
T8 – Badanie własności układu regulacji
z regulatorami: P, PI, PID

1. Wstęp teoretyczny i zakres ćwiczenia laboratoryjnego

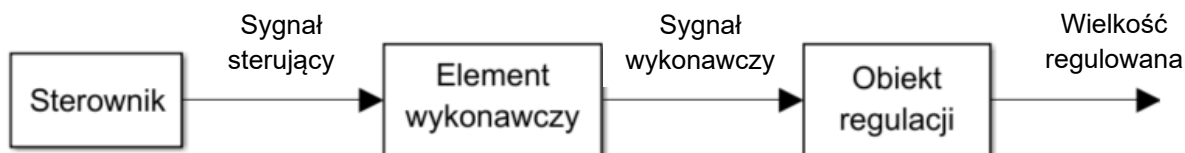
1.1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z metodami regulacji ciągłej oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych układów automatycznej regulacji wykorzystujących regulatory typu P, PI, PID oraz dobranie optymalnych parametrów regulacji dla zadanego obiektu sterowania.

1.2 Układy sterowania

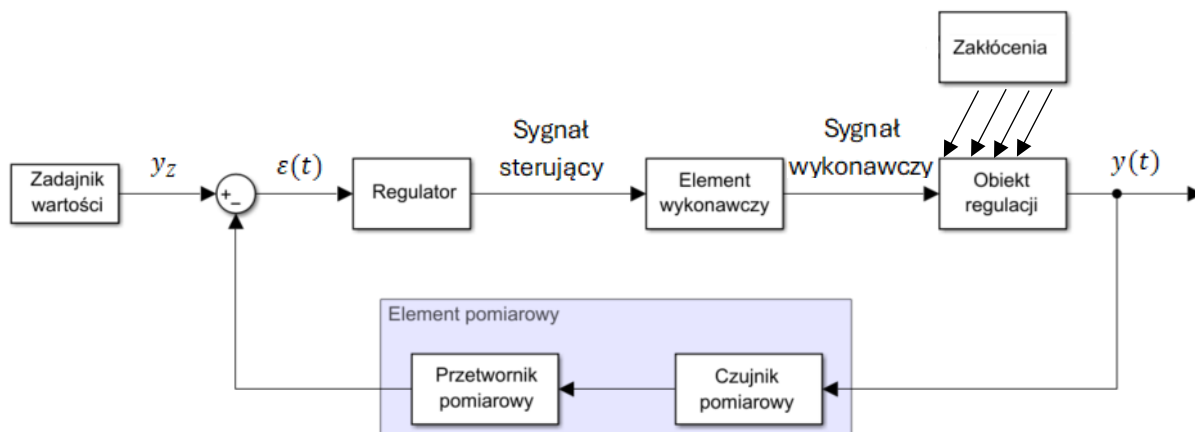
W najprostszym ujęciu celem procesu i układu regulacji jest to, aby ustalić oczekiwaną wartość danej wielkości fizyko-chemicznej (tzw. wielkości sterowanej), która jest generowana przez dany obiekt regulacji (np. układ, proces technologiczny, urządzenie). W szerszym ujęciu w zależności od uwarunkowań technicznych i charakteru wielkości sterowanej oczekuje się, aby proces regulacji spełniał inne wymagania np. żeby nie dopuścić do przeregulowania, zminimalizować czas regulacji, żeby wartość wielkości sterowanej oscylowała w określonym przedziale itd. – czyli innymi słowy, by parametry opisujące sterowanie spełniały określone kryteria.

Najprostszym układem sterowania jest tzw. „układ otwarty” (Rys. 1), w którym element wykonawczy przeprowadza operację na obiekcie regulacji w celu ustalenia konkretnej wartości wielkości regulowanej. Jego wadą jest to, że nie uwzględnia on wpływu zakłóceń na obiekt, które mogą pochodzić np. z otoczenia. Układ ten nie uwzględnia też aktualnej wartości wielkości sterowanej. Przykładem takiego rozwiązania jest układ odpowiadający za regulowanie wysokości rolet. Po naciśnięciu odpowiedniego przycisku „ruch w górę” lub „ruch w dół” wysyłany jest sygnał sterujący w postaci napięcia elektrycznego na mały silnik elektryczny, który swoim ruchem obrotowym (sygnałem wykonawczym) powoduje ruch rolet w odpowiednim kierunku.



Rys. 1. Układ sterowania „otwarty” - bez sprzężenia zwrotnego.

Układem, który uwzględnia aktualną wartość wielkości regulowanej, jest układ z zamkniętą ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego (Rys. 2). Nazywamy go **układem automatycznej regulacji – w skrócie UAR**. Każdy rzeczywisty układ sterowania, który bierze pod uwagę tę wartość można sprowadzić do tej postaci. Przy odpowiednim doborze regulatora i jego nastaw UAR jest w stanie kompensować wpływ zakłóceń oddziałujących na obiekt regulacji.



Rys. 2. Układ automatycznej regulacji z zamkniętą ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego (UAR).

Sygnał poddawany na wejście regulatora stanowi różnicę pomiędzy **wartością zadaną y_z** i wartością aktualną sygnału na wyjściu obiektu (**wielkością regulowaną $y(t)$**) i jest nazywany **uchybem regulacji $\varepsilon(t)$**

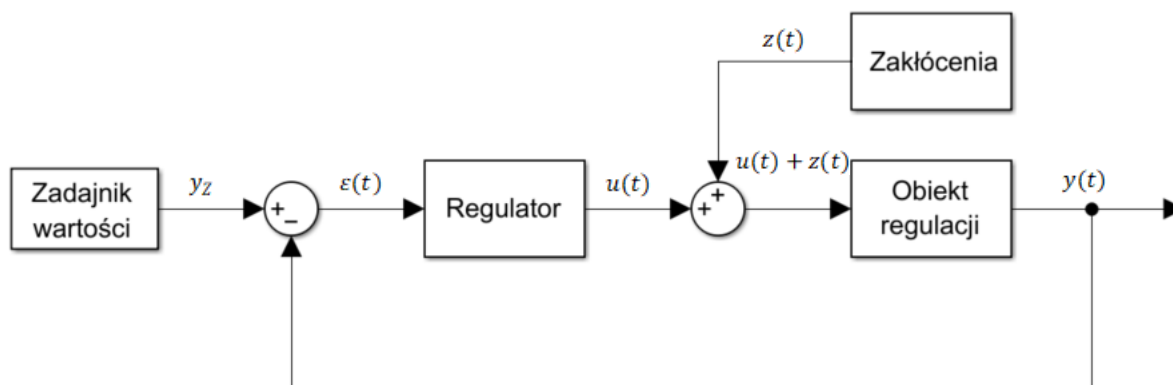
$$\varepsilon(t) \stackrel{\text{def}}{=} y_z - y(t)$$

Parametr ten bywa nazywany również **odchyłką regulacji**. Należy zwrócić uwagę, że wartość tak zdefiniowanego uchybu będzie ujemna, gdy wartość wielkości sterowanej będzie wyższa od zadanej. Natomiast będzie dodatnia gdy wartość na wyjściu obiektu będzie od niej mniejsza.

