
9. Zmniejszaj T_i , aż pętla sterowania będzie skłonna do ponownych oscylacji.
10. Nieznacznie zwiększaj T_i , aż do wyeliminowania tendencji do oscylacji.

1.3 Strojenie parametrów sterowania (z prostą oceną odpowiedzi)

W przypadku procesu samoregulacji kontrolowanego przez regulator PI, strojenie proste pokazuje reakcję pętli regulacyjnej na zmianę wartości zadanej dla różnych kombinacji strojenia proporcjonalnego i całkującego.



Strojenie regulatora PI proste

Wykres w lewym górnym rogu A1 przedstawia reakcję w pętli zamkniętej na zmianę wartości zadanej, gdy regulator jest dostrojony z bardzo niskim wzmocnieniem i bez działania całkującego. Jeżeli nie można wyłączyć działania całkującego, wówczas wykres A1 przedstawia minimalne działanie całkujące. Wykres A1 pokazuje reakcję na nadmierne tłumienie – brak oscylacji – powodujące znaczne odchylenie w stanie ustalonym od wartości zadanej.

W miarę zwiększania wzmocnienia przesuwamy się w dół po pierwszej kolumnie. Najpierw występuje niewielka tendencja do przeregulowania, następnie większa tendencja do oscylacji, z odpowiednim zmniejszeniem uchybu regulacji w stanie ustalonym. Ostatecznie, jeśli wzmocnienie zostanie zbyt mocno zwiększone, pętla zostanie wprowadzona w stan niestabilny.

Należy pamiętać, że im bardziej zmniejszymy wzmocnienie z niskiego na wysokie, tym mniej stabilna jest pętla sprzężenia zwrotnego. Aby zwiększyć prędkość działania całkującego

z bardzo wolnego do szybkiego, należy zmniejszyć wartość czasu T_i (liczba powtórzeń na sekundę).

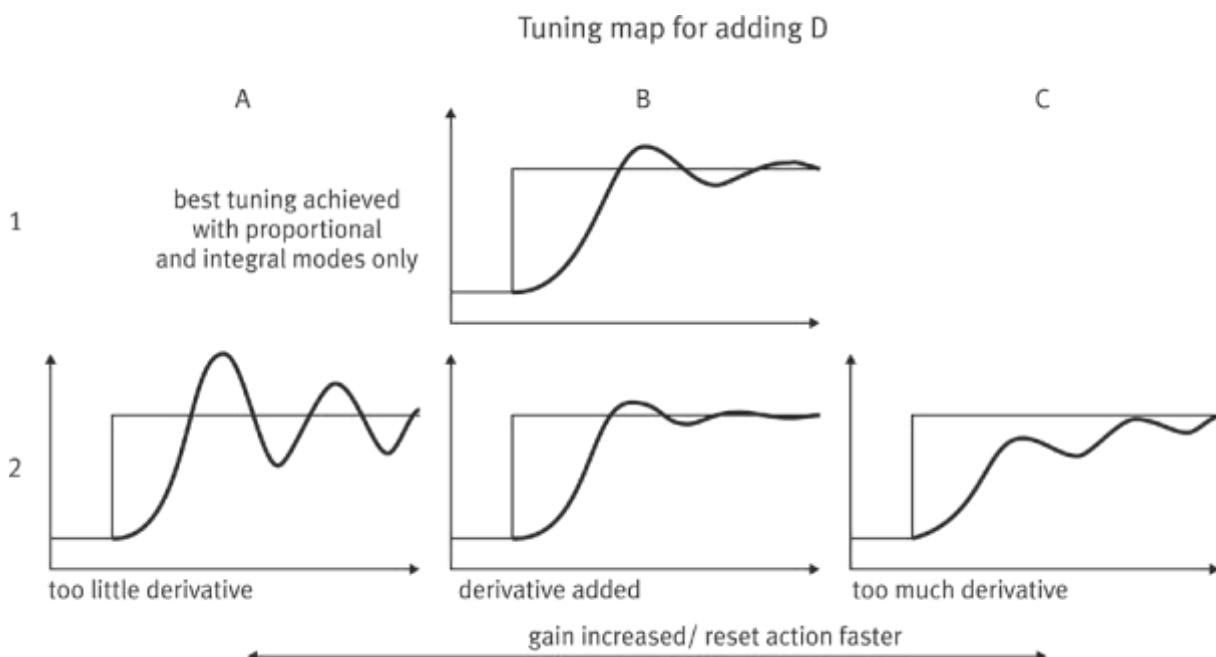
Jeśli prędkość działania całkującego wzrośnie dalej od B1 do C1, krzywa wygina się w górę i przekracza wartość zadaną. Jeszcze dalszy wzrost spowoduje bardzo niepożądane oscylacje układu (D1). Wzrost prędkości w działaniu całkującym jest ruchem w kierunku destabilizacji układu.

Jeżeli chcemy maksymalnej stabilności układu zamkniętego, to zarówno wzmocnienie, jak i czas całkowania można ustawić na wartość minimalną. Ale wtedy nie jesteśmy w stanie zrekompensować skutków jakichkolwiek zakłóceń. Aby zapewnić rozsądną stabilność, obie wartości powinny być utrzymywane z dala od jednego lub drugiego kierunku, który prowadzi do niestabilnych warunków pracy układu.

Z przedstawionej grafiki widać, że istnieje więcej niż jeden sposób dostrojenia obu wartości K_p i T_i w celu uzyskania rozsądnej stabilności (np. B1, B2, C2).

Zasada dostrojenia D

W niektórych stanach strojenie za pomocą tylko regulatora PI nie daje akceptowalnej odpowiedzi, jak pokazano w B2. Dodając niewielką wartość pochodnej sygnału, układ powinien dać akceptowalną odpowiedź dla większej stabilności. Pozwala nam to zwiększyć wzmocnienie i działanie całkujące.



Zasada strojenia dodaniem pochodnej sygnału

1.4 Zasady strojenia Zieglera-Nicholsa – metoda oscylacyjna

W początkowym okresie wprowadzania technologii sterowania w układzie regulacji zamkniętej J.G. Ziegler i N.B. Nichols ustalili zasady strojenia regulatorów, które są nadal stosowane. Przeznaczone są dla przypadków, w których:

- Nie istnieje model układu sterowanego,
- Pętlę sterowania można bezpiecznie eksploatować w zakresie granicznych stanów stabilności.

1.4.1 Metoda oscylacyjna

Metoda według Zieglera-Nicholsa polega na doprowadzeniu układu sterowania do granicy stabilności w procesie eksperymentalnym, tak aby układ sterowania (regulator i obiekt sterowania) oscylował na granicy stabilności. W przypadku oscylacji harmonicznych czas trwania oscylacji lub czas trwania okresu T_{OSC} jest stały – w przypadku oscylacji tłumionej amplituda maleje w czasie.

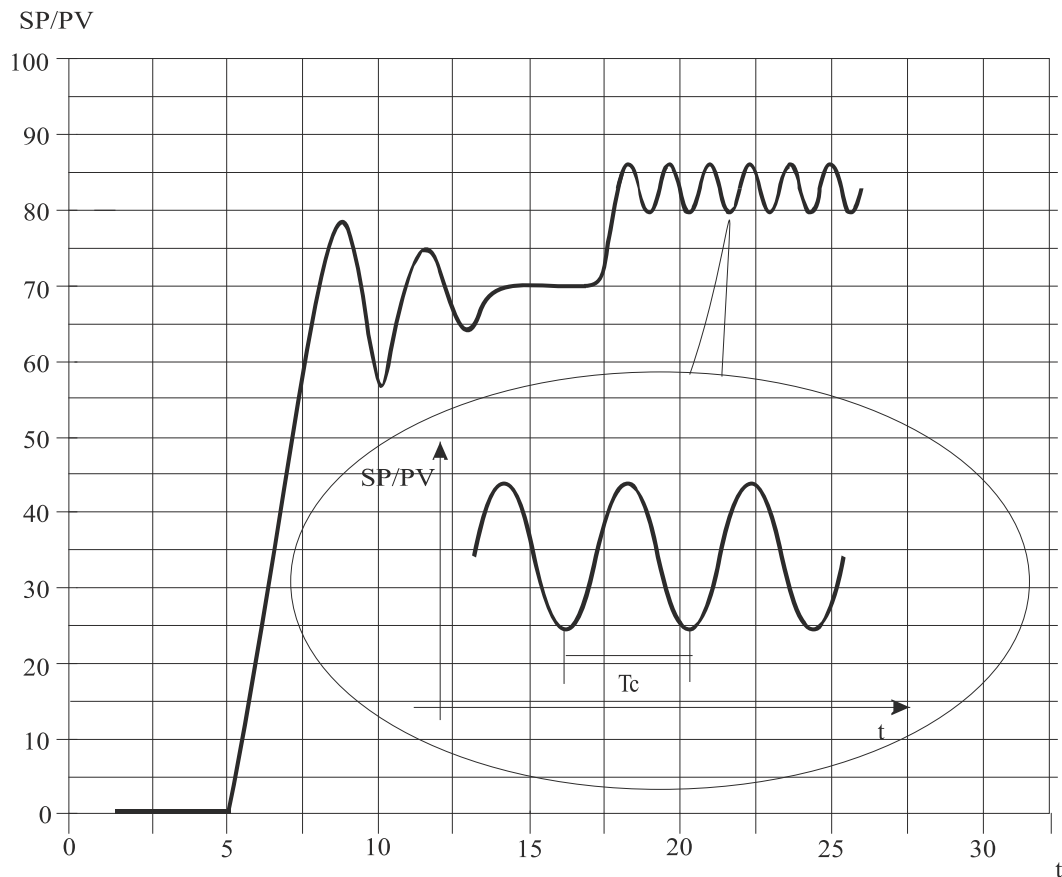
Postępujemy w punktach kolejno:

1. Ustawiamy działanie sterownika jako regulator P ($T_D = 0$, $T_I = \infty$).
2. Zwiększamy współczynnik wzmocnienia K_P regulatora, aż układ regulacji będzie swobodnie oscylował - granica stabilności. Określa to krytyczny współczynnik wzmocnienia K_{KR} i okres oscylacji T_{OSC} trwałych.
3. Na podstawie tych dwóch parametrów (K_{KR} , T_{OSC}) należy ustawić parametry regulatora K_P , T_I i T_D w zależności od typu regulatora, zgodnie z poniższą zasadą.

Tabela Zasady strojenia regulatora metodą Zieglera-Nicholsa

	K_P	T_I	T_D
Regulator P	$K_P = 0.5 \cdot K_{KR}$	-	-
Regulator PI	$K_P = 0.45 \cdot K_{KR}$	$T_I = 0.85 \cdot T_{OSC}$	-
Regulator PID	$K_P = 0.6 \cdot K_{KR}$	$T_I = 0.5 \cdot T_{OSC}$	$T_D = 0.12 \cdot T_{OSC}$

Zastosowanie podanych założeń w praktyce pokazuje, że te wartości strojenia prowadzą do efektywnego zachowania układu sterowania tylko wtedy, gdy kontrolowany układ w modelu wykazuje względnie mały czas opóźnienia.



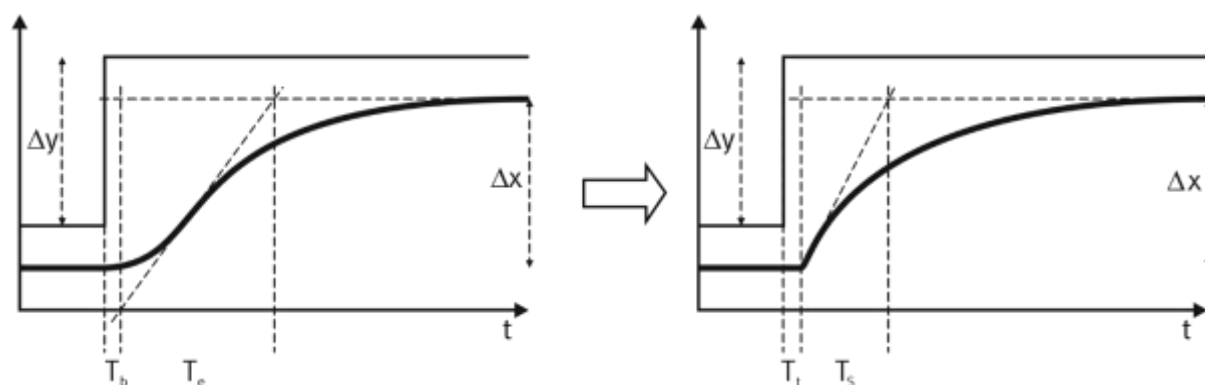
Metoda oscylacyjna Zieglera-Nicholsa

1.4.2 Metoda odpowiedzi skokowej

W drugiej metodzie Zieglera-Nicholsa przyjmujemy, że układ regulacji pracuje bez regulatora. Odpowiedź skokowa sterowanego obiektu jest rejestrowana w punkcie pracy, a zatem statycznemu i dynamicznemu zachowaniu systemu przypisuje się następujące parametry:

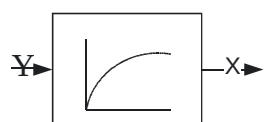
- wzmocnienie obiektu K_S – w stanie statycznym
- stała czasowa obiektu T_S – w zakresie dynamicznym charakterystyki
- czas opóźnienia $T\tau$ – w zakresie dynamicznym charakterystyki

Warunkiem jest stabilny system sterowania. Metoda przewiduje konwersję układu sterowania wyższego rzędu na układ pierwszego rzędu z czasem opóźnienia.



Praktyczna realizacja metody odpowiedzi skokowej

1. Zarejestruj odpowiedź skokową układu w punkcie pracy.
2. Określ graficznie czas opóźnienia T_τ i stałą czasową T_s odpowiedzi.
3. Oblicz wzmocnienie układu otwartego K_S .
4. Na podstawie wyznaczonych parametrów należy następnie wyliczyć i ustawić w regulatorze parametry K_P , T_I i T_D , w zależności od typu regulatora.



