

Zakład Wydziałowy Inżynierii Biomedycznej  
i Pomiarowej

**Laboratorium Pomiarów i Automatyki  
w Inżynierii Chemicznej**

**Regulacja Ciągła**

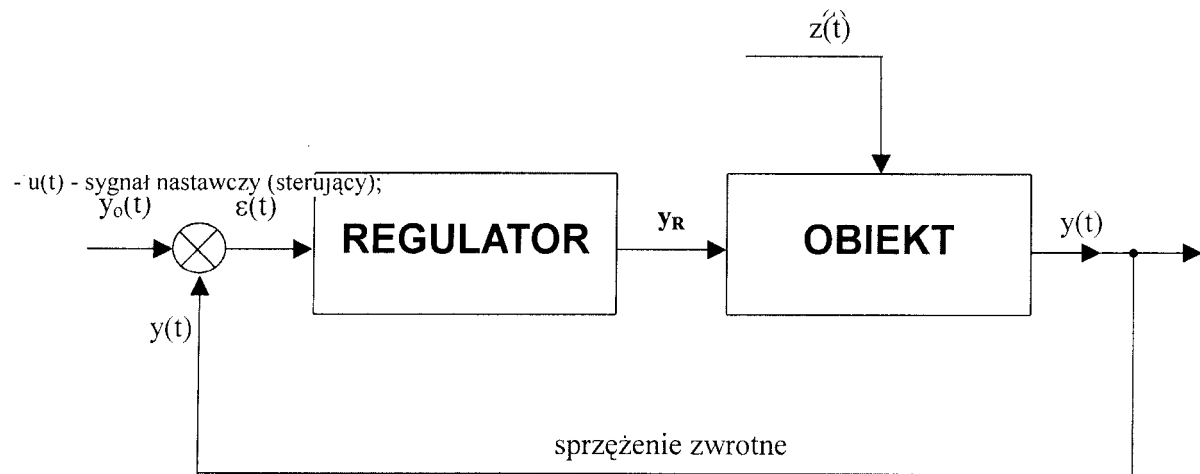
Wrocław 2005

## 1. Miary jakości regulacji automatycznej.

**Regulacja automatyczna** polega na oddziaływaniu na proces technologiczny (obiekt regulacji) aby przebieg procesu mierzony przebiegiem wartości *wielkości regulowanej*, był zgodny z przebiegiem założonym .

Oddziaływanie realizuje urządzenie techniczne zwane **regulatorem**.

**Regulator** na podstawie różnicy (uchybu regulacji  $\varepsilon$ ) pomiędzy wartością wielkości określającej stan procesu  $y(t)$  a *wartością zadaną* tej wielkości generuje *sygnał sterujący* dla obiektu  $u(t)$  o wartości zależnej również od szybkości zmian stanu procesu i występujących zakłóceń.



- $y_0(t)$  - sygnał żądanej wartości regulowanej wielkości;
- $y(t)$  – sygnał rzeczywistej wartości regulowanej wielkości;
- $\varepsilon(t) = y_0(t) - y(t)$  – sygnał odchylenia (uchybu);
- $z(t)$  - zakłócenia działające na układ,