Sygnałem wyjściowym z regulatora jest najczęściej napięcie elektryczne. W jego miejsce w zależności od typu regulacji umieszczamy odpowiednio regulator dwupołożeniowy lub trójpokożeniowy lub regulator o pracy ciągłej.

Jeżeli rozważymy UAR, który odpowiada za regulację temperatury w piecu gazowym, to elementem wykonawczym będzie zawór w rurociągu dostarczającym paliwo do procesu spalania, którego przesunięcie (i strumień gazu) zależy od aktualnego wyjścia z regulatora. Przykładem zakłóceń mogą być niekontrolowane zmiany ciśnienia gazu w tym rurociągu.

Tworząc podstawowy model symulacji regulacji w środowisku Matlab/Simulink nie ma konieczności uwzględniania elementów wykonawczego i pomiarowego – zatem schemat na Rys. 2 ulega jeszcze większemu uproszczeniu. Jeżeli natomiast analizie ma zostać poddany wpływ zakłóceń, to przy założeniu (upraszczającym) addytywnego oddziaływania zakłóceń na obiekt regulacji model symulacyjny wygląda następująco (Rys. 3):



Rys. 3. Ideowy schemat blokowy modelu symulacji układu regulacji automatycznej, który uwzględnia zakłócenia oddziałujące na obiekt sterowania.

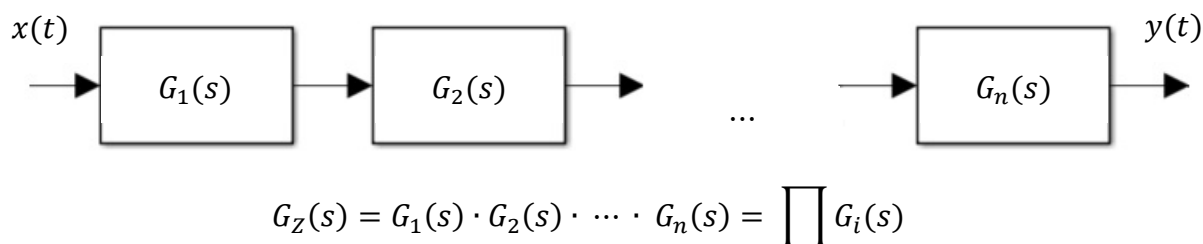
Niekiedy przyjmuje się jednak addytywny wpływ zakłóceń na wielkość sterowaną (tzn.: $y(t) + z(t)$) – niemniej jest to uzależnione od charakteru ich i wielkości sterowanej.

Podczas tworzenia modelu symulacji należy zdefiniować ograniczenie wartości sygnału pochodzącego z regulatora, które w praktyce zależy od uwarunkowań technicznych. (np. wynika to z maksymalnego dopuszczalnego napięcia, jakie można poddać na wejście obiektu). W Simulinku bloki odpowiadające regulatorom (np. „Relay” dla regulatora dwupołożeniowego, „PID Controller” dla regulacji ciągłej) mają możliwość wprowadzenia wartości tych ograniczeń. Niemniej można to również zrealizować poprzez blok „Saturation”.

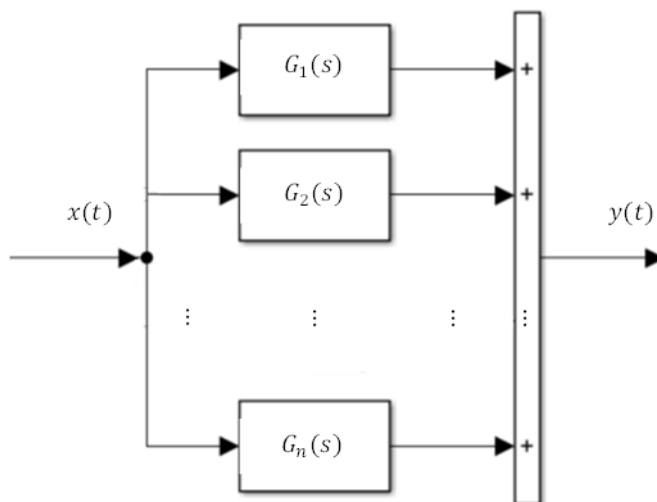
1.3 Obiekty regulacji

Podczas niniejszego kursu laboratoryjnego poruszono już tematykę podstawowych członów (elementów) automatyki, z których każdy jest opisany odpowiednim równaniem transmitancji operatorowej $G(s)$. Dany obiekt, który ma zostać poddany regulacji automatycznej, można przedstawić jako jeden z nich lub jako złożenie kilku członów – np. jako połączenie szeregowe lub równoległe. Tak utworzony model obiektu regulacji powinien w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlać dynamikę tego układu, a symulacja jego odpowiedzi skokowej powinna jak najbardziej pokrywać się z jego charakterystyką eksperymentalną, aby otrzymać możliwie jak najlepsze dopasowanie. Poniżej przedstawiono, jak wyznaczyć zastępczą transmitancję operatorową połączenia szeregowego i połączenia równoległego.

a) Zastępcza transmitancja operatorowa dla połączenia szeregowego:



b) Zastępcza transmitancja operatorowa dla połączenia równoległego



$$G_Z(s) = G_1(s) + G_2(s) + \dots + G_n(s) = \sum G_i(s)$$

Większość obiektów regulacji możemy przedstawić poprzez przyporządkowanie jednego z poniższych modeli:

- a) **Szeregowe połączenie członu inercyjnego I-go rzędu i członu opóźniającego**, którego transmitancja zastępcza wyraża się wzorem $G = \frac{k}{Ts+1} e^{-sT_0}$
- b) **Szeregowe połączenie członu całkującego, proporcjonalnego i opóźniającego**, którego transmitancja zastępcza wyraża się wzorem $G = k \frac{1}{s} e^{-sT_0} = \frac{1}{Ts} e^{-sT_0}$; $k = \frac{1}{T}$

Należy zaznaczyć, że większości obiektom rzeczywistym odpowiadają człony inercyjne wyższych rzędów, które aproksymuje się poprzez człon inercyjny I rzędu z opóźnieniem.

Wartości parametrów dynamicznych obiektów regulacji scharakteryzowanych poprzez stałą czasową T oraz czas opóźnienia T_0 wpływają na dobór metody regulacji – tabela poniżej.