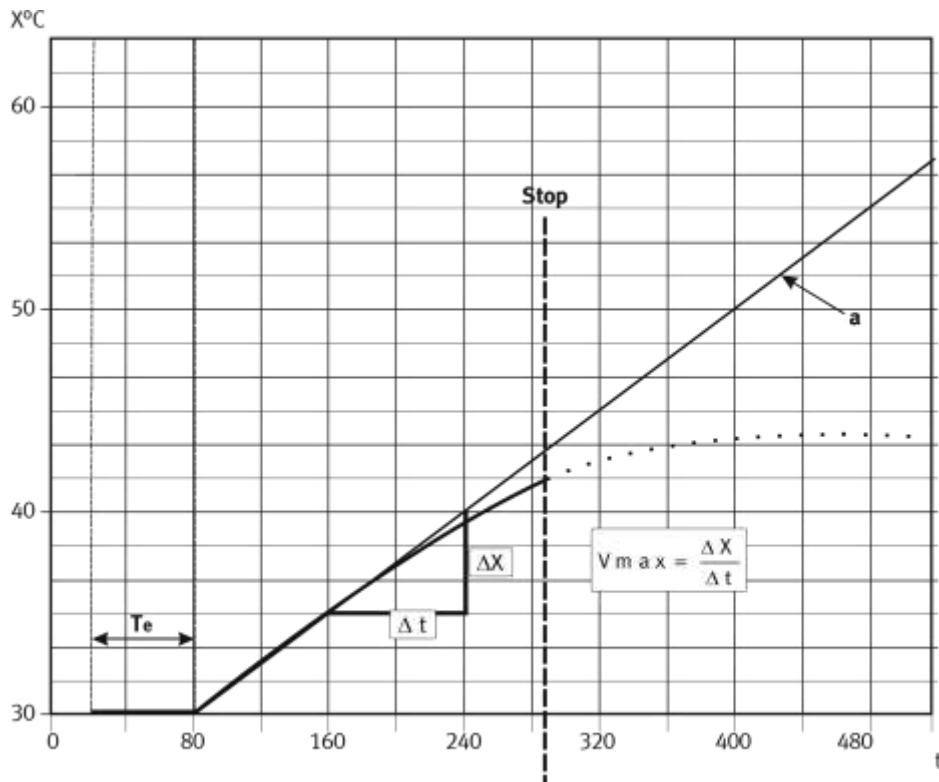
$$K_S = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$$

Tabela Nastawy regulatora według metody odpowiedzi skokowej

Parametr kontrolny	K_P	T_I	T_D
Regulator P	$K_P = \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_S}{T_\tau}$	—	—
Regulator PI	$K_P = \frac{0.9}{K_S} \cdot \frac{T_S}{T_\tau}$	$T_I = 3.3 \cdot T_\tau$	—
Regulator PID	$K_P = \frac{0.9}{K_S} \cdot \frac{T_S}{T_\tau}$	$T_I = 2 \cdot T_\tau$	$T_d = 0.5 \cdot T_\tau$

1.5 Metoda szybkości przyrostu sygnału

W przypadku regulowanych układów wolnozmiennych ze stanem ustalonym (minimum drugiego rzędu) można zastosować oszczędzającą czas metodę optymalizacji parametrów regulacji regulatora PID poprzez skokową zmianę regulowanego układu. Zmiana skokowa z określoną zmienną regulowaną jest stosowana w kontrolowanym systemie do momentu, gdy rzeczywista zmiana wartości wykaze maksymalne tempo wzrostu.



Actual value curve using method according to rate of rise

Praktyczna realizacja metody szybkości przyrostu sygnału

1. Wprowadź skok na wejściu wielkości regulowanej do sterowanego układu.
2. Zarejestruj odpowiedź wyjściową wartości rzeczywistej.
3. Zatrzymaj układ po osiągnięciu maksymalnej szybkości wzrostu odpowiedzi.
4. Narysuj styczną w punkcie przyrostu maksymalnego sygnału odpowiedzi.
5. Oblicz prędkość wzrostu odpowiedzi.

$$v_{max} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

6. Określić zwłokę czasową T_e (czas opóźnienia).
7. Wyznacz nastawy wybranego regulatora według tabeli.

Tabela Optymalizacja parametrów regulacji zgodnie z odpowiedzią skokową dla układów ze stanem ustalonym regulacji (>PT2)

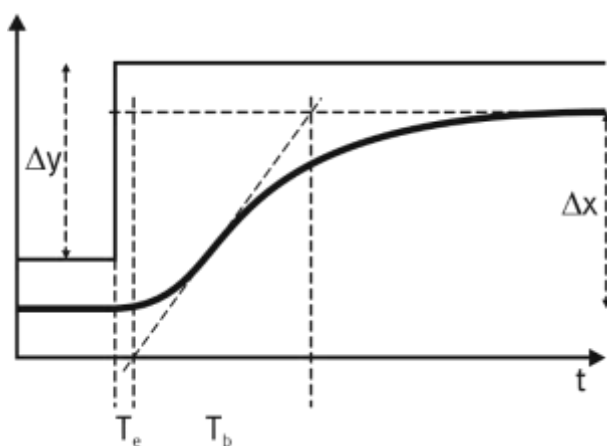
Struktura kontrolera	Parametry kontrolne	Opis
Regulator P	$K_P = \frac{\Delta Y}{v_{max} \cdot T_e \cdot Y_H}$	Y_H = Maksymalny zakres korekcji zwykle: 100%, bez ograniczenia wartości ΔY = podana wysokość skoku. W tym przypadku równa się PWM urządzenia grzewczego (40%), (ang. Pulse-width modulation)
Regulator PI	$K_P = \frac{\Delta Y}{1.2 \cdot v_{max} \cdot T_e \cdot Y_H}$ $T_I = 3.3 \cdot T_e$	
Regulator PID	$K_P = \frac{\Delta Y}{0.83 \cdot v_{max} \cdot T_e \cdot Y_H}$ $T_I = 2 \cdot T_e$ $T_D = 0.5 \cdot T_e$	

Model styczny z punktem przegięcia

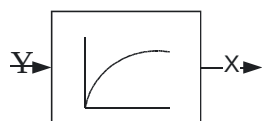
W licznych zastosowaniach technicznych, przede wszystkim w technologii procesowej lub energetyce, reakcje skokowe systemów występują bez sekcji oscylacyjnych i wykazują jedynie zachowanie proporcjonalne lub całkujące w odniesieniu do czasu martwego. Dlatego funkcja przejściowa jest często używana w postaci liniowego modelu dynamicznego.

Zachowanie układów wyższego rzędu charakteryzuje się więc w znacznie uproszczony sposób trzema właściwościami:

- Współczynnik proporcjonalny lub całkujący
- Czas opóźnienia
- Czas regulacji



Model funkcji przejściowych (model styczny z punktem przegięcia)



$$K_S = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$$

K_S – współczynnik proporcjonalny układu

T_e – szacunkowy czas opóźnienia (EN 60027-6)

T_b – stała zastępcza inercji

ΔY – wysokość sygnału wejściowego do pętli sterującej

ΔX – wysokość odpowiedzi skokowej pętli regulacyjnej

$$K_{IS} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{K}{T_b} \quad - \text{współczynnik działania całkującego}$$

Styczna w punkcie przegięcia używana do otrzymania wartości charakterystycznych T_e i T_b jest na przykład rysowana zgrubnie w doświadczalnie wyznaczonej odpowiedzi skokowej. Jeżeli nakładają się na to zakłócenia o wysokiej częstotliwości, należy je wygładzić (np. przy pomocy komputera). W przypadku zakłóceń o niskiej częstotliwości nie można ocenić procesu. Czasami pomocne jest powtórzenie eksperymentu i wygładzenie poprzez obliczenie wartości średniej.

Poniższa tabela zawiera zestawienie wartości charakterystycznych typowych modeli układów sterowania.

Tabela Modelowe wartości charakterystyczne typowych układów sterowanych

Zmienna kontrolowania do	Rodzaj kontrolowanego systemu	Czas opóźnienia T_e	Czas narastania T_b
Temperatura	Laboratoryjne piece do wyżarzania	0,5 – 1 min	5 – 15 minut
	Przemysł	1 – 3 min	10 – 30 minut
	Kolumna destylacyjna	1 – 5 minut	40 – 60 minut
	Przegrzewacz	1 – 2 min	20 – 100 minut
	Ogrzewanie pomieszczeń	1 – 5 minut	10 – 60 minut
Przepływ	Rurociągi – gaz	0 – 5 s	0,2 – 10 sek
Przepływ	Rurociągi - ciecz	0	0

Stopień trudności, jakiego można się spodziewać, można już ocenić na podstawie współczynnika $\frac{T_e}{T_b}$ regulowanego układu.

Tabela Ocena stopnia trudności sterowania w pętli zamkniętej

Współczynnik $\frac{T_e}{T_b}$	Stopień trudności
< 3	Łatwe do kontrolowania
≈ 6	Nadal da się to kontrolować
> 10	Trudne do kontrolowania

1.6 Zasady strojenia Chiena-Hronesa-Reswicka

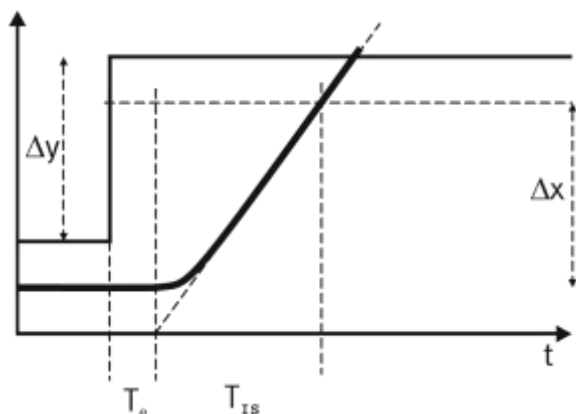
Jeżeli istnieje model stycznej z punktem przegięcia sterowanego układu, wówczas można zastosować reguły strojenia Chiena, Hronesa i Reswicka. Są one wymienione w poniższej tabeli.

Tabela Zasady strojenia Chiena-Hronesa-Reswicka

Typ regulatora	Przeregulowanie 20% po zmianie skokowej sygnału		Brak przeregulowania (0%) po zmianie skokowej sygnału	
	zmiennej zakłócającej z	wartości zadanej wartości W	zmiennej zakłócającej z	wartości zadanej wartość w
P	$k_P \approx \frac{0.7}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$	$k_P \approx \frac{0.7}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$	$k_P \approx \frac{0.3}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$	$k_P \approx \frac{0.3}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$
PI	$k_P \approx \frac{0.7}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx 2.3 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.6}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx T_b$	$k_P \approx \frac{0.6}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx 4 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.35}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx 1.2 \cdot T_b$
PID	$k_P \approx \frac{1.2}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx 2 \cdot T_e$ $T_d \approx 0.42 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.95}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx 1.35 \cdot T_b$ $T_d \approx 0.47 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.95}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx 2.4 \cdot T_e$ $T_d \approx 0.42 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.6}{k_s} \cdot \frac{T_b}{T_e}$ $T_i \approx T_b$ $T_d \approx 0.5 \cdot T_e$

Parametry dla systemów całkujących z czasem opóźnienia

Dla układów całkujących I zamiast używać $\frac{T_b}{k_S \cdot T_e}$, należy stosować wyrażenie $\frac{1}{K_{IS} \cdot T_e}$ i $T_b = T_{IS}$.



W rezultacie powstają następujące parametry ustawień:

Tabela Zasady strojenia Chien-Hronesa-Reswicka dla systemów bez stanu ustalonego

Typ regulatora	Przeregulowanie 20% po zmianie skokowej sygnału		Brak przeregulowania (0%) po zmianie skokowej sygnału	
	zmiennej zakłócającej z	wartości zadanej wartości W	zmiennej zakłócającej z	wartości zadanej wartość w
P	$k_P \approx \frac{0.7}{K_{IS} \cdot T_e}$	$k_P \approx \frac{0.7}{K_{IS} \cdot T_e}$	$k_P \approx \frac{0.3}{K_{IS} \cdot T_e}$	$k_P \approx \frac{0.3}{K_{IS} \cdot T_e}$
PI	$k_P \approx \frac{0.7}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx 2.3 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.6}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx T_{IS}$	$k_P \approx \frac{0.6}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx 4 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.35}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx 1.2 \cdot T_{IS}$
PID	$k_P \approx \frac{1.2}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx 2 \cdot T_e$ $T_d \approx 0.42 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.95}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx 1.35 \cdot T_{IS}$ $T_d \approx 0.47 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.95}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx 2.4 \cdot T_e$ $T_d \approx 0.42 \cdot T_e$	$k_P \approx \frac{0.6}{K_{IS} \cdot T_e}$ $T_i \approx T_{IS}$ $T_d \approx 0.5 \cdot T_e$

1.7 Metody optymalizacji ustawień regulatora

Sterowanie techniczne jest częścią składową systemów automatyki, której podstawową funkcją jest stabilizacja procesów. Stosowane są w celu:

- Automatyczne wywoływanie i utrzymywanie określonych stanów procesu (tryby pracy)
- Eliminowanie skutków zakłóceń w przebiegu procesu
- Eliminacja niepożądanego łączenia podprocesów w ramach procesu technicznego

Stany procesu, o których mowa przede wszystkim, dotyczą pewnych parametrów procesu, takich jak ciśnienie, przepływ, temperatura i poziom napełnienia.

Podstawowe pytanie dotyczące optymalizacji ustawień sterownika brzmi: „Jaki sterownik pasuje do jakiego kontrolowanego systemu?”

Poniżej wymieniono sterowniki używane tradycyjnie w najważniejszych systemach sterowania.

Tabela Wybór typów regulatorów do sterowania najważniejszą wielkością sterującą

	Nieznaczne odchylenie uchybu		Brak odchylenia, uchybu	
	P	PD	PI	PID
Temperatura	Proste systemy sterowane dla minimalnych wymagań	Proste systemy sterowane dla minimalnych wymagań	Odpowiedni	Idealnie dopasowany
Ciśnienie	Generalnie niewykonalne	Generalnie niewykonalne	Bardzo odpowiedni, do kontrolowanych systemów z dużym czasem opóźnienia, również I kontroler	Odpowiednie, jeśli regulowana wielkość nie oscyluje nadmiernie
Przepływ	Nieodpowiedni	Nieodpowiedni	Praktyczny, chociaż kontroler I może być lepszy	Odpowiedni
Poziom napełnienia	Dla układów z krótkim czasem opóźnienia	Odpowiedni	Odpowiedni	Idealnie dopasowany
Obsługa materiałów	Nieodpowiednie ze względu na czas opóźnienia	Nieodpowiedni	Praktyczne, chociaż często zdarza się, że sam kontroluję lepsza	Żadnych dobrych efektów w porównaniu do PI

Poszczególne regulatory można klasyfikować na podstawie kontrolowanych układów identyfikowanych za pomocą odpowiedzi skokowej. Na przykład system ze sterowaniem I można regulować za pomocą sterownika P lub odwrotnie, system ze sterowaniem P można sterować za pomocą sterownika I.

Tabela Metody strojenia

System kontrolowany	Struktura regulatora			
	P	PD	PI	PID
Tylko opóźnienie	Nieodpowiednie ze względu na czas opóźnienia	Nieodpowiedni	Praktyczny, chociaż kontroler I jest ogólnie odpowiedni	Oferuje prawie żadnych korzyści w porównaniu do PI
Układy pierwszego stopnia z krótkim czasem opóźnienia	Odpowiednie, jeśli odchylenie z błędu jest akceptowalne	Odpowiednie, jeśli odchylenie systemu jest akceptowalne	Bardzo odpowiedni	Odpowiedni
Układy drugiego stopnia z krótkim czasem opóźnienia	Odchylenie systemu jest zazwyczaj zbyt duże dla wymaganego K_p	Odchylenie systemu jest ogólnie zbyt duże dla wymaganego K_p	Gorszy niż PID	Bardzo odpowiedni
Układy wyższego rzędu	Nieodpowiedni	Nieodpowiedni	Gorszy niż PID	Bardzo odpowiedni
Układy bez kompensacji i z czasem opóźnienia	Odpowiedni	Odpowiedni	Odpowiedni	Idealnie dopasowany

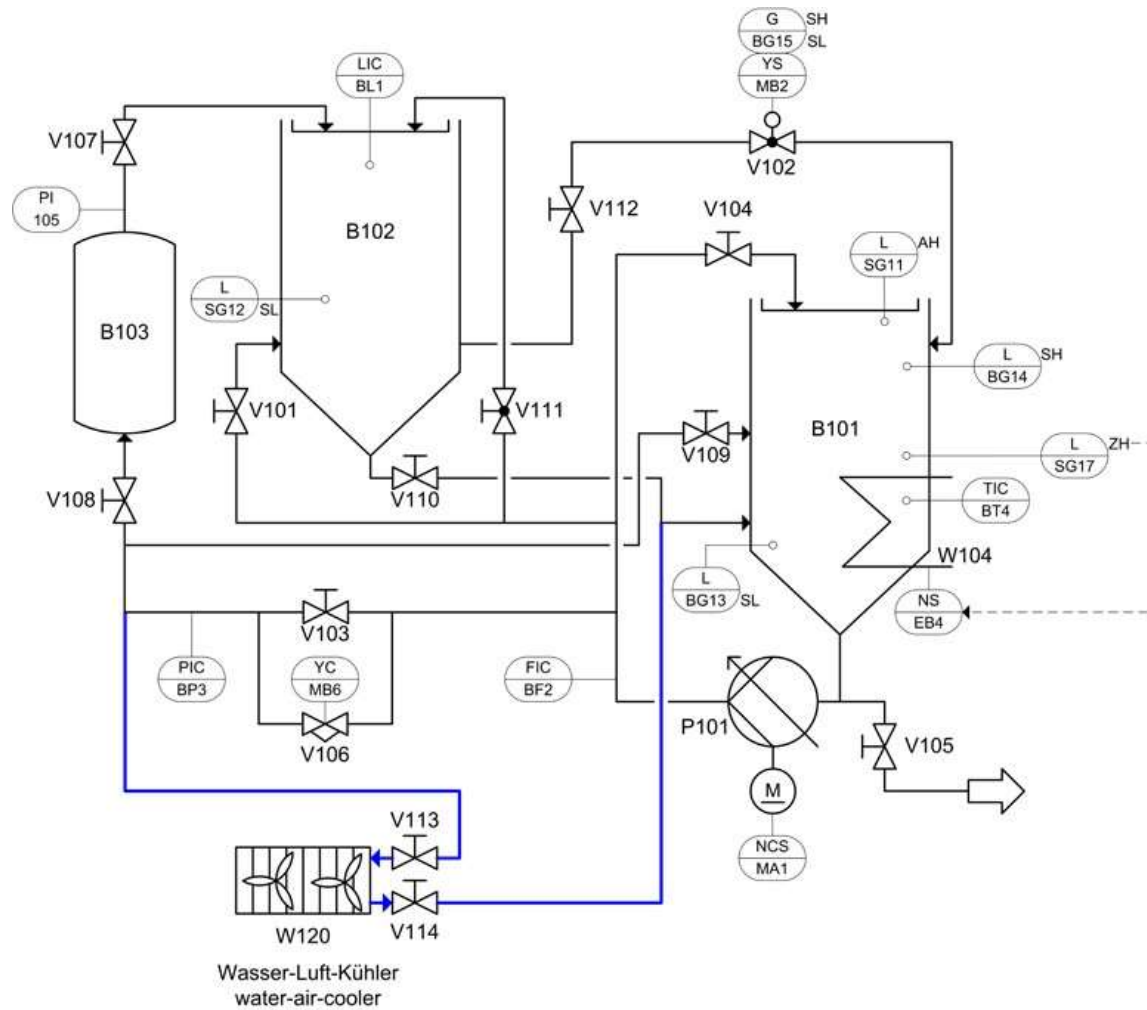
2. Stanowisko laboratoryjne

Pomiary realizujemy na stanowisku modułowym układu zbiorników, Rys. 2.1.



Rys. 2.1 Stanowisko modułowe układu zbiorników

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawia Rys. 2.2.



Rys. 2.2 Schemat stanowiska modułowego układu zbiorników

2.1 Dane techniczne wybranych elementów układu

1. Pompa wody, no.170712



Rys. 2.3 Pompa wody

Tabela Dane techniczne pomy wody

Pressure [bar]	Delivery rate [l/min]	Current at 24V [A]
0.1	26	1.1
0.2	19.5	1.0
0.3	9.0	0.75
Measured values apply for a tubing connection of 3/4" (20 mm)		

Permissible operating voltage	24 V DC
Current consumption	0.5 to 0.9 A
max. flow	10 l/min
Temperature range (motor)	0 °C to +65 °C
Materials: Pump housing Rotor Rotor axis	Plastic (PA66) Plastic (PA66) Stainless steel

2. Zawór proporcjonalny, no.170714



Rys. 2.4 Zawór proporcjonalny

Tabela Dane techniczne zaworu proporcjonalnego

Permissible operating voltage (to be connected to control electronics)	24 V DC
Power consumption (solenoid)	8 W
Rated duty	Continuous operation
Degree of protection	IP 65
Nominal size	6 mm
Operating pressure	0 to 0.5 bar
Ambient operating temperature	max. +55 °C
Hysteresis	$\leq 5\%$ of final value
Response sensitivity	$\leq 0.5\%$ of final value
Repetition accuracy	$\leq 0.5\%$ of final value
Flow media	Neutral media, e.g. water, compressed air
Temperature of medium	0 °C to +65 °C

Materials Housing Internal valve parts Seal	Brass Stainless steel FPM
Dimensions Height with plugged in control electronics Length	108 mm 46 mm
Weight	0.40 kg
Pipe connection	G 1/4 “

3. Czujnik temperatury TP100, no.170709



Rys. 2.5 Czujnik temperatury TP100

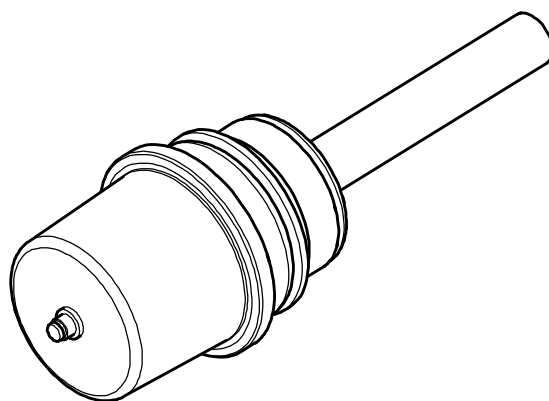
Czujnik temperatury zawiera platynowy termometr oporowy z wymiennym elementem pomiarowym. Czujnik składa się z rurki osłonowej, głowicy przyłączeniowej i elementu pomiarowego. Podczas instalacji należy możliwie najdokładniej upewnić się, że czujnik akceptuje mierzoną temperaturę.

Tabela Wartość domyślna rezystancji platynowego termometru rezystancyjnego Pt 100 - w funkcji temperatury

Temperatura [°C]	-100,00	0,00	100,00	200,00
Rezystancja [Ω]	60,25	100,00	138,50	175,84
Measurement range	-50 °C to +150 °C			
Measurement resistor	Pt 100			
Tolerance 0 °C 100 °C	+/- 0.12 Ω +/- 0.30 Ω			

Materials Casing Tube protector	stainless steel stainless steel
Dimensions Length Measuring element length Screw thread	100 mm 145 mm G 1/2 "
Electrical connection	Cable, 750 mm long

4. Grzałka elektryczna, no.170713



Rys. 2.6 Grzałka elektryczna

Element grzewczy działa poprzez zasilanie napięciem 230 V AC. Dwa tryby pracy umożliwiają pracę cyfrową lub analogową. Jeżeli używany jest cyfrowy tryb pracy, grzejnik jest włączany i wyłączany poprzez wejście 24 V. W przypadku pracy analogowej moc grzewczą można regulować bezstopniowo za pomocą sygnału od 0 do 10 V.

Tabela Dane techniczne grzałki

Parameter	Value
Heating power	1000 W / 230 V AC
Power supply	24 V DC / 100 mA
Digital input	24 V DC / 12 mA
Analogue input	0 to 10 V
Dimensions Heater tube Retaining thread	150 mm x 20 mm diameter G 1½"
Materials (heater tube casing)	Stainless steel
Connections	

Heater	Mains cable with plug, 2000 mm long
Control	4-pin M8 plug

Dioda LED wskazuje stan przełączenia, a także błędy pracy.

Tabela Dioda LED

Parameter	Value
Digital operation: 24 V at digital input and 24 V at analogue input	Green on continuously Heater on
0 V at digital input and 24 V at analogue input	Green off Heater off
Analogue operation: 24 V at digital input and 0 to 10 V at analogue input	Flashing green Heater actuated
Excessively high temperature at heater tube: Heater is shut down at $TH > \text{approx. } 50^{\circ} \text{ C}$, and is switched back on automatically at $TH < 45^{\circ} \text{ C}$	Red on continuously Heater off
Excessively high temperature at power section: Heater is shut down at component temperature $TC > 90^{\circ} \text{ C}$, and is switched back on automatically at $TC < 85^{\circ} \text{ C}$	Flashing red Heater off

Tabela Podłączenie zasilania i sterowania grzałki

Parameter	Value
24 V supply	Plug pin 1 (brown)
0 V supply	Plug pin 3 (blue)
24 V digital input	Plug pin 4 (black)
0 to 10 V / 24 V analogue input	Plug pin 2 (white)

5. Czujnik przepływu magneto-indukcyjny, no. BG.PC.0189



Rys. 2.7 Czujnik przepływu magneto-indukcyjny

Czujnik przepływu opiera się na zasadzie indukcji Faradaya. Medium przewodzące przepływa w czujniku przez pole magnetyczne, które generuje napięcie. Napięcie to jest proporcjonalne do prędkości przepływu lub natężenia przepływu. Napięcie jest wykrywane za pomocą elektrod i przetwarzane w elektronice analizującej. Wyjścia analogowe, binarne i impulsowe oferują różne możliwości przetwarzania mierzonych danych. Dzięki elastycznemu programowaniu za pomocą przycisków, czujnik przepływu można łatwo dostosować do różnych warunków.

Tabela Dane techniczne czujnika przepływu

Parameter	Value
Operating voltage	19 – 30 V DC
Protection / Protection class	IP 67 / III
Current consumption	95 mA
Outputs	
Current rating	200 mA
Analog output	4...20 mA; 0...10 V
Max. load	500 Ω (4...20 mA)
Min. load	2 k Ω (0...10 V)
Flow monitoring	
Measuring range, factory setting	0,1... 25 l/min 0,1... 10 l/min
Measuring range, adjustment	$\pm$ (0,8% MW + 0,5% MEW)

Accuracy	
Display range	-30...30 l/min
Resolution	0,05 l/min
Pulse value□	0,01 l ...30 000 m ³
Power-on delay time	5 s
Temperature monitoring	
Measuring range	-20...+80 °C
Accuracy	± 2,5 (Q > 1 l/min)
Interfaces IO-Link-Device	
Bit rate	COM2 (38,4 kBaud)
IO-Link Version	1.1
Port class	A
Process data analog	3
Process data binär	2
Viscosity	<70 mm ² /s at 40°C
Conductivity	≥ 20 µS/cm
Temperature range	
Ambient temperature	-10 °C ...+60 °C
Medium temperature	-10 °C ...+70 °C
Pressure rating	16 bar
Materials	V4A (1.4404); PEEK; O-Ring: FKM;
Material wetted parts	PE
Housing materials	4A (1.4404); PBT-GF 20; PC; FKM, TPE
Connections	
Process connection sensor	
Electrical	G1/2“ flat sealing
connection Push-in	M12 connector
connection for piping	15 mm
diameter, external	

2.2 Program FluidLab Closed Loop

Pomiary załączamy w programie FluidLab Closed Loop wprowadzając właściwe parametry. W kolejności uruchamiamy program, wybieramy język właściwy dla siebie, inicjujemy połączenie przez EasyPort.