Tabela 1. Dobór metody regulacji w zależności od stosunku czasu martwego do stałej czasowej obiektu.

Metoda regulacji	Warunek
Regulacja dwupołożeniowa	$\frac{T_0}{T} < 0.2$
Regulacja ciągła	$0.2 < \frac{T_0}{T} < 1$
Regulacja krokowo-impulsowa	$\frac{T_0}{T} > 1$

1.4 Regulacja ciągła. Regulatory P, PI, PD oraz PID

W przypadku regulacji dwustanowej na wyjściu regulatora obserwuje się tylko dwa stany, a każdemu z nich odpowiada konkretna wartość sygnału sterującego, zatem wartości te zmieniają się w sposób dyskretny. Natomiast w przypadku regulacji ciągłej – jak nazwa wskazuje – zmieniają się jak funkcja ciągła, zatem sygnał sterujący może przyjmować wartości pośrednie pomiędzy ustalonym minimum i maksimum. To jak zmieniać się będzie sygnał sterujący zależy z jednej strony od wartości uchybu regulacji, a z drugiej zaś od sposobu jego przetwarzania przez regulator – czyli od typu regulatora.

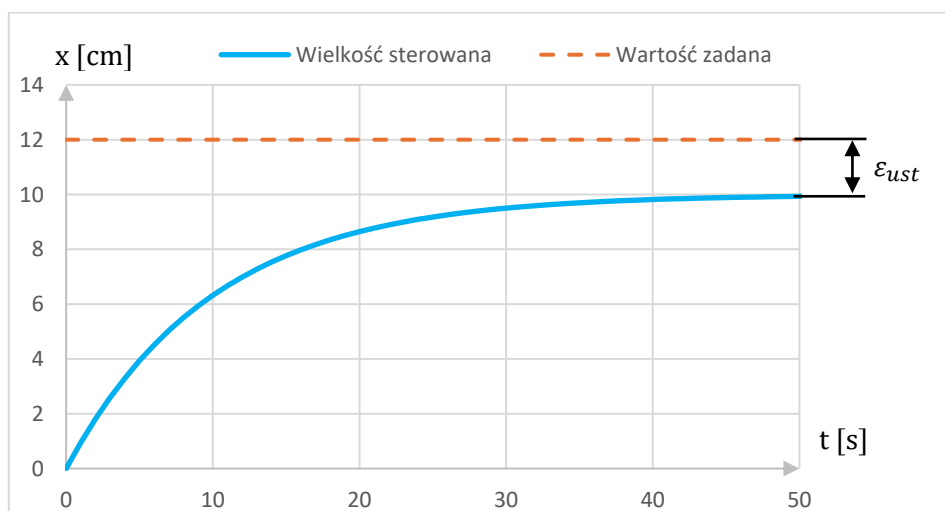
Dla regulacji ciągłej rozróżnia się poniższe rodzaje regulatorów:

- a) **Regulator P** (regulacja proporcjonalna)
- b) **Regulator PI** (regulacja proporcjonalno-całkująca)
- c) **Regulator PD** (regulacja proporcjonalno-różniczkująca)
- d) **Regulator PID** (regulacja proporcjonalno-całkująco-różniczkująca)

W przypadku **Regulatora P** – sygnał sterujący jest proporcjonalny do uchybu regulacji, zatem regulator ten można opisać poniższym równaniem transmitancji operatorowej:

$$G_P(s) = k_P$$

Stosuje się go w przypadkach, gdzie oscylacje wielkości regulowanej (wobec wartości zadanej) są niepożądane np. z przyczyn technologicznych. Znalazł zastosowanie np. do regulacji poziomu i ciśnienia cieczy w zbiornikach. Niemniej przy tym sposobie regulacji ciągłej może się zdarzyć, że wartość uchybu regulacji (i co za tym idzie) sygnału sterującego będzie za słaba, by wywołać odpowiednie działanie na obiekcie i wartość wielkości sterowanej ustabilizuje się poniżej wartości zadanej. Tą wartość uchybu nazywamy **uchybem w stanie ustalonym** – ε_{ust} .



Rys. 4. Wykres przedstawiający uchyb w stanie ustalonym

Taka sytuacja może mieć miejsce np. gdy wielkością sterowaną jest położenie. Wówczas element wykonawczy nie jest w stanie wygenerować siły, która będzie większa niż opory ruchu np. związane z tarciem.

Powyższego problemu niestety nie można rozwiązać poprzez znaczne zwiększenie wartości wzmocnienia k_p – wtedy układ przestaje być stabilny i wpada w drgania niegasnące wielkości sterowanej. Jednak problem ten można rozwiązać poprzez wprowadzenie do modelu regulatora równoległe elementu całkującego – tak otrzymany układ nazywamy **Regulatorem PI**.

$$G_{PI}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Sygnał na wyjściu z członu całkującego narasta wraz z upływem czasu, co pozwala zniwelować uchyb w stanie ustalonym. Parametr T_i nazywamy **stałą całkowania lub czasem zdwojenia** i odpowiada on wartości czasu, po którym przy wymuszeniu skokowym sygnał na wyjściu z członu całkującego zrówna się z sygnałem z członu proporcjonalnego tego regulatora.

Regulator PD otrzymuje się poprzez równoległe połączenie elementu proporcjonalnego oraz członu różniczkującego rzeczywistego. Wówczas równanie transmitancji operatorowej:

$$G_{PD}(s) = k_p \left(1 + T_d \frac{s}{\frac{1}{N}s + 1} \right)$$

Parametr T_d nazywamy **stałą różniczkowania lub czasem wyprzedzenia** i odpowiada on wartości czasu, po którym przy wymuszeniu liniowo-narastającym sygnał z członu proporcjonalnego zrówna się z sygnałem z elementu różniczkującego. Natomiast parametr $\frac{1}{N}$ to **stała czasowa charakteryzująca inercyjność** członu różniczkującego rzeczywistego.

Przypomnieć należy, że człon różniczkujący idealny nie jest możliwy do zrealizowania w rzeczywistych warunkach technicznych, a jego deidealizacja polega na wprowadzeniu elementu inercyjnego.

Regulator PD stosuje się gdy, wzmocnienie członu proporcjonalnego jest wystarczające do uzyskania wartości zadanej, ale w sterowanym układzie występują zakłócenia oddziałujące na obiekt. Element różniczkujący odpowiada za „przewidywanie” zmian wartości wielkości sterowanej, które są wywoływane wpływem zakłóceń, i adekwatne ich kompensowanie.

Generalnie odnośnie zakłóceń należy stwierdzić, że większa amplituda i częstotliwość zakłóceń okresowych lub większa amplituda i prędkość narastania zakłóceń nieokresowych utrudnia proces regulacji.