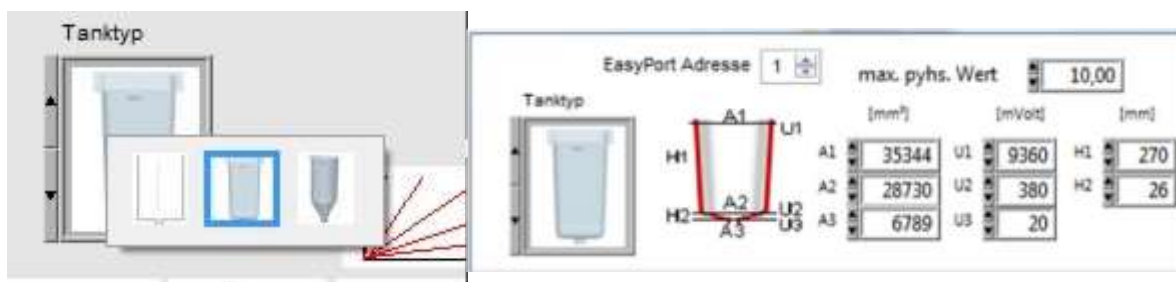
Rys. 2.8 Załączenie programu FluidLab Closed Loop

Tabela Opis głównych punktów programu FluidLab Closed Loop

Number	Function
1	Open the “Measuring and Control” window (not available in simulation mode)
2	Open the “Characteristics” window (not available in simulation mode)
3	Open the “Closed loop – 2 point” window
4	Open the “Closed loop - continuous” window
5	Initializing the EasyPort interface
6	“Open” button for loading existing FluidLab® PA closed-loop setup files.
7	“Save” button to create a new setup file or overwrite an existing one.
8	Show information
9	Language selection
10	Open the “Setup” window for setting up the FluidLab® PA closed-loop software.
11	Initialise communication to EasyPort

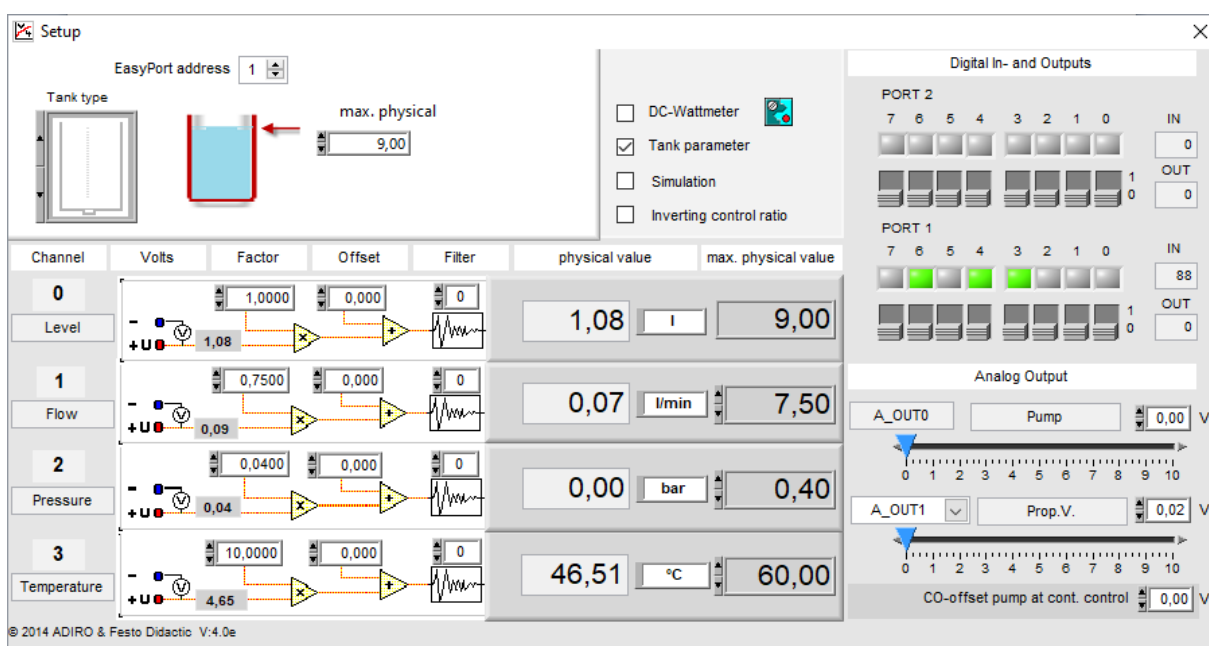
12	Version of FluidLab® PA
13	Display connected Easyport
14	License name

W punkcie Setup wybieramy właściwy zbiornik, w który jest wyposażone stanowisko, Rys. 2.9.



Rys. 2.9 Wybór zbiornika wody

Pozostałe parametry mogą być korygowane poprzez współczynnik Factor, Offset i Filter, aby wskazania odpowiadały wartościom rzeczywistym z układu, Rys. 2.10. Taki proces nazywamy kalibracją wskazań normalnie dostępną w programowaniu cyfrowym.

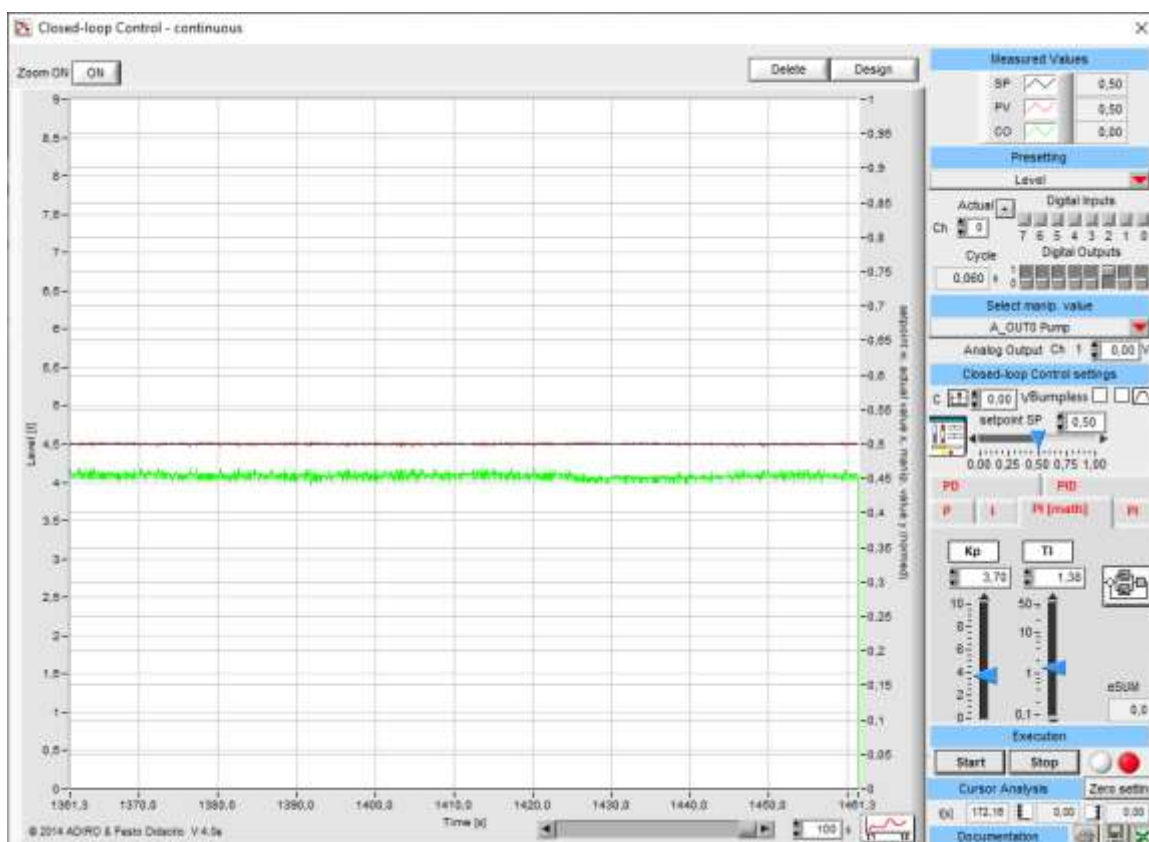


Rys. 2.10 Menu Setup programu

Tabela Parametry kalibracji wskazań

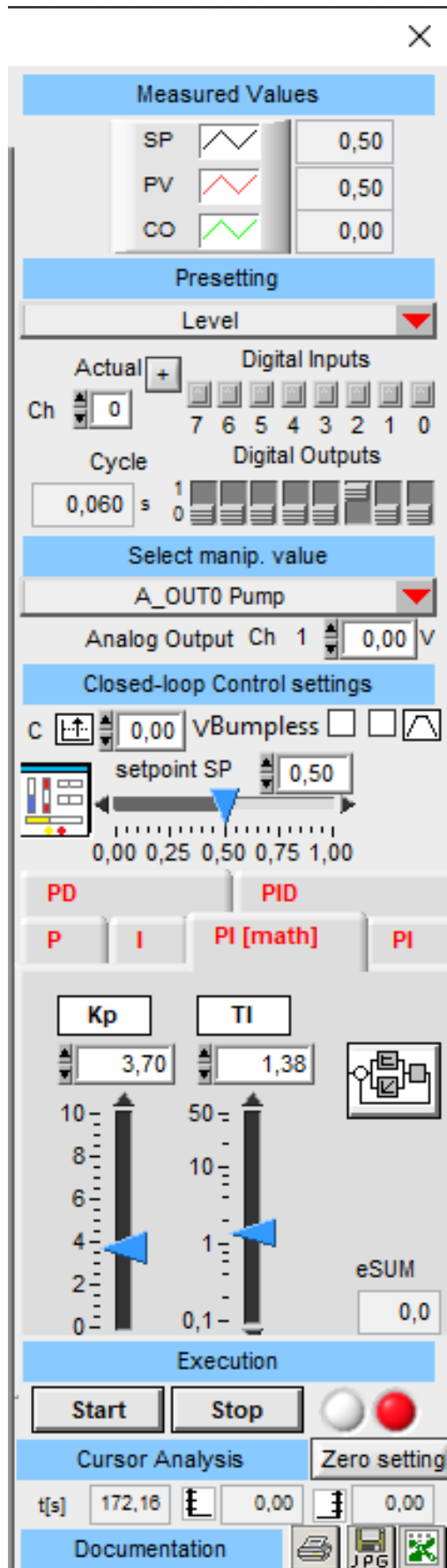
Component	Description
Channels	Analog input channels 0...3
Volts	Input voltage of EasyPort
Factor	Factor for multiplying the input voltage Standard value: 1
Offset	Zero offset factor Standard value: 0
Filter	For damping the input signal with gliding average, 0...90 measure cycles Standard value: 0
physical value	Indication of physical value
Einheitenfeld	Input field for physical unit
Max. physical value	Input field for maximum shown physical value for full scale

Po wstępnych czynnościach przechodzimy do właściwego punktu **Closed Loop Control - continuous**, czyli regulacji ciągłej PID.



Rys. 2.11 Okno sterowania programem do rejestracji sygnałów

Do operatora należy wybór parametrów.



SP – wartość zadana

PV – wielkość regulowana

CO – wielkość sterująca

Level – wybór sygnału regulowanego,
(poziom, przepływ, ciśnienie, temp)

Kanały cyfrowe pomiarowe, wejściowe od 0 do 7.

Kanały cyfrowe sterujące, wyjściowe od 0 do 7.

Nastawa sterowania pompą wody przy aktywnym kanale sterowna nr 2 (0 – 10V).

Nastawa sterowania wentylatorami chłodnic przy aktywnym kanale sterowania nr 5 (0 – 10V).

C – przesunięcie kanału wyjścia względem sygnału sterowania

Nastawa suwakowa wartości zadanej

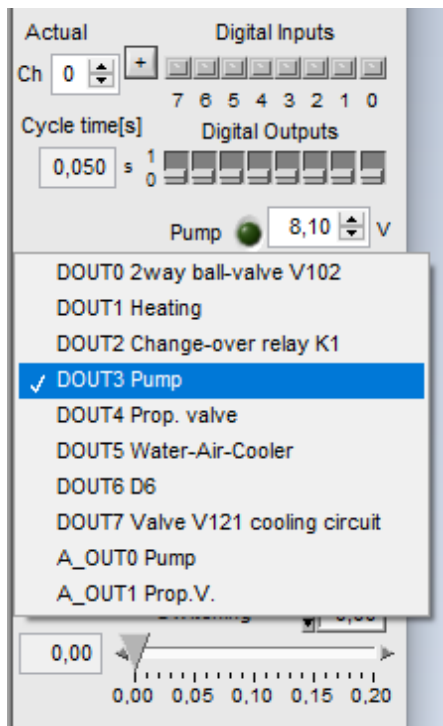
Wybór regulatora

Nastawa parametrów wybranego regulatora

Załączenie regulacji dwupołożeniowej

Wydruk lub zapis obrazu sygnału albo zapis danych do pliku

Rys. 2.12 Parametry sterowania programem



Rys. 2.13 Opis wejść/wyjść

Opis kanałów sterowania cyfrowego

0 – otwieranie zaworu pneumatycznego V102

1 – załączenie grzałki

2 – załączenie pompy wody z nastawioną mocą

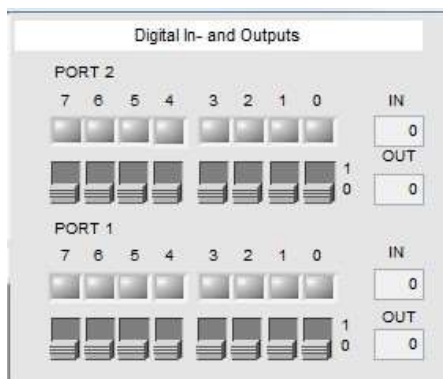
3 – załączenie pompy wody z pełną mocą

4 – otwieranie zaworu proporcjonalnego V106

5 – załączanie wentylatorów chłodniczych z nastawioną mocą

6 – nieużywany

7 – nieużywany



Opis kanałów pomiarowych, cyfrowych

0 – napełnienie zbiornika dolnego, sensor B102

1 – wskazanie pływaka zbiornika dolnego S111

2 – wskazanie pływaka zbiornika górnego S112

3 – wskazanie poziomego czujnika pojemnościowego zbiornika dolnego, górne B113

4 – wskazanie poziomego czujnika pojemnościowego zbiornika dolnego, dolne B114

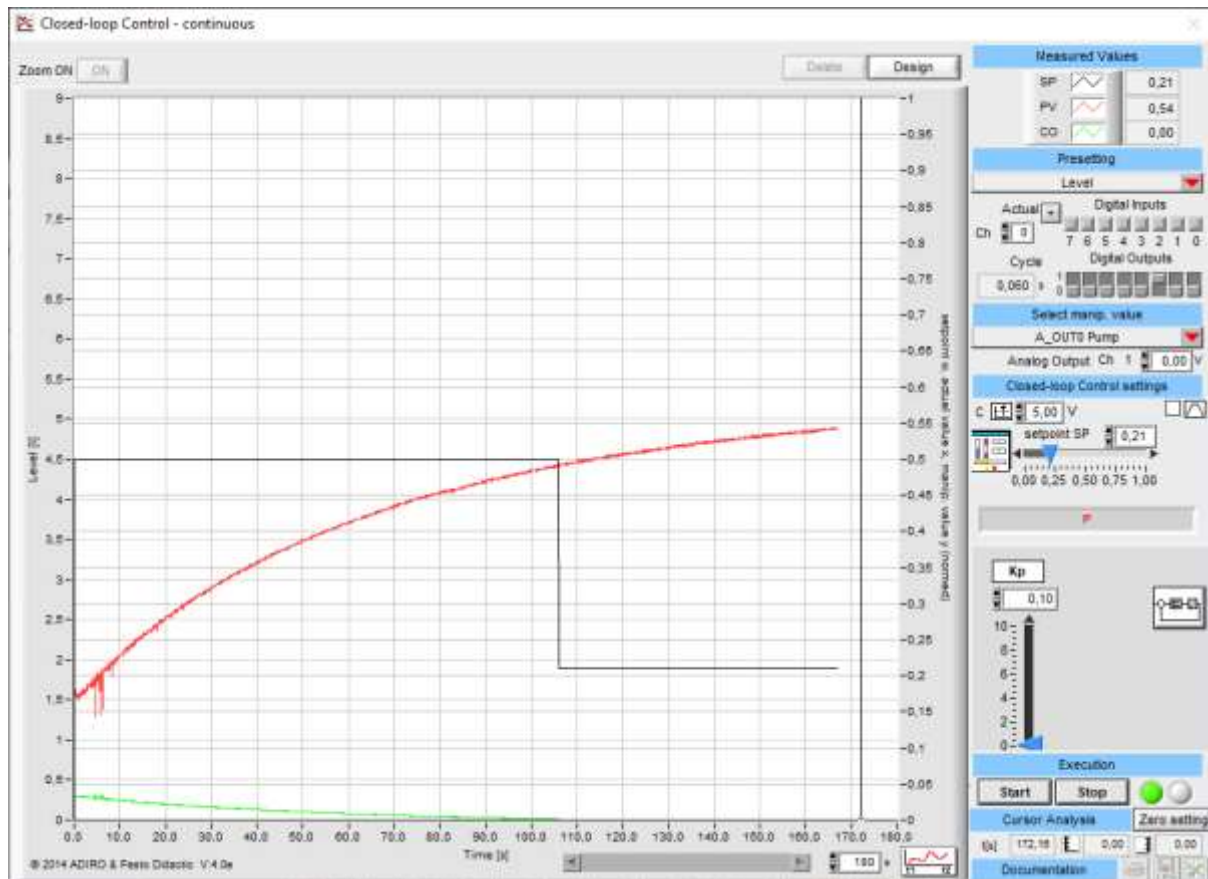
5 – pozycja zaworu pneumatycznego V102, zamknięty