Dla niektórych obiektów może być niedopuszczalne wystąpienie uchybu ustalonego, dlatego w takiej sytuacji należy wykluczyć dobór regulatorów typu P oraz PD.

Regulator PID stosuje się wtedy, gdy wzmacnienie członu proporcjonalnego nie jest wystarczające do uzyskania wartości zadanej (stąd dodanie elementu całkującego niwelującego uchyb w stanie ustalonym) oraz należy skompensować wpływ zakłóceń oddziałujących na obiekt. Transmitancję operatorową regulatora PID przedstawia poniższe równanie:

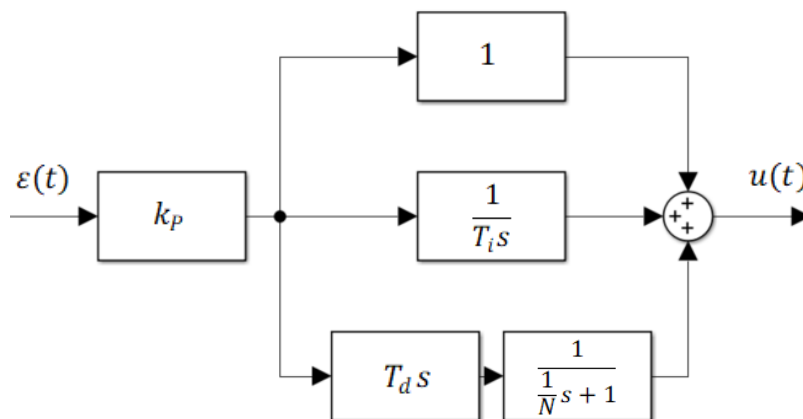
$$G_{PID}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \frac{s}{\frac{1}{N} s + 1} \right)$$

Natomiast równanie sygnału wyjściowego z regulatora (sygnału sterującego):

$$u(t) = k_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right)$$

Niemniej nie zaleca się stosowania regulatorów PID oraz PD do regulacji wielkości silnie zakłócanych szumami ze względu na możliwość wzmacniania tych szumów. Regulacja z zastosowaniem PID jest też bardziej czuła na nieprawidłowo dobrane wartości nastaw, niż to występuje przy złych nastawach regulatora PI.

Na poniższym Rys. 5 przedstawiono schemat blokowy Regulatora PID. Aby otrzymać inny z wyżej wymienionych regulatorów o pracy ciągłej należałoby usunąć odpowiednią gałąź połączenia równoległego.



Rys. 5. Schemat blokowy rzeczywistego regulatora PID

1.5 Dobór nastaw regulatorów o pracy ciągłej

W kolejnych podpunktach opisano metody doboru wartości nastaw regulatorów o pracy ciągłej.

Należy jednak pokreślić, że obliczone poniższymi metodami wartości mają charakter wstępnego doboru nastaw i wymagają późniejszej korekty (dostrojenia).

1.5.1 Dobór nastaw regulatorów o pracy ciągłej dla obiektów o znanej transmitancji

W poniższej tabeli przedstawiono dobór wartości nastaw odpowiedniego regulatora o pracy ciągłej dla obiektu scharakteryzowanego przez parametry – wzmocnienie K_O , stała czasowa T oraz czas opóźnienia T_0 – przy danych wskaźnikach oceny procesu sterowania – minimalny czas regulacji t_r oraz dla dwóch przypadków wartości przeregulowania κ . (parametry te zdefiniowano i omówiono w punkcie 1.7).

Tabela 2. Dobór nastaw regulatora o pracy ciągłej dla obiektu o znanej transmitancji, opisanej przez wzmocnienie, stałą czasową i czas opóźnienia.

Typ Regulatora	Przeregulowanie $\kappa \approx 0 \%$, Minimalny czas regulacji t_r		Przeregulowanie $\kappa \approx 20 \%$, Minimalny czas regulacji t_r	
	$\frac{t_r}{T_0}$	Nastawy	$\frac{t_r}{T_0}$	Nastawy
P	4.5	$k_P = \frac{0.3}{K_O \frac{T_0}{T}}$	6.5	$k_P = \frac{1.0}{K_O \frac{T_0}{T}}$
PI	8	$k_P = \frac{0.6}{K_O \frac{T_0}{T}}$ $T_i = 0.8 T_0 + 0.5 T$	12	$k_P = \frac{0.7}{K_O \frac{T_0}{T}}$ $T_i = T_0 + 0.3 T$
PID	5.5	$k_P = \frac{0.95}{K_O \frac{T_0}{T}}$ $T_i = 2.4 T_0$ $T_d = 0.4 T_0$		$k_P = \frac{1.2}{K_O \frac{T_0}{T}}$ $T_i = 2.0 T_0$ $T_d = 0.4 T_0$

1.5.2 Dobór nastaw regulatorów o pracy ciągłej dla obiektów o nieznanej transmitancji

W przypadku obiektu o nieznanej transmitancji do wyznaczenia wstępnych wartości nastaw regulatorów o pracy ciągłej można wykorzystać metodę Zieglera-Nicholsa opartą na drganiach niegasnących – bez konieczności dokonywania pomiaru własności dynamicznych tego obiektu. Zgodnie z tą metodą w pierwszej kolejności należy wykonać eksperyment zgodnie z poniższą procedurą:

- Najpierw dla obiektu przeprowadzić regulację typu P (co można zrealizować poprzez zainstalowany regulator PID, w którym wyłączona zostanie część całkująca (nastawienie $T_i = \infty$) i część różniczkująca (nastawienie $T_d = 0$))
- Stopniowo zwiększać wartość wzmocnienia regulatora, aby doprowadzić obiekt do granicy stabilności tzn. aż pojawią się drgania niegasnące wielkości sterowanej
- Zanotować wartość wzmocnienia, przy którym wystąpiły oscylacje niegasnące (wzmocnienie krytyczne k_{kryt}) oraz odczytać okres tych oscylacji T_{osc}

PODSTAWY AUTOMATYKI – LABORATORIUM

WYDZIAŁ MECHANICZNY

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

W kolejnym kroku na podstawie wyznaczonych wartości k_{kryt} oraz T_{osc} obliczyć wartości nastaw w zależności od wybranego typu regulatora – tabela poniżej.

Tabela 3. Dobór nastaw regulatora o pracy ciągłej wykorzystujących metodę Zieglera-Nicholsa opartą na drganiach niegasnących.

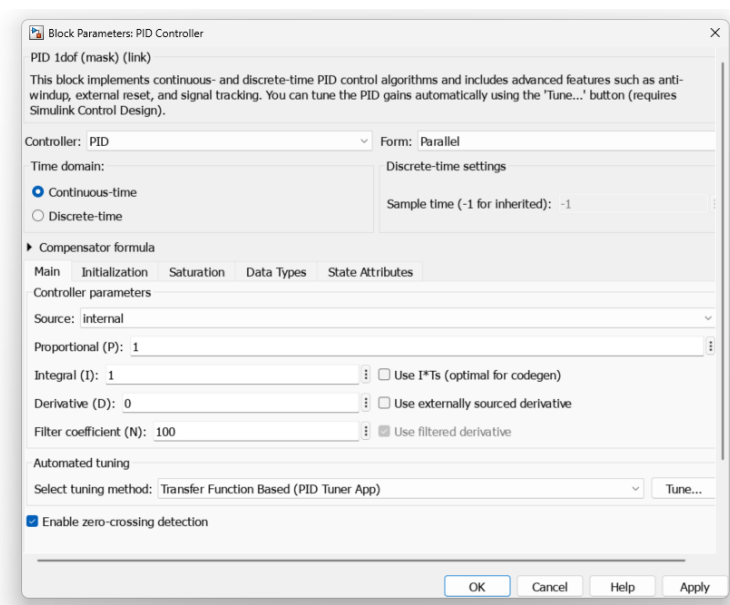
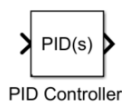
Typ regulatora	P	PI	PID
Nastawy	$k_P = 0.5 k_{kryt}$	$k_P = 0.45 k_{kryt}$ $T_i = 0.85 T_{osc}$	$k_P = 0.6 k_{kryt}$ $T_i = 0.5 T_{osc}$ $T_d = 0.12 T_{osc}$

Opisaną metodę można zastosować także dla obiektu o znanej transmitancji. W szczególności z powodzeniem stosuje się ją dla obiektów z dużą wartością stałej czasowej T (duża inercja).

Niemniej należy zaznaczyć, że ogromną trudnością tej metody jest konieczność wzbudzenia układu regulacji i doprowadzenie wielkości regulowanej obiektu do drgań niegasnących – co w praktyce nie zawsze jest dopuszczalne, choćby ze względów bezpieczeństwa.

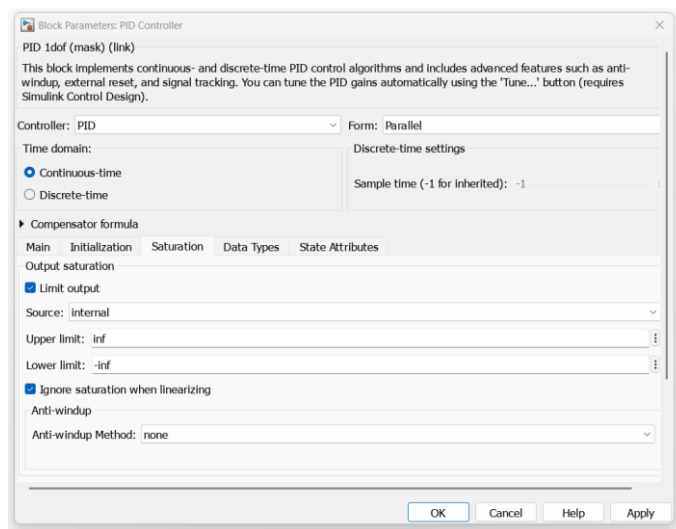
1.6 Blok „PID Controller” w środowisku Matlab/Simulink. Wprowadzanie obliczonych wartości nastaw jako parametry tego bloku.

W środowisku Matlab/Simulink istnieje blok odpowiedzialny za symulację regulatora o pracy ciągłej – „PID Controller”. W oknie właściwości na liście rozwijanej jest też możliwość zmiany typu tego regulatora z domyślnie ustawionego PID na jeden z następujących – P, PI lub PD.



Rys. 6. Po lewej blok PID Controller w środowisku Matlab/Simulink. Po prawej okno właściwości tego bloku.

Wybierając „**Saturation**” (Rys. 7) i po zaznaczeniu opcji „**Limit Output**” (czyli „ogranicz wyjście”) pojawia się możliwość wprowadzenia ograniczenia wartości sygnału wyjściowego z regulatora. W polach „**Upper limit**” i „**Lower limit**” można wprowadzić odpowiednio wartość maksymalną i wartość minimalną. Domyślnie ustawione są odpowiednio + nieskończoność (**inf**) oraz – nieskończoność (**-inf**). W praktyce należy jednak ustawić tu konkretne wartości.



Rys. 7. Właściwości bloku PID Controller – Saturation.

Natomiast w polu właściwości głównych „**Main**” (Rys. 6) w pola oznaczone literami P, I, D należy wprowadzić wartości nastaw regulatora (uzyskane metodami opisanymi w punkcie 1.5) – po ich wcześniejszym przeliczeniu zgodnie z poniżej przedstawionymi wzorami:

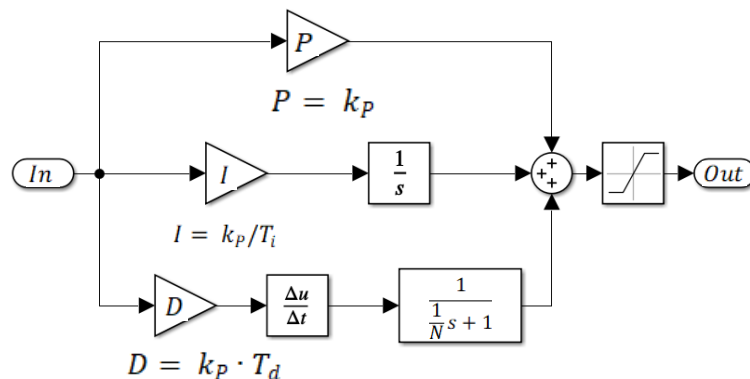
$$P = k_P$$

$$I = \frac{k_P}{T_i}$$

$$D = T_d \cdot k_P$$

Przy czym stałe różniczkowania i całkowania należy wyrazić w sekundach.

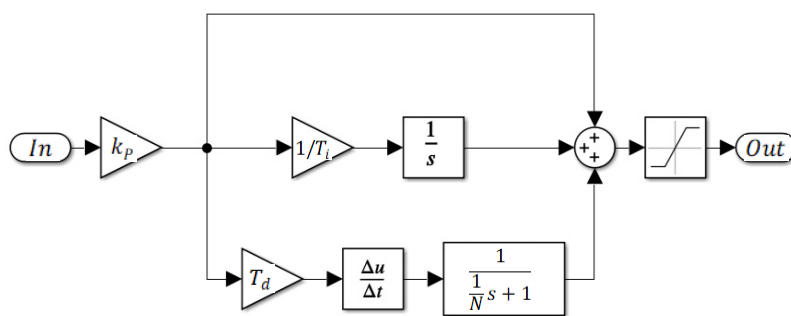
Powyższy sposób wprowadzania wartości nastaw regulatora PID (blok „PID Controller”) w środowisku Matlab/Simulink wynika ze sposobu jego zdefiniowania, który można przedstawić tak jak pokazano na poniższym Rys. 8. Należy tu dodać, że schemat regulatora PID pokazany wcześniej na Rys. 5 ma charakter ideowy.