6 – pozycja zaworu pneumatycznego V102, otwarty

7 – nieużywany

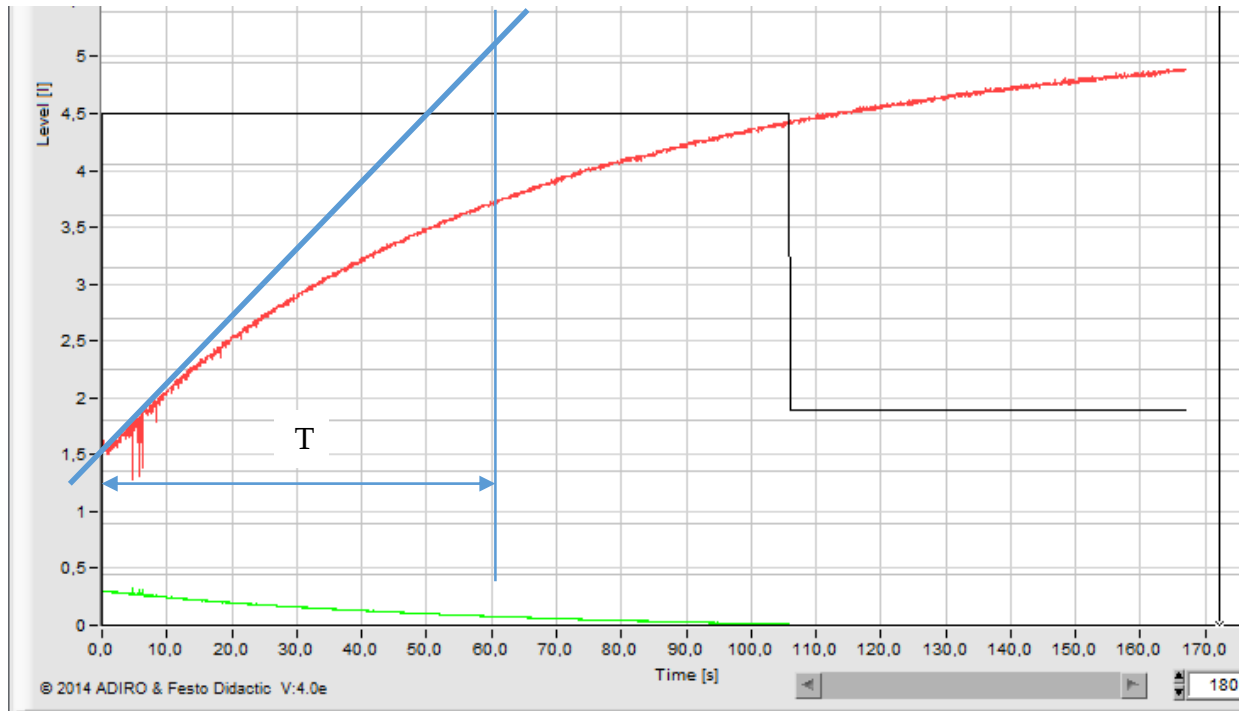
3. Regulacja ciągła PID

Układ sterowania poziomem wody według pomiarów wykazuje właściwości mieszane. Jest układem pierwszego rzędu, przy stałej wydajności pompy ma własności zbliżone do układu całkującego, ale sterowanie realizowane jest przez zmianę wydajności pompy co wprowadza zmienną akcję całkującą. Obiekt jest niesymetryczny i w celu wymuszenia regulacji włączony jest spływ wody do dolnego zbiornika. To również zmienia własności obiektu z całkującego na inercyjny pierwszego rzędu. Jeżeli wydajność pompy zrówna się z wartością odpływu to obiekt ma cechy układu inercyjnego pierwszego rzędu i symetryczny. Wskazane jest wybrać dany punkt jako punkt pracy, który oczekujemy w połowie zakresu regulacji. Rys. 3.1 przedstawia charakterystykę skokową naszego obiektu regulacji dla sygnału sterowania pompą 5V. Charakterystykę wykonano przy załączonym regulatorze P o bardzo małym wzmacnieniu równym 0.1 i włączonym przesunięciu sygnału sterowania 5V. Przy takich warunkach sygnał sterowania z regulatora spada do zera (linia zielona) co oznacza wyłączenie linii sprzężenia zwrotnego i brak regulacji na wartości zadanej.



Rys. 3.1 Parametry obiektu regulacji w wybranym punkcie pracy

Parametry obiektu regulacji przedstawiono na Rys. 3.2.

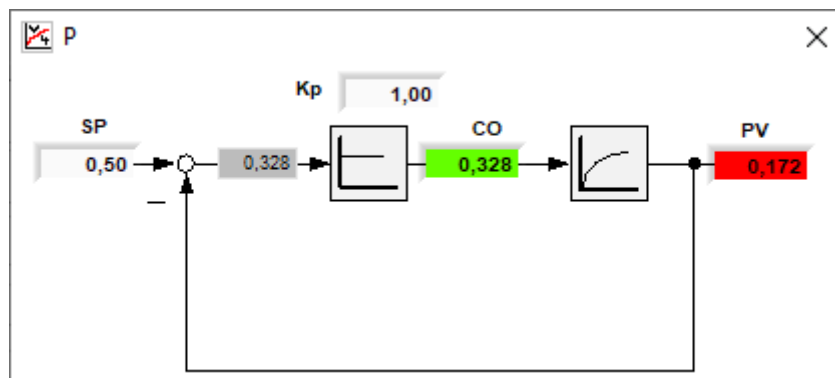


Rys. 3.2 Przybliżone parametry obiektu, $k = 1$, $T = 60\text{s}$, $\tau = 0$

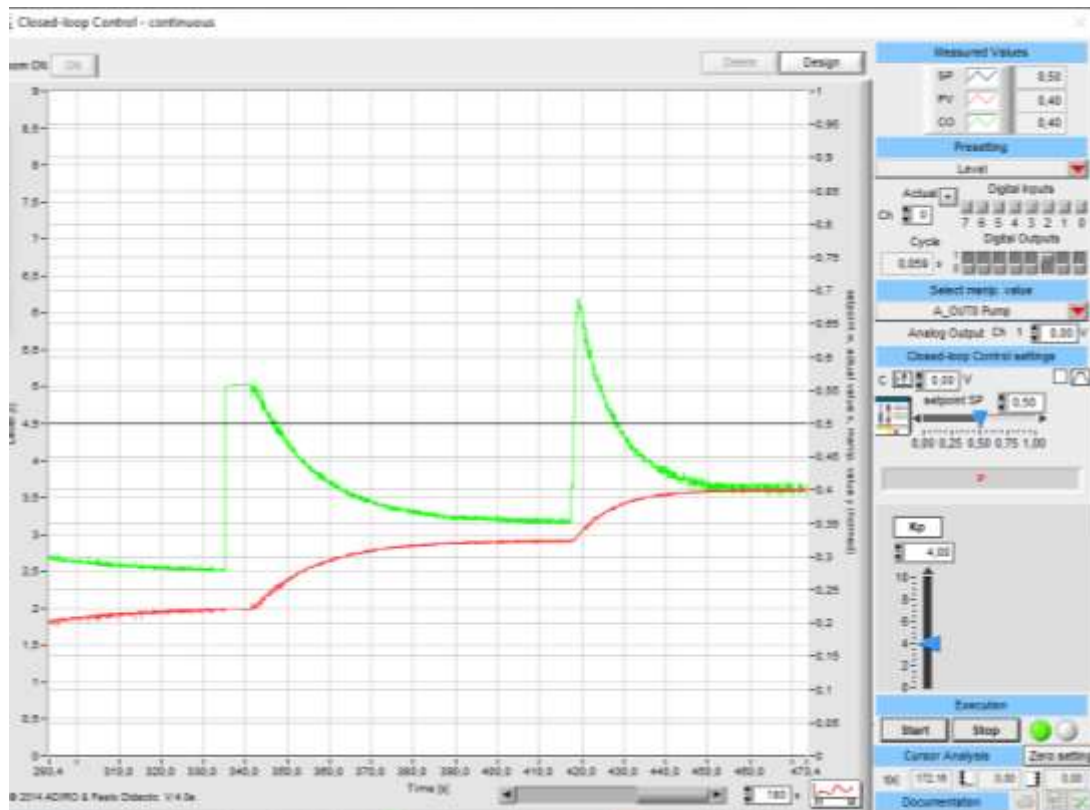
Z powodu zmienności parametrów danego obiektu dobór nastaw regulatora można robić metodą ‘prób i błędów’. Zarówno obiekt całkujący i inercyjny regulujemy regulatorem PID. Metody Zieglera-Nicholsa na danym obiekcie nie można zastosować z powodu układu pierwszego rzędu. Dołączenie regulatora tylko P nie wymusza oscylacji w układzie. Obiekt laboratoryjny nie wykazuje także opóźnień. Parametr ten występuje w pozostałych metodach strojenia regulatora PID.

3.1 Strojenie regulatora typu P

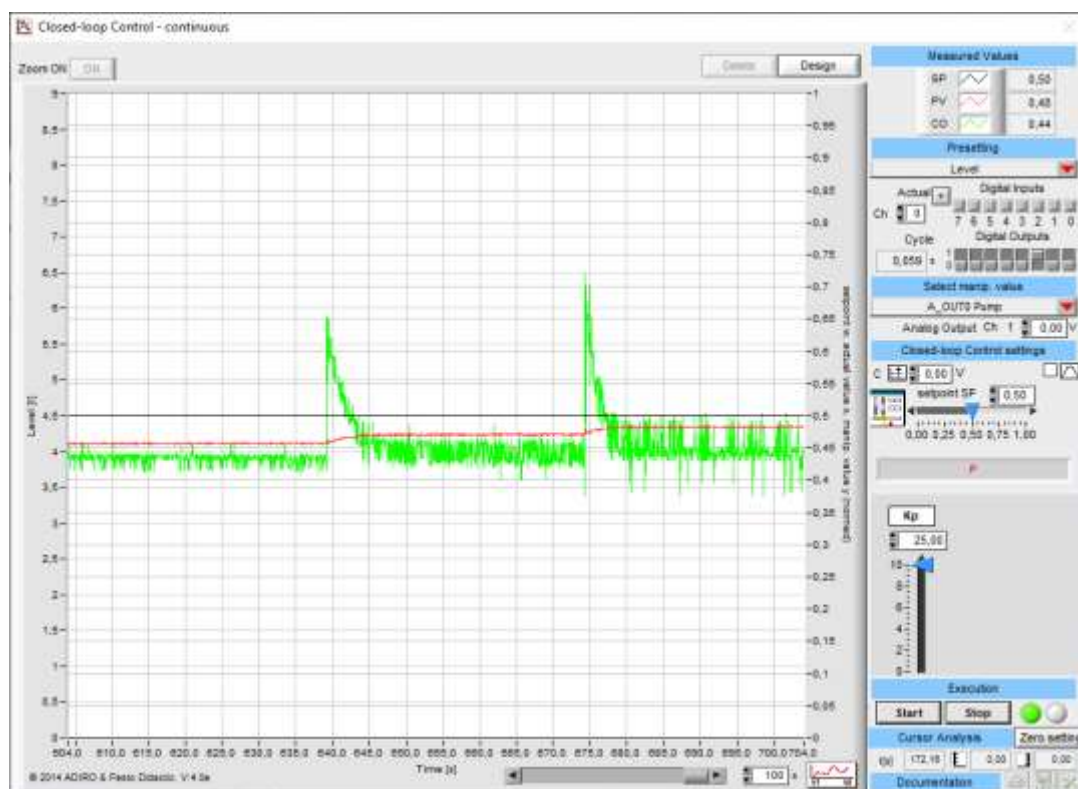
Efekty regulacji poziomu w zbiorniku tylko regulatorem P (Rys. 3.3) przedstawia Rys. 3.4 i Rys. 3.5. Układ regulacji zachowuje właściwości inercyjne. W układzie występuje uchyb statyczny, który maleje ze wzrostem wzmocnienia.