Rys. 8. Model symulacyjny regulatora PID przedstawiający sposób przeliczenia wartości nastaw wprowadzanych do bloku "PID Controller"

Parametr N pojawiający się w powyższym schemacie – tak jak wspomniano – opisuje inercyjność elementu różniczkującego (rzeczywistego). Domyślnie ustawiona wartość w środowisku Matlab/Simulink w bloku „PID Controller” wynosi $N = 100$. Należy zwrócić uwagę, że wtedy stała czasowa opisująca ten element wynosi $T = \frac{1}{N} = 0.01$

Poniżej przedstawiono natomiast inny model symulacyjny regulatora PID, który jest równoważny powyższemu – wartość wzmocnienia k_p wyciągnięto przed węzeł.



Rys. 9. Równoważny model symulacyjny regulatora PID w środowisku Matlab/Simulink

Projektując model symulacyjny układu sterowania z regulatorem PID należy wykorzystać blok „PID Controller”. W przypadku zmiany sposobu regulacji ciągłej na inny typ (np. na proporcjonalno-całkującą) należy skorzystać z wbudowanej listy rozwijanej. W innych środowiskach można to zrealizować poprzez m.in. usunięcie (wyzerowanie) odpowiedniej gałęzi połączenia równoległego – tzn. ustawić $T_i = \infty$ lub $T_d = 0$.

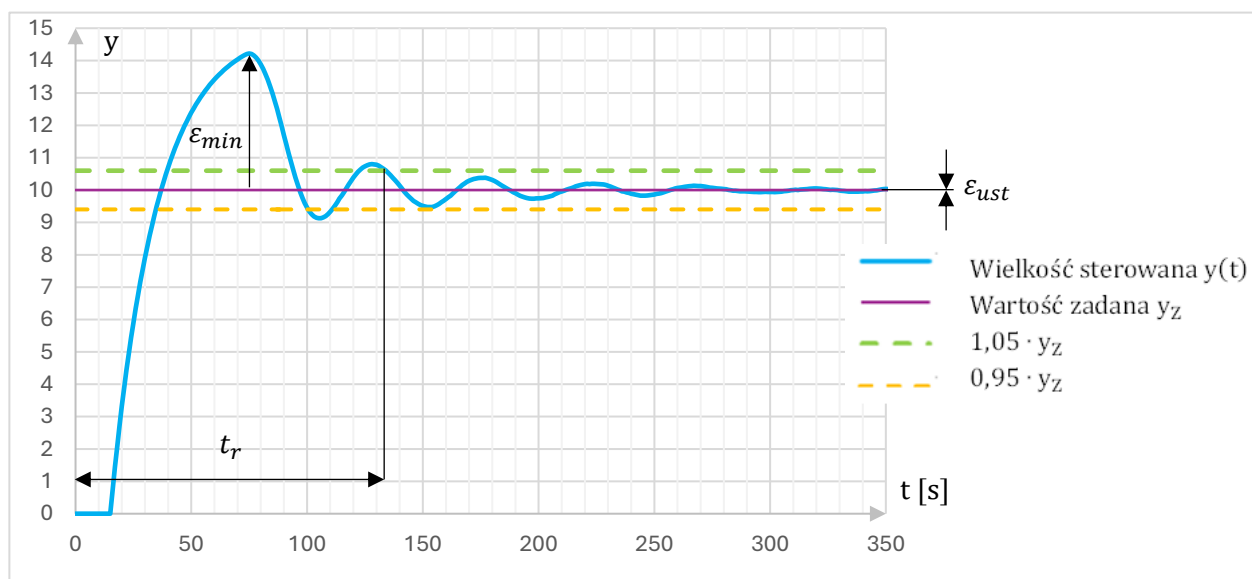
1.7 Wskaźniki oceny jakości procesu regulacji i doboru wartości nastaw

Dobierając regulator i jego nastawy do układu sterowania, który ma zostać zastosowany w danym procesie, należy kierować się przyjętymi założeniami wynikającymi z charakteru tego procesu i celowości prowadzonej regulacji.

Do oceny, czy te założenia zostaną spełnione, służą **wskaźniki oceny jakości regulacji**, które wyznacza się na podstawie przebiegu uchybu regulacji zarejestrowanego jako odpowiedź układu automatycznej regulacji na skokową zmianę wartości zadanej lub skokową zmianę zakłócenia oddziałującego na obiekt sterowania. Są to:

- a) Czas regulacji t_r
- b) Uchyb ustalony ε_{ust}
- c) Przeregulowanie κ

Na poniższym wykresie przedstawiono przykładowy przebieg wielkości sterowanej, na którym zaznaczono wyżej wymienione wskaźniki, niżej podano ich definicje.



Rys. 10. Wykres przykładowego przebiegu wielkości sterowanej pod wpływem skokowej zmiany wartości zadanej, na którym zaznaczono podstawowe wskaźniki oceny jakości regulacji.

Uchyb ustalony ε_{ust} – wartość uchybu regulacji utrzymująca się po ustabilizowaniu się odpowiedzi układu.

Czas regulacji t_r – jest to czas mierzony od początku eksperymentu do momentu, od którego wartość uchybu regulacji $\varepsilon(t)$ nie przekracza $\pm 5\%$ wartości uchybu ustalonego ε_{ust}

Przeregulowanie κ [%] – wartość bezwzględna stosunku najmniejszej zarejestrowanej wartości uchybu (czyli dla maksymalnej wartości wielkości sterowanej) do wartości zadanej.

$$\kappa = \left| \frac{\varepsilon_{min}}{y_Z} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{y_Z - y_{max}}{y_Z} \right| \cdot 100\%$$

Przykład – Na podstawie odpowiedzi UAR przedstawionej na Rys. 10 wyznaczyć podstawowe wskaźniki oceny jakości regulacji.