Rys. 3.3 Schemat układu regulacji z regulatorem P



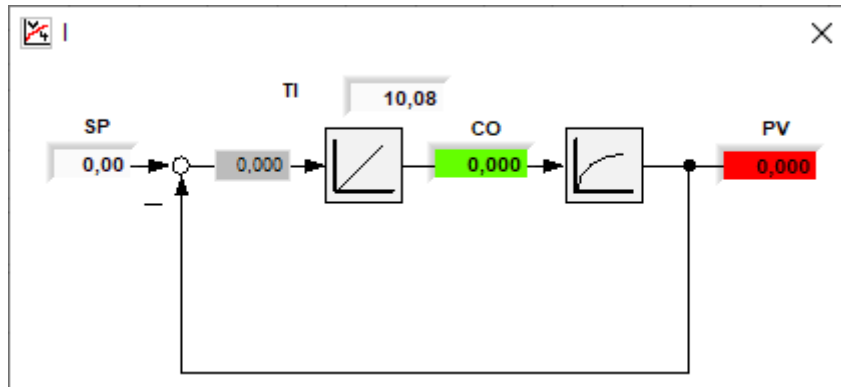
Rys. 3.4 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem P, wprowadzone wzmocnienie to $K_p = 1, 2, 4$



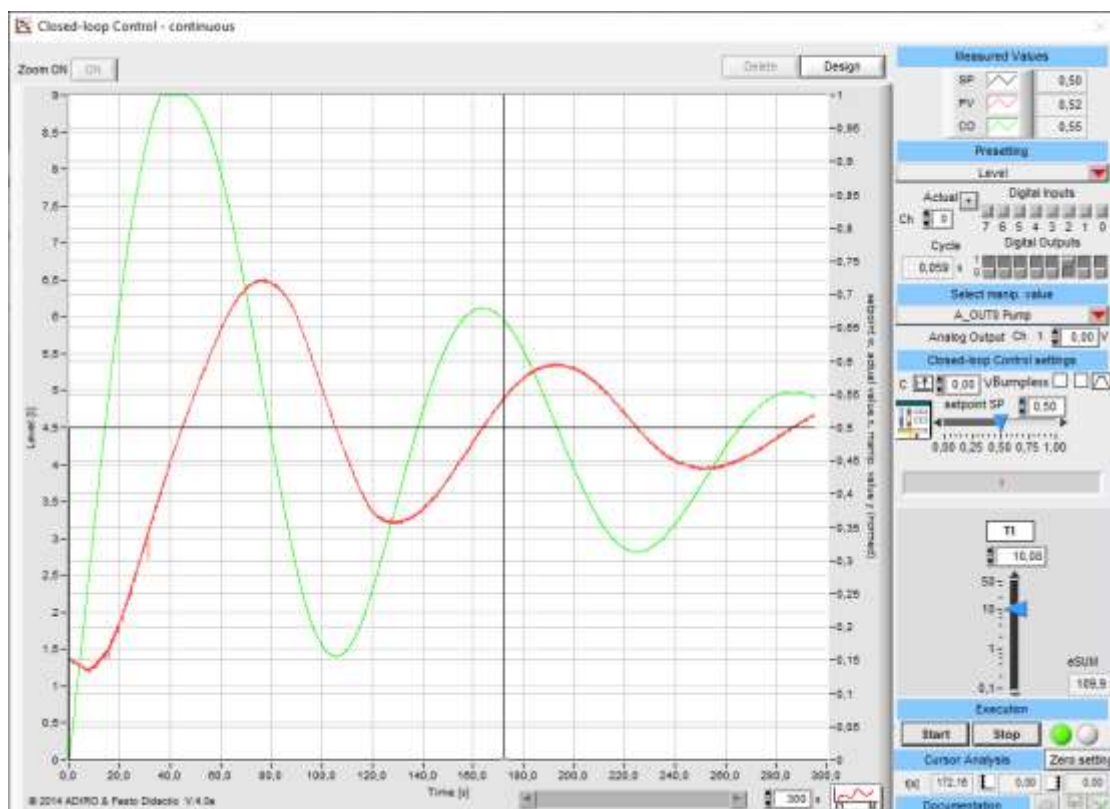
Rys. 3.5 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem P, wprowadzone wzmocnienie to $K_p = 10, 15, 25$

3.2 Strojenie regulatora typu I

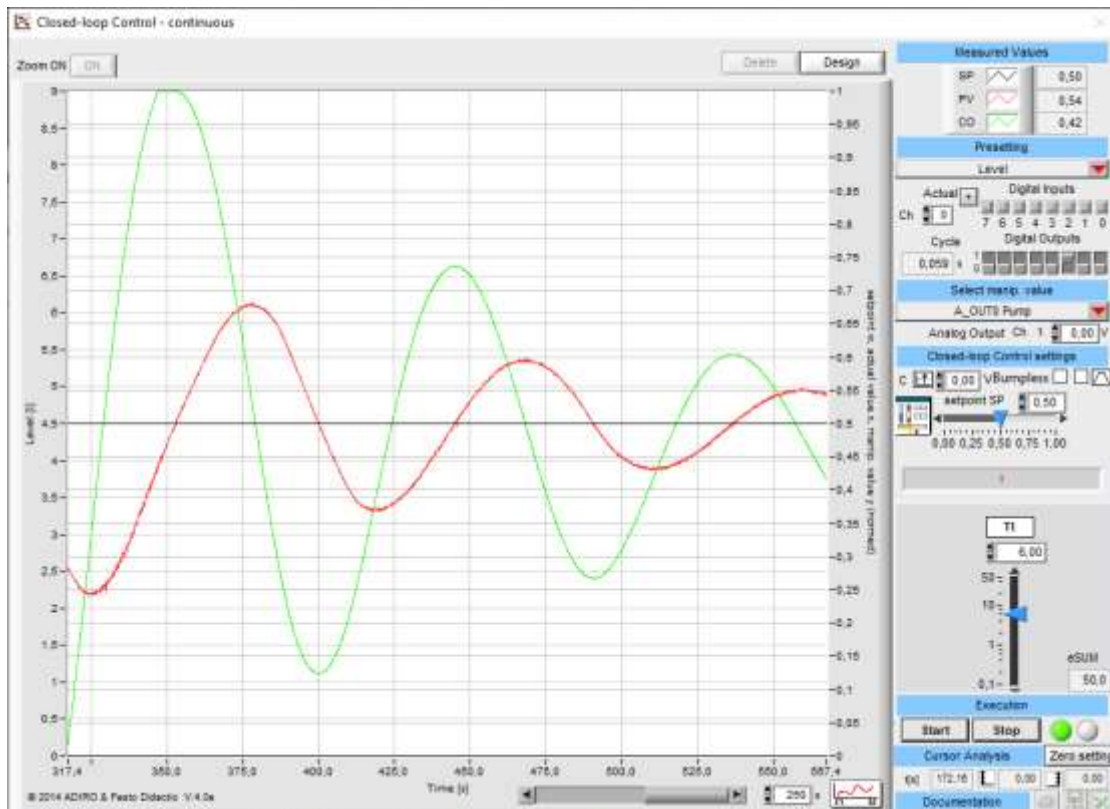
Efekty regulacji poziomu w zbiorniku tylko regulatorem I (Rys. 3.6) przedstawia Rys. 3.7 do Rys. 3.9. Układ regulacji zmienia właściwości na odpowiedź oscylacyjną, stopień układu wzrasta do rzędu drugiego w wyniku dołączenia członu całkującego regulatora. W układzie nie występuje uchyb statyczny, bez względu na wartość nastawy całkowania.



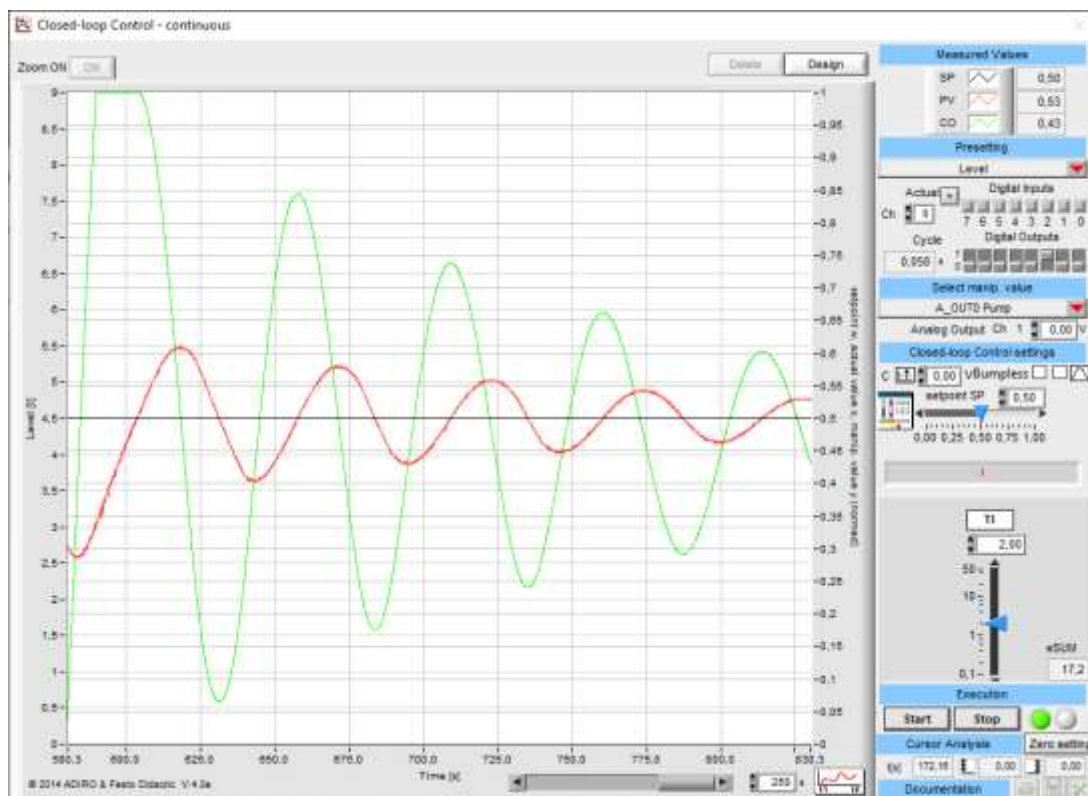
Rys. 3.6 Schemat układu regulacji z regulatorem I



Rys. 3.7 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem I, wprowadzone akcja całkująca $T_I = 10$, długi czas regulacji



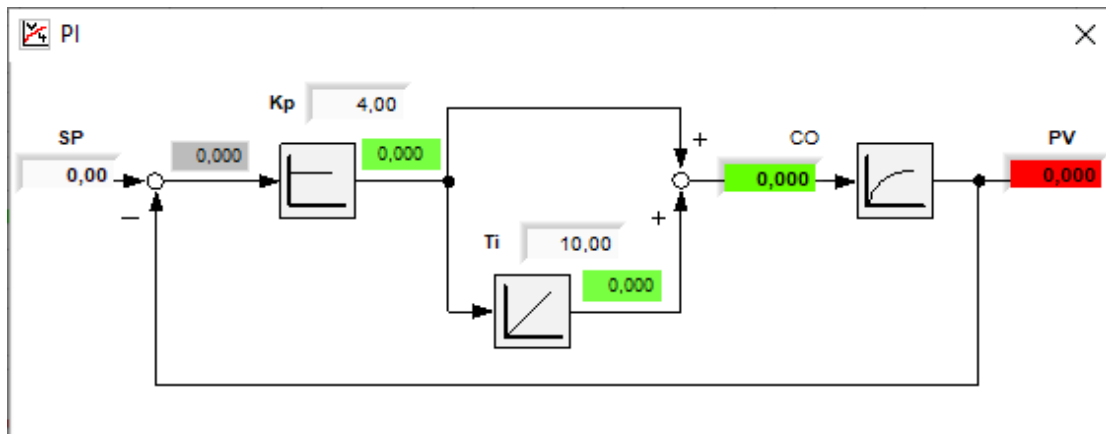
Rys. 3.8 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem I, wprowadzone akcja całkująca $T_I = 6$, długi czas regulacji



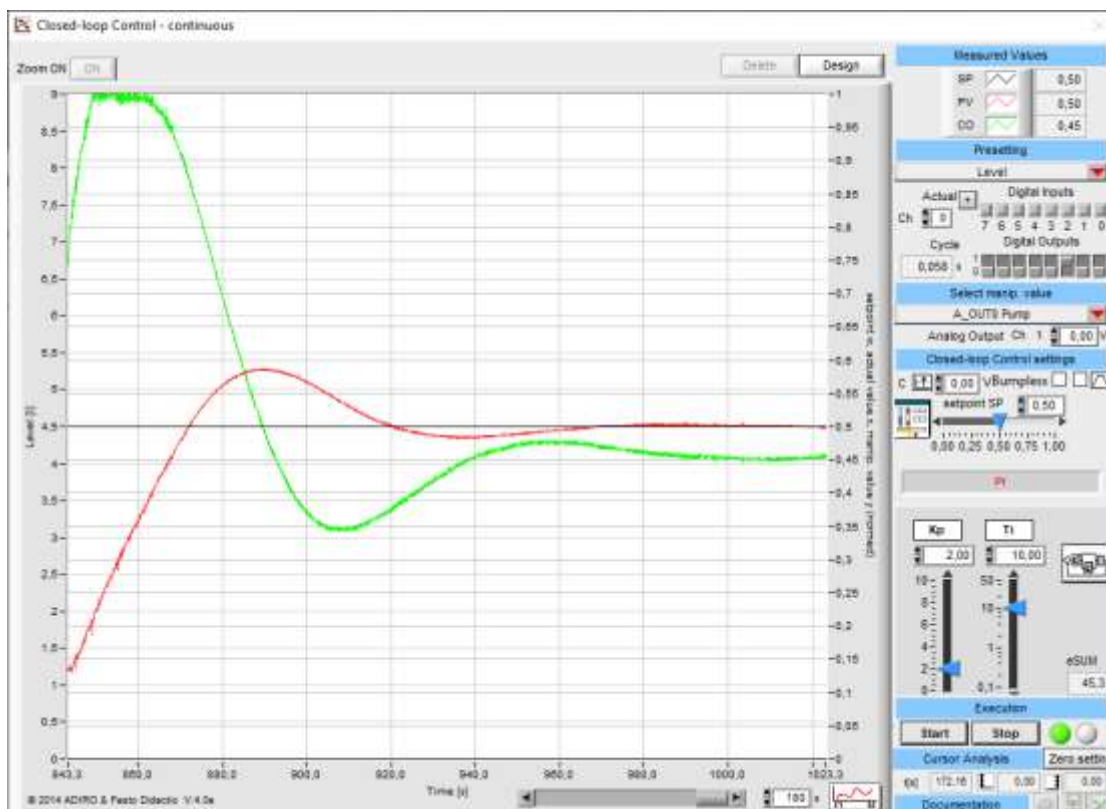
Rys. 3.9 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem I, wprowadzone akcja całkująca $T_I = 2$, długi czas regulacji

3.3 Strojenie regulatora typu PI

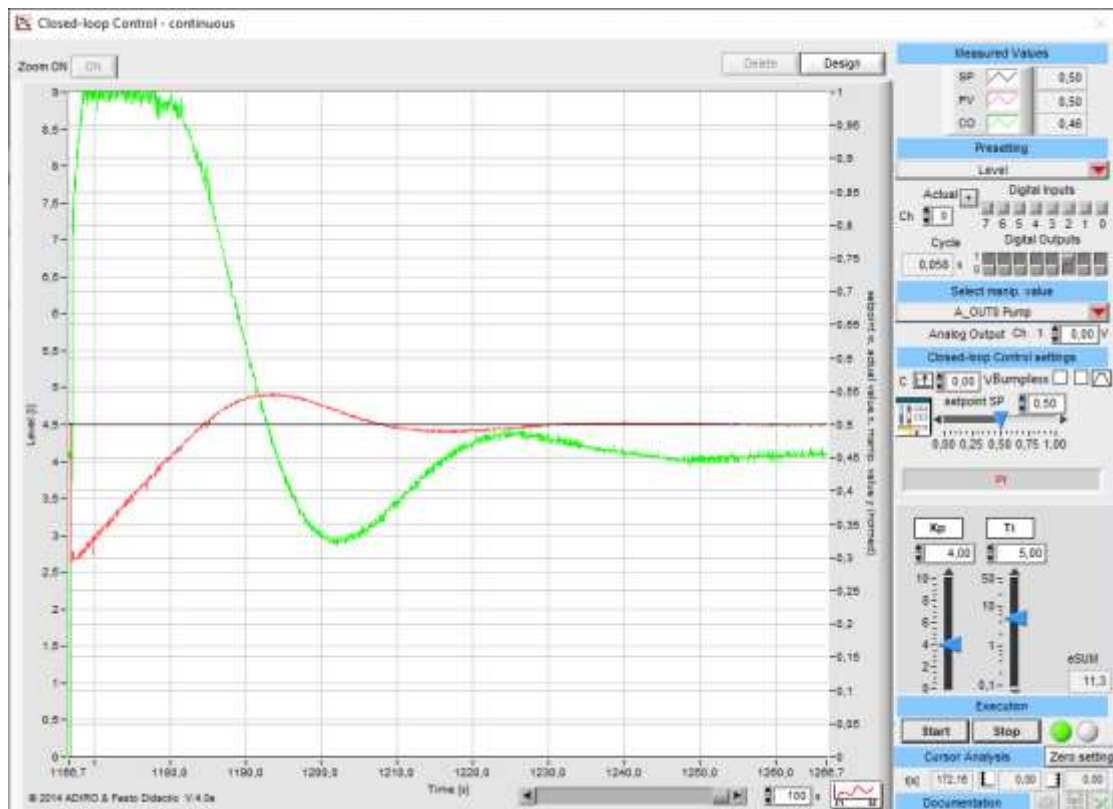
Efekty regulacji poziomu w zbiorniku regulatorem PI (Rys. 3.10) przedstawia Rys. 3.11 do Rys. 3.13. Układ regulacji zmienia właściwości na odpowiedź oscylacyjną, stopień układu wzrasta do rzędu drugiego w wyniku dołączenia członu całkującego regulatora. W układzie nie występuje uchyb statyczny, bez względu na wartość nastawy całkowania. Proces regulacji wyraźnie skraca się. Połączenie cech regulatora P oraz I daje dobre wyniki regulacji – przeregulowanie czas regulacji.



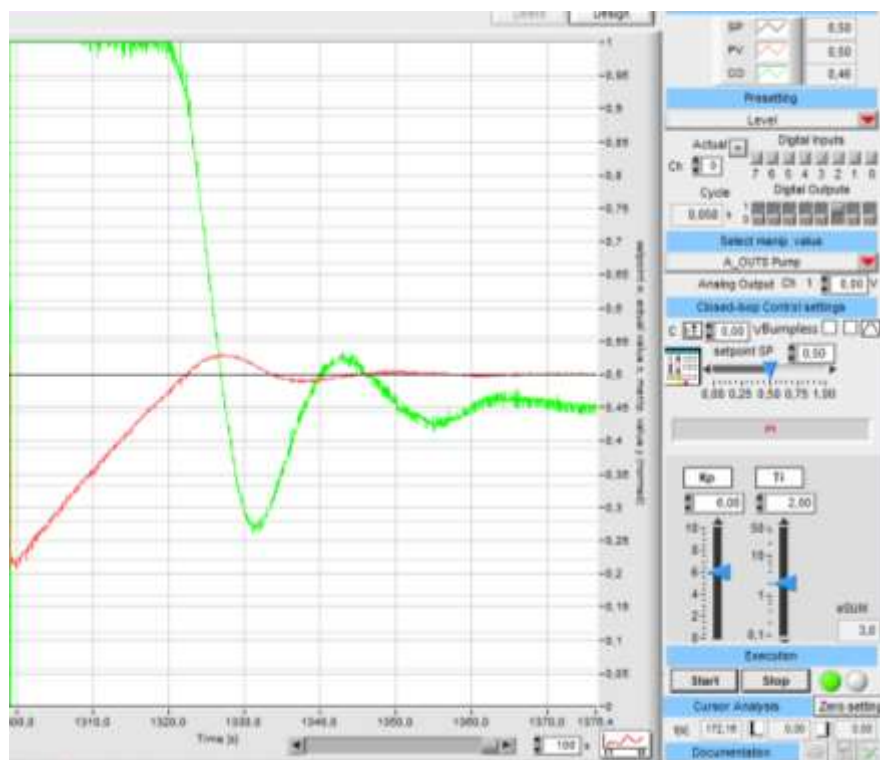
Rys. 3.10 Schemat układu regulacji z regulatorem PI



Rys. 3.11 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI, wprowadzone nastawy
wzmocnienie $K_P = 2$ całkowanie $T_I = 10$, czas regulacji krótki



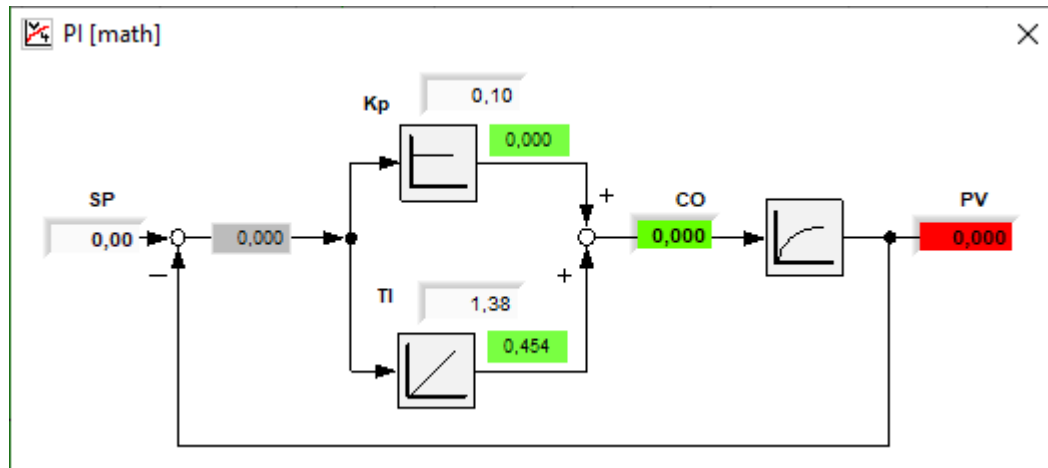
Rys. 3.12 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ całkowanie $T_I = 5$, czas regulacji krótki



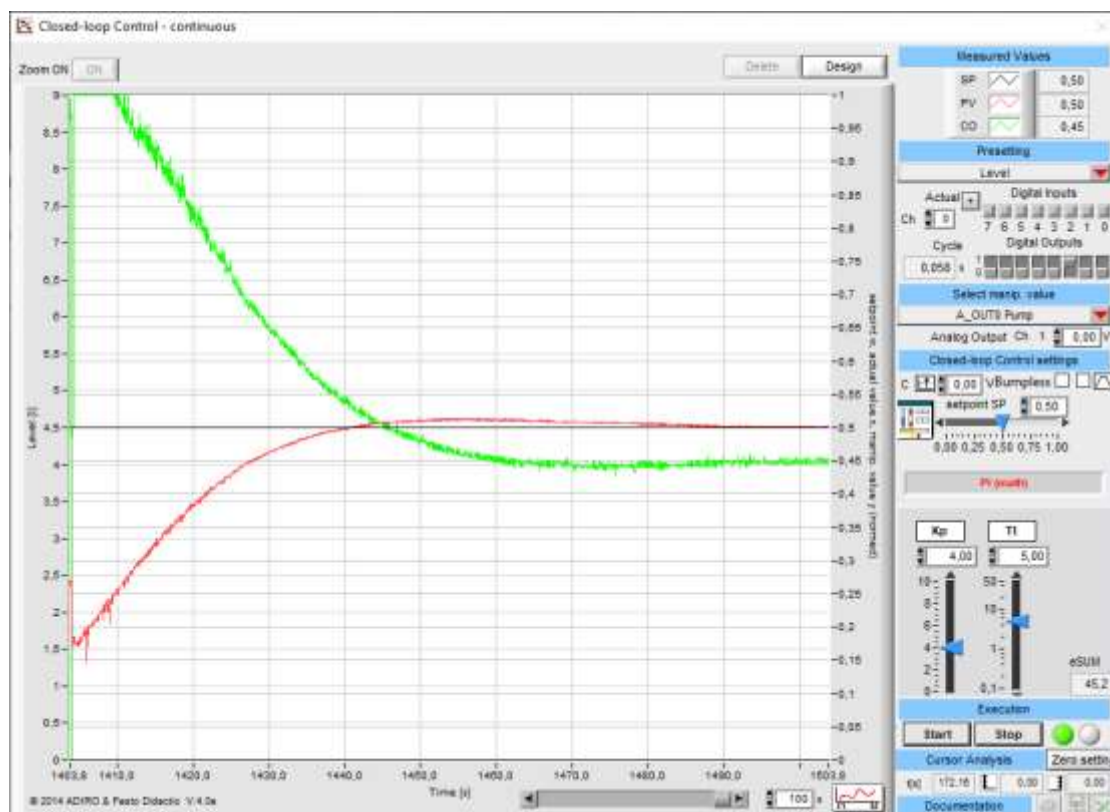
Rys. 3.13 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 6$ całkowanie $T_I = 2$, czas regulacji krótki

3.4 Strojenie regulatora typu PI math

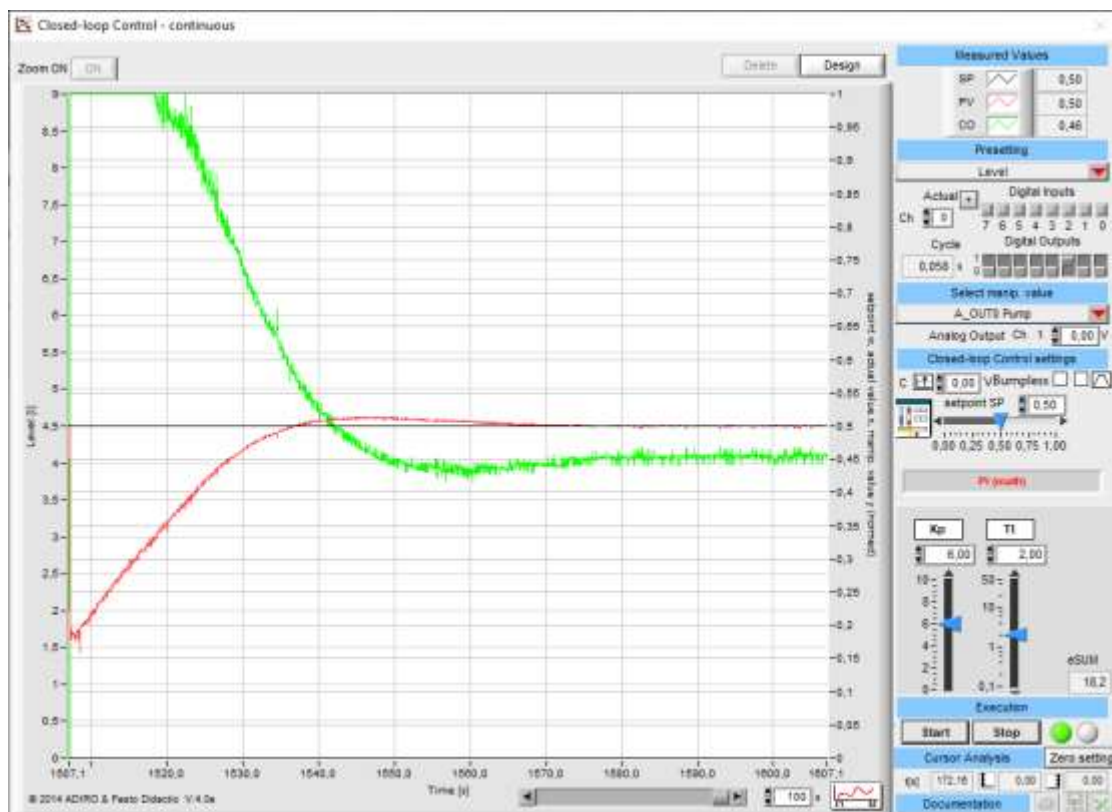
Wprowadzenie nastaw poprzednich z regulatora PI daje zmienione wyniki regulacji. Jest wersja regulatora stosowana w układach cyfrowych i daje nowe możliwości.



Rys. 3.14 Schemat układu regulacji z regulatorem PI math



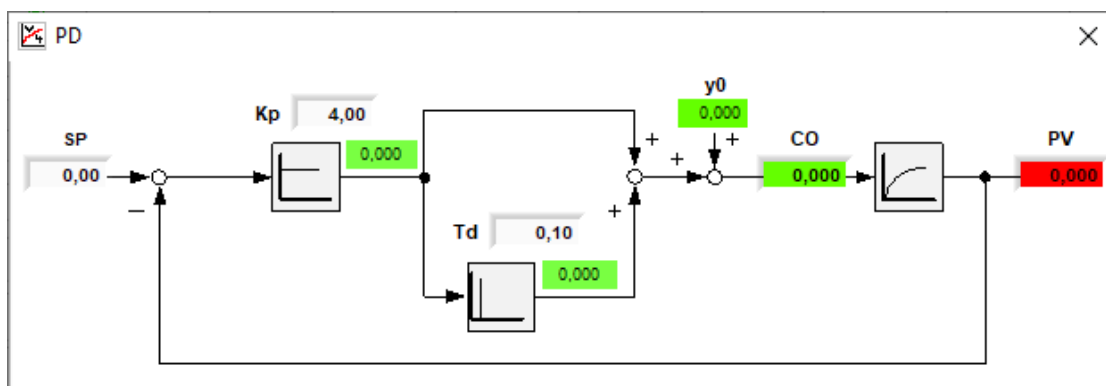
Rys. 3.15 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI math, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ całkowanie $T_I = 5$, czas regulacji krótki