Z przedstawionego wykresu wynika, że wielkość sterowana stabilizuje się na poziomie wartości zadanej, stąd przyjęto:

$$\varepsilon_{ust} = 0$$

W takim przypadku czas regulacji wyznaczamy jako wartość od początku eksperymentu do momentu, od którego wartość wielkości sterowanej $y(t)$ nie przekracza wartości z przedziału $(0.95y_Z; 1.05y_Z)$. Na podstawie wykresu i danych pomiarowych odczytano:

$$t_r = 134 \text{ s}$$

Natomiast wartość przeregulowania:

$$\kappa = \left| \frac{y_Z - y_{max}}{y_Z} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{10 - 14,22}{10} \right| \cdot 100\% = 42,2\%$$

Oprócz powyższych parametrów istnieją jeszcze **całkowe wskaźniki jakości regulacji**. Wśród nich na szczególną uwagę zasługuje **całka z kwadratu uchybu regulacji** (z ang. *integrated square error*), obliczona metodami numerycznymi jako całka oznaczona po przyjętym arbitralnie czasie t_x .

$$ISE \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^{t_x} \varepsilon^2(t) dt$$

Im mniejsze wartości podanych wskaźników, tym lepsza jakość procesu regulacji. Niemniej o tym, który z nich jest najistotniejszy decyduje konkretne zastosowanie UAR w danym procesie technologicznym.

PODSTAWY AUTOMATYKI – LABORATORIUM
WYDZIAŁ MECHANICZNY
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

1.8 Przypomnienie – podstawowe człony (elementy) automatyki

W poniższej tabeli zestawiono podstawowe człony (elementy) automatyki wraz z opisującymi je równaniami przetwarzania sygnałów – wejściowego $x(t)$ na wyjściowy $y(t)$.

Człon proporcjonalny	
$y(t) = kx(t)$	$G(s) = k$
Człon opóźniający	
$y(t) = x(t - T_0)$	$G(s) = e^{-sT_0}$
Człon inercyjny I rzędu	
$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$	$G(s) = \frac{k}{Ts + 1}$
Człon inercyjny n-tego rzędu	
–	$G(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \cdots (T_ns + 1)}$
Człon całkujący	
$\frac{dy(t)}{dt} = x(t) \Rightarrow y(t) = \int x(t)dt$	$G(s) = \frac{1}{s}$
Człon różniczkujący idealny	
$y(t) = \frac{dx(t)}{dt}$	$G(s) = s$
Człon różniczkujący rzeczywisty	
$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$	$G(s) = \frac{ks}{Ts + 1}$
Człon oscylacyjny	
$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dy(t)}{dt} + \omega_0^2 y(t) = k\omega_0^2 x(t)$	$G(s) = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$

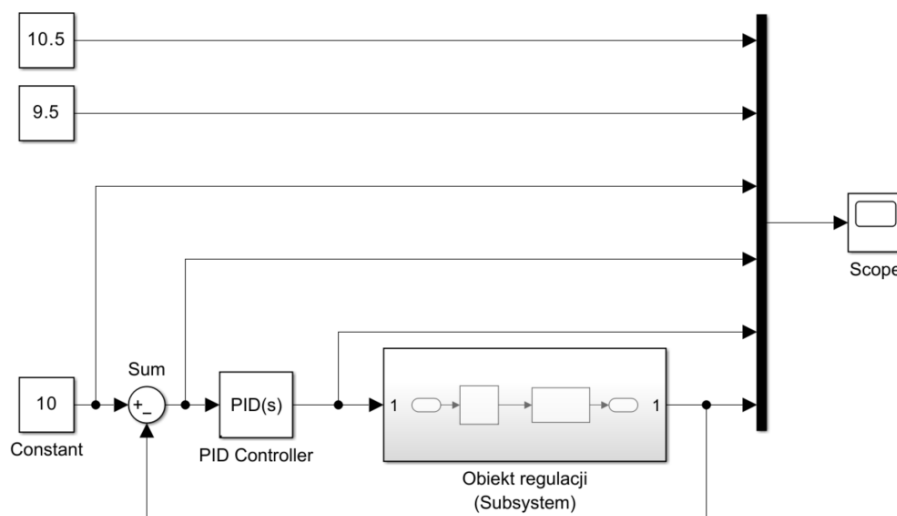
Przyjęte oznaczenia:

- k – wzmacnienie
- T – stała czasowa
- T_0 – czas opóźnienia (czas martwy)
- ω_0 – pulsacja (częstość kołowa) drgań własnych członu oscylacyjnego
- ξ – współczynnik tłumienia drgań; przy założeniu $\xi^2 < 1$

2. Zadania do wykonania w środowisku Matlab/Simulink z zakresu badania symulacyjnego układów automatycznego sterowania opartych na regulacji ciągłej.

Uwagi do poniższych zadań:

- a) Dla każdego modelu symulacyjnego należy na wykresie, pojawiającym się na ekranie bloku „Scope”, odłożyć co najmniej 4 sygnały – wartość zadana, uchyb regulacji, sygnał sterujący z regulatora oraz sygnał wyjściowy wielkości regulowanej z obiektu. W przypadku analizy wpływu zakłóceń należy uwzględnić również i ten sygnał.
- b) W każdym modelu symulacyjnym UAR przyjąć wartość zadaną $y_Z = 10$
- c) Jeżeli w poleceniu nie podano inaczej, to jako wartości ograniczenia („Saturation”) przyjąć – Lower Limit = 0V, Upper Limit = 3 V
- d) W celu wyznaczenia wskaźników oceny jakości regulacji można wykorzystać narzędzie „Cursor Measurements” w oknie bloku „Scope” po wykonaniu prawidłowej symulacji. Korzystając z tego sposobu należy również odłożyć dwa dodatkowe sygnały – tzn.: „górną i dolną granicę” zmian wartości dla $\varepsilon(t)$ lub $y(t)$, analogicznie jak na Rys. 10 przy użyciu bloków „Constant” – dla wyznaczenia czasu regulacji. W celu uproszczenia przyjąć tu wartości 10.5 oraz 9.5
- e) Charakter czasowego przebiegu zakłóceń zadaje prowadzący.
- f) Przykładowy model symulacyjny układu regulacji przedstawiono poniżej. Należy zwrócić uwagę, że model ten nie uwzględnia zakłóceń oddziałujących na obiekt.



Rys. 11. Przykładowy model symulacyjny UAR z regulatorem o pracy ciągłej w środowisku Matlab/Simulink

Zadanie 1. Utworzyć model obiektu regulacji (jako „Subsystem”), opisanego poniższym równaniem transmitancji operatorowej:

$$G(s) = \frac{K_o}{Ts + 1} e^{-sT_0}, \text{ gdzie } K_o = 5,11 [-], T = 20 [s], T_0 = 17,5 [s]$$

Zadanie 2. Utworzyć model układu regulacji automatycznej z regulacją ciągłą dla obiektu z zadania (1). Na osobnych modelach rozważyć regulację typu PID, PI oraz P. Wykorzystać blok „PID Controller”. Nastawy obliczyć dla dwóch przypadków wartości przeregulowania – tzn. dla $\kappa \approx 0\%$ oraz dla $\kappa \approx 20\%$

Zadanie 3. Dla symulacji układów regulacji z zadania (2) wyznaczyć wskaźniki oceny regulacji. Na tej podstawie dobrać optymalny typ regulatora wraz z wartościami jego nastaw do sterowania analizowanym obiektem w układzie bez zakłóceń.

Zadanie 4. Modele symulacyjne układów regulacji automatycznej z zadania (2) skopiować i zmodyfikować poprzez dodanie zakłóceń oddziałujących na obiekt.

Zadanie 5. Dla symulacji układów regulacji z zadania (4) wyznaczyć wskaźniki oceny regulacji. Na tej podstawie dobrać optymalny typ regulatora wraz z wartościami jego nastaw do sterowania analizowanym obiektem w układzie z zakłóceniami.

Zadanie 6. Przeprowadzić badanie symulacyjne obiektu w celu wyznaczenia nastaw regulatorów o pracy ciągłej metodą Zieglera-Nicholsa wykorzystującą drgania niegasnące.

Zadanie 7. Modele symulacyjne układów regulacji automatycznej z zadania (2) skopiować i wprowadzić wartości nastaw obliczone w zadaniu (6). Porównać otrzymane krzywe i wskaźniki oceny regulacji z wynikami z zadania (2).

3. Literatura

- [1] B. Łysakowska, G. Mzyk „Komputerowa symulacja układów automatycznej regulacji w środowisku Matlab/Simulink” OWPW, Wrocław 2005
- [2] Praca zbiorowa pod red. W. Findeisena „Poradnik inżyniera automatyka” WNT, Warszawa 1995
- [3] S. Gruss „Poradnik elektryka i automatyka” Wydawnictwo normalizacyjne „Alfa-Wero” Sp. z o.o., Warszawa 1998
- [4] Praca zbiorowa pod red. T. Mikulczyńskiego „Laboratorium podstaw automatyki i automatyzacji” OWPW, Wrocław 2005
- [5] Notatki z wykładów

PODSTAWY AUTOMATYKI – LABORATORIUM
WYDZIAŁ MECHANICZNY
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

**Materiał pomocniczy do zajęć – tabele do wpisywania wartości nastaw i wskaźników
oceny jakości regulacji**

Zadanie 2. UAR z regulacją ciągłą bez zakłóceń

Nastawy obliczone na podstawie transmitancji obiektu – przy $\kappa \approx 0\%$ i minimalnym t_r							
Typ Regulatora	Parametr regulatora		Nastawy w bloku „PID Controller”		Wskaźniki oceny jakości regulacji		
					Uchyb ustalony $\varepsilon_{ust} [-]$	Czas regulacji $t_r [s]$	Przeregulowanie $\kappa [\%]$
P	k_P		P				
-	-	-	-	-	-	-	-
PI	k_P		P				
	T_i		I				
-	-	-	-	-	-	-	-
PID	k_P		P				
	T_i		I				
	T_d		D				

Nastawy obliczone na podstawie transmitancji obiektu – przy $\kappa \approx 20\%$ i minimalnym t_r							
Typ Regulatora	Parametr regulatora		Nastawy w bloku „PID Controller”		Wskaźniki oceny jakości regulacji		
					Uchyb ustalony $\varepsilon_{ust} [-]$	Czas regulacji $t_r [s]$	Przeregulowanie $\kappa [\%]$
P	k_P		P				
-	-	-	-	-	-	-	-
PI	k_P		P				
	T_i		I				
-	-	-	-	-	-	-	-
PID	k_P		P				
	T_i		I				
	T_d		D				

PODSTAWY AUTOMATYKI – LABORATORIUM
WYDZIAŁ MECHANICZNY
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Zadanie 4. UAR z regulacją ciągłą zakłóceniami.

Nastawy obliczone na podstawie transmitancji obiektu – przy $\kappa \approx 0\%$ i minimalnym t_r							
Typ Regulatora	Parametr regulatora		Nastawy w bloku „PID Controller”		Wskaźniki oceny jakości regulacji		
					Uchyb ustalony $\varepsilon_{ust}[-]$	Czas regulacji $t_r [s]$	Przeregulowanie $\kappa [\%]$
P	k_P		P				
-	-	-	-	-	-	-	-
PI	k_P		P				
	T_i		I				
-	-	-	-	-	-	-	-
PID	k_P		P				
	T_i		I				
	T_d		D				

Nastawy obliczone na podstawie transmitancji obiektu – przy $\kappa \approx 20\%$ i minimalnym t_r							
Typ Regulatora	Parametr regulatora		Nastawy w bloku „PID Controller”		Wskaźniki oceny jakości regulacji		
					Uchyb ustalony $\varepsilon_{ust}[-]$	Czas regulacji $t_r [s]$	Przeregulowanie $\kappa [\%]$
P	k_P		P				
-	-	-	-	-	-	-	-
PI	k_P		P				
	T_i		I				
-	-	-	-	-	-	-	-
PID	k_P		P				
	T_i		I				
	T_d		D				

PODSTAWY AUTOMATYKI – LABORATORIUM
WYDZIAŁ MECHANICZNY
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Zadanie 6. Obliczenie wartości nastaw regulatorów o pracy ciągłej metodą Zieglera-Nicholsa wykorzystującą drgania niegasnące.

$k_{kryt} [-]$		$T_{osc} [s]$	
----------------	--	---------------	--

Typ Regulatora	Parametr regulatora		Nastawy w bloku „PID Controller”		Wskaźniki oceny jakości regulacji		
					Uchyb ustalony $\varepsilon_{ust} [-]$	Czas regulacji $t_r [s]$	Przeregulowanie $\kappa [\%]$
P	k_P		P				
-	-	-	-	-	-	-	-
PI	k_P		P				
	T_i		I				
-	-	-	-	-	-	-	-
PID	k_P		P				
	T_i		I				
	T_d		D				

Pytania kontrolne:

1. Narysować schemat układu automatycznej regulacji z zamkniętą ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego (UAR).
2. Podać definicję uchybu (odchyłki) regulacji.
3. Jak wyznaczyć transmitancję zastępczą dla połączenia szeregowego?
4. Jak wyznaczyć transmitancję zastępczą dla połączenia równoległego?
5. Przedstawić metodę doboru typu regulacji dla obiektu w zależności od wartości jego stałej czasowej T oraz czasu opóźnienia T_0 .
6. Omówić na czym polega regulacja ciągła i wymienić typu regulatorów o pracy ciągłej wraz z opisującymi je równaniami transmitancji operatorowej.
7. Opisać metodę Zieglera-Nicholsa doboru nastaw regulatorów o pracy ciągłej, która wykorzystuje drgania niegasnące.
8. Narysować schemat blokowy regulatora PID wraz z podpisaniem jego parametrów.
9. Wymienić i zdefiniować wskaźniki oceny jakości regulacji.
10. Podać równania opisujące podstawowe człony (elementy) automatyki.