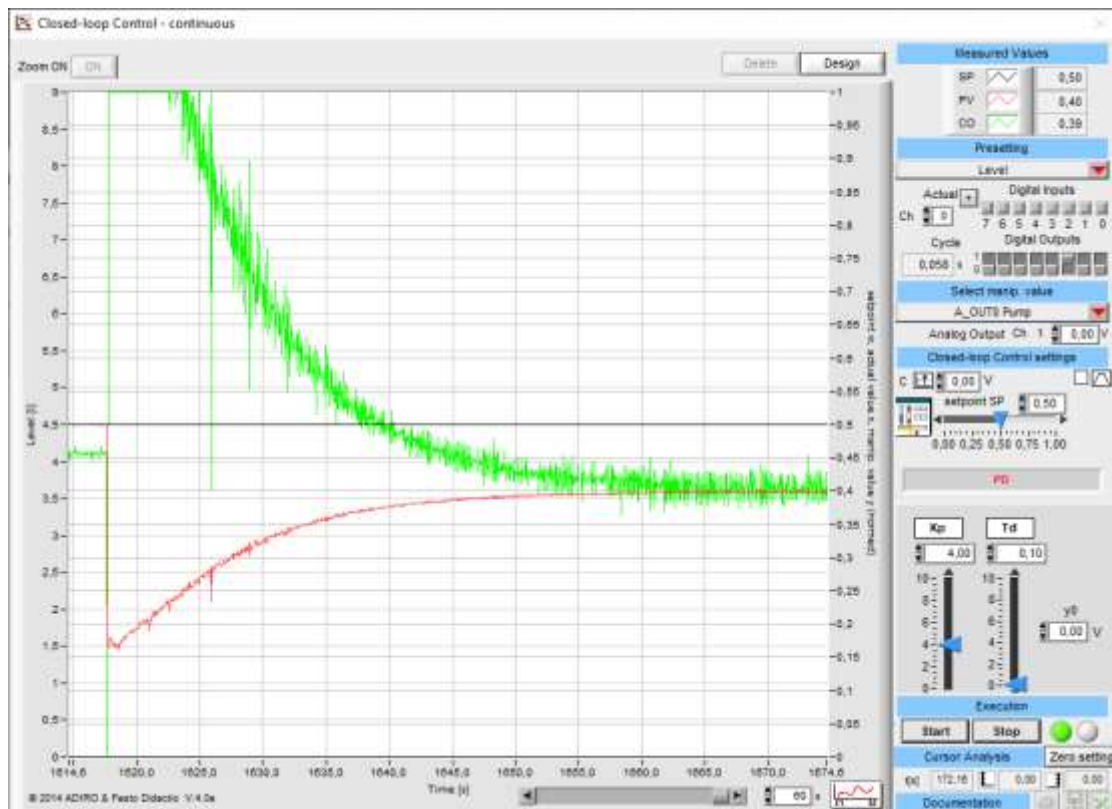
Rys. 3.16 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI math, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 6$ całkowanie $T_I = 2$, czas regulacji krótki

3.5 Strojenie regulatora typu PD

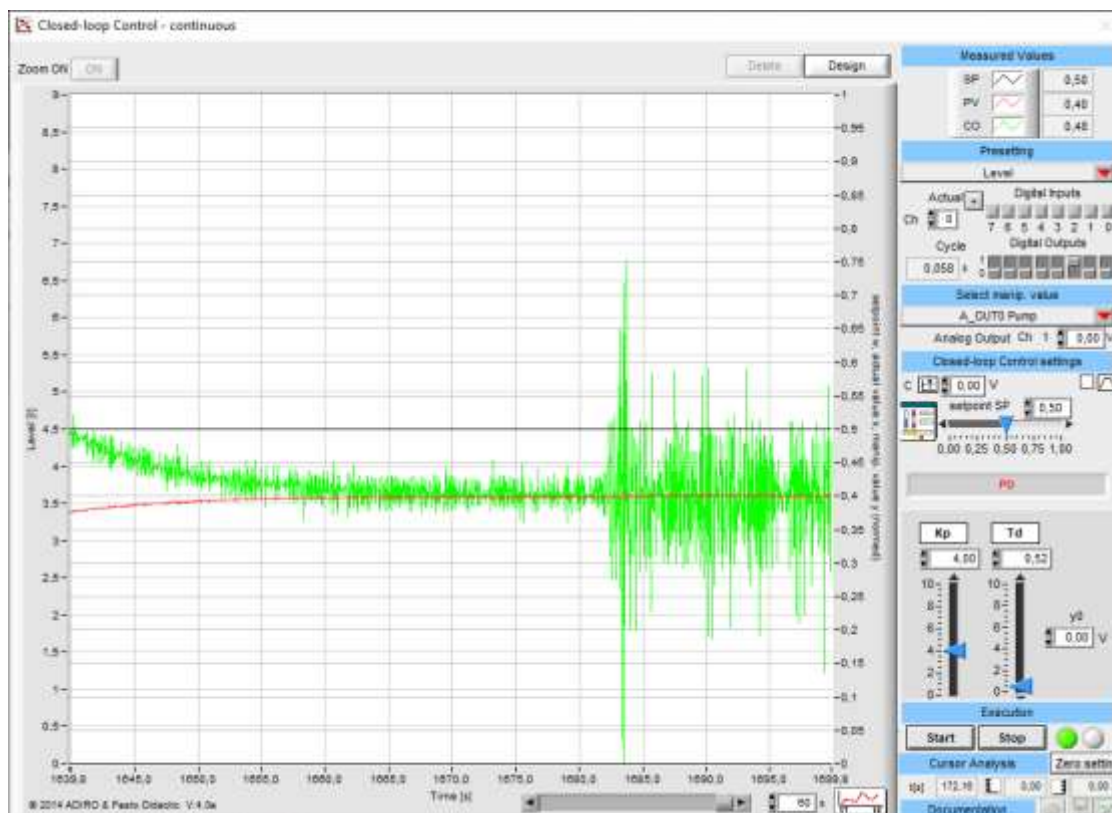
Efekty regulacji poziomu w zbiorniku regulatorem PD (Rys. 3.17) przedstawia Rys. 3.18 i Rys. 3.19. Różniczkowanie dla danego obiektu nie wprowadza poprawy jakości regulacji, wprowadza wzrost szumów w układzie.



Rys. 3.17 Schemat układu regulacji z regulatorem PD



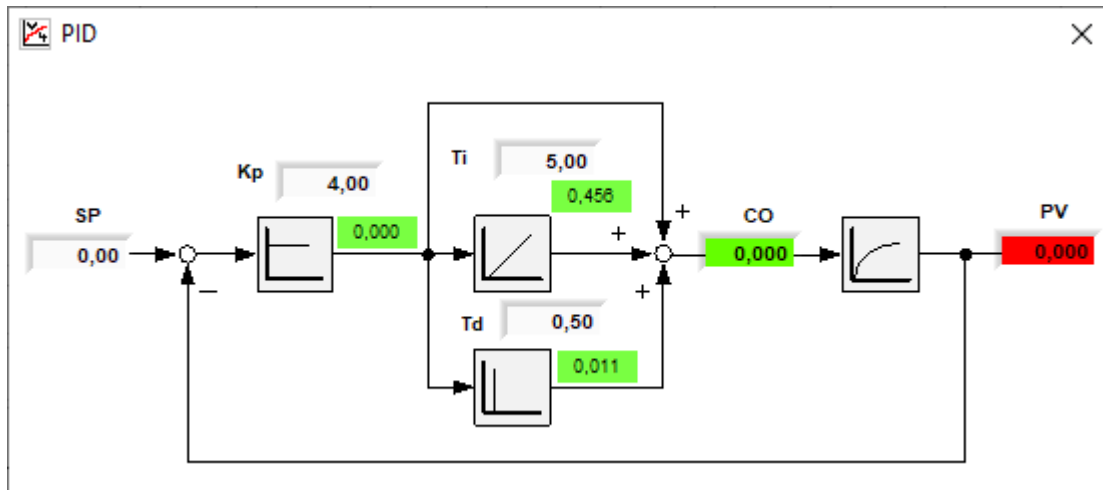
Rys. 3.18 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PD, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ różniczkowanie $T_D = 0.1$, widoczne szumy sygnału



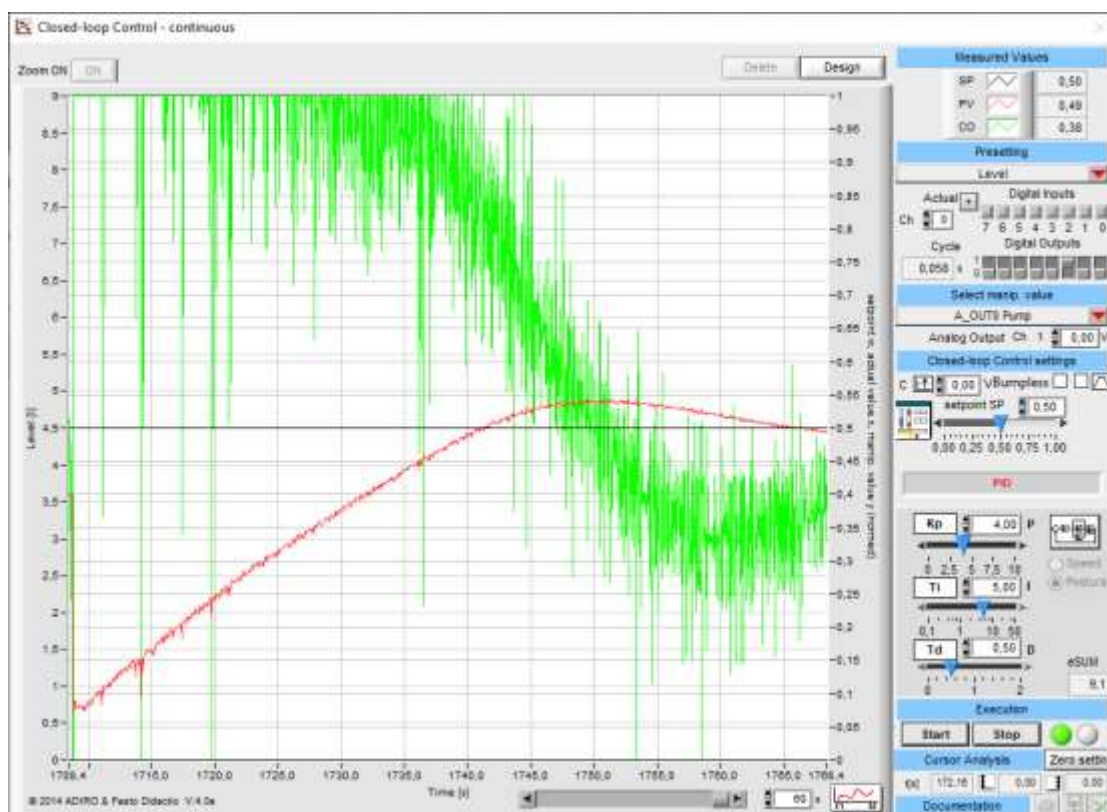
Rys. 3.19 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PD, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ różniczkowanie $T_D = 0.5$, silny wzrost szumów sygnału

3.6 Strojenie regulatora typu PID

Efekty regulacji poziomu w zbiorniku regulatorem PID (Rys. 3.20) przedstawia Rys. 3.21. Różniczkowanie dla danego obiektu nie wprowadza poprawy jakości regulacji, wprowadza silny wzrost szumów w układzie



Rys. 3.20 Schemat układu regulacji z regulatorem PID



Rys. 3.21 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PID, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_p = 4$, całkowanie $T_i = 5$ różniczkowanie $T_d = 0.5$, silny wzrost szumów sygnału

4. Przebieg ćwiczenia

- a) Włączyć zasilanie, sprawdzić wskazania moduł EasyPort,
- b) Połączyć stanowisko z komputerem,
- c) Załączyć program FluidLab Closed Loop i skonfigurować połączenie ze stanowiskiem,
- d) Zarejestrować charakterystyki regulacji ciągłej dla poziomu i wydrukować,
- e) Zarejestrować charakterystyki regulacji ciągłej dla temperatury i wydrukować,
- f) Dla każdego procesu opracować parametry regulacji ciągłej to jest przeregulowanie i czas regulacji,
- g) Parametry regulacji ciągłej porównać ze sobą, wybrać właściwy regulator i najlepsze nastawy wybranego regulatora
- h) Wykonać sprawozdanie z wnioskami.

Spis ilustracji

Rys. 2.1 Stanowisko modułowe układu zbiorników	22
Rys. 2.2 Schemat stanowiska modułowego układu zbiorników	23
Rys. 2.3 Pompa wody.....	24
Rys. 2.4 Zawór proporcjonalny	25
Rys. 2.5 Czujnik temperatury TP100	26
Rys. 2.6 Grzałka elektryczna.....	27
Rys. 2.7 Czujnik przepływu magneto-indukcyjny	29
Rys. 2.8 Załączenie programu FluidLab Closed Loop.....	31
Rys. 2.9 Wybór zbiornika wody.....	32
Rys. 2.10 Menu Setup programu.....	32
Rys. 2.11 Okno sterowania programem do rejestracji sygnałów	33
Rys. 2.12 Parametry sterowania programem	34
Rys. 2.13 Opis wejść/wyjść.....	35
Rys. 3.1 Parametry obiektu regulacji w wybranym punkcie pracy.....	36
Rys. 3.2 Przybliżone parametry obiektu, $k = 1$, $T = 60s$, $\tau = 0$	37
Rys. 3.3 Schemat układu regulacji z regulatorem P.....	37
Rys. 3.4 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem P, wprowadzone wzmocnienie to $K_P = 1, 2, 4$	38
Rys. 3.5 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem P, wprowadzone wzmocnienie to $K_P = 10, 15, 25$	38
Rys. 3.6 Schemat układu regulacji z regulatorem I.....	39
Rys. 3.7 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem I, wprowadzone akcja całkująca $T_I = 10$, długi czas regulacji	39
Rys. 3.8 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem I, wprowadzone akcja całkująca $T_I = 6$, długi czas regulacji	40
Rys. 3.9 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem I, wprowadzone akcja całkująca $T_I = 2$, długi czas regulacji	40
Rys. 3.10 Schemat układu regulacji z regulatorem PI	41
Rys. 3.11 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 2$ całkowanie $T_I = 10$, czas regulacji krótki	41
Rys. 3.12 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ całkowanie $T_I = 5$, czas regulacji krótki	42
Rys. 3.13 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 6$ całkowanie $T_I = 2$, czas regulacji krótki	42
Rys. 3.14 Schemat układu regulacji z regulatorem PI math	43
Rys. 3.15 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI math, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ całkowanie $T_I = 5$, czas regulacji krótki	43
Rys. 3.16 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PI math, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 6$ całkowanie $T_I = 2$, czas regulacji krótki	44
Rys. 3.17 Schemat układu regulacji z regulatorem PD.....	44
Rys. 3.18 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PD, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ różniczkowanie $T_D = 0.1$, widoczne szumy sygnału	45
Rys. 3.19 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PD, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$ różniczkowanie $T_D = 0.5$, silny wzrost szumów sygnału	45
Rys. 3.20 Schemat układu regulacji z regulatorem PID.....	46
Rys. 3.21 Regulacja poziomu w zbiorniku regulatorem PID, wprowadzone nastawy wzmocnienie $K_P = 4$, całkowanie $T_I = 5$ różniczkowanie $T_D = 0.5$, silny wzrost szumów sygnału.....	46