**Rys.1** Struktura układu regulacji automatycznej.

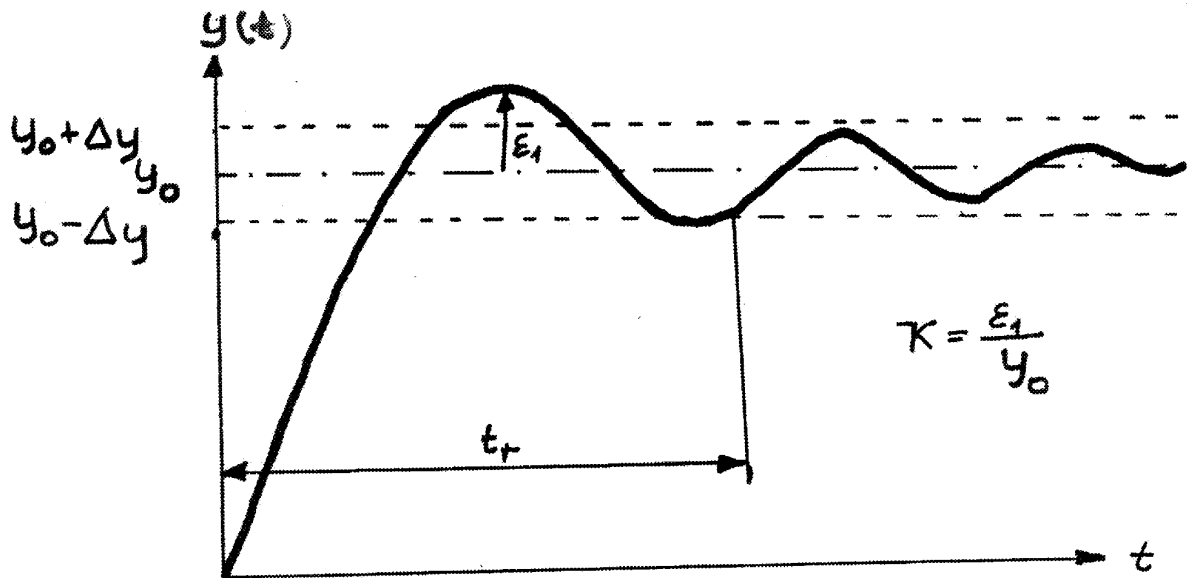
W pracach projektowych najczęściej przyjmuje się uproszczenie, że zakłócenia  $z(t)$  oddziałują na wielkość wyjściową obiektu w sposób addytywny  $z(t) + y(t)$  (rys. 6).

Istotnym zadaniem jest dobór rodzaju regulatora do właściwości dynamicznych obiektu a w dalszej części dobór nastaw (parametrów) regulatora, tak aby przebieg procesu regulacji był zgodny z założeniami.

Ocenę jakości procesu regulacji przeprowadza się w oparciu o pewne wskaźniki:

- czas regulacji  $t_r$ , jest to czas po którym uchyb regulacji  $\varepsilon(t)$  nie przekracza 5% wartości  $\varepsilon_{ust}$ ,
- maksymalny uchyb regulacji  $\varepsilon_{ust}$ ,
- przeregulowanie  $\kappa$ .

Wartości tych wskaźników wyznacza się w oparciu o zarejestrowaną odpowiedź układu na skokową zmianę zakłócenia działającego na obiekt regulacji lub skokową zmianę wartości zadanej.



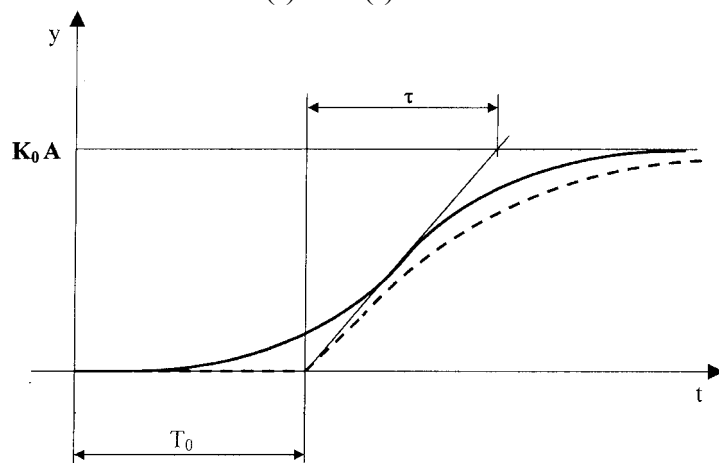
Rys.2 Wyznaczanie wskaźników jakości regulacji.

Określenie, który wskaźnik jest najistotniejszy w ocenie zależy od konkretnych zastosowań układu regulacji w procesach technologicznych.

## 2. Regulacja ciągła

Dobór rodzaju regulacji automatycznej do obiektu (procesu) powinien być poprzedzony wyznaczeniem jego charakterystyki dynamicznej. Najczęściej spotykane obiekty to obiekty cieplne, mechaniczne ( suszarki, piece, ultratermostaty, pomieszczenia klimatyzowane, wirówki, pojazdy itp.), które mają charakter członów inercyjnych pierwszego lub wyższych rzędów, a dla celów projektowych można zastosować uproszczenie przypisując im łańcuchowe połączenie członu inercyjnego pierwszego rzędu i członu opóźniającego. Dobór parametrów  $K_0$ ,  $T_0$ ,  $\tau$  członów zastępczych przeprowadza się na podstawie analizy odpowiedzi obiektu na pobudzenie skokowe

$$u(t) = A1(t)$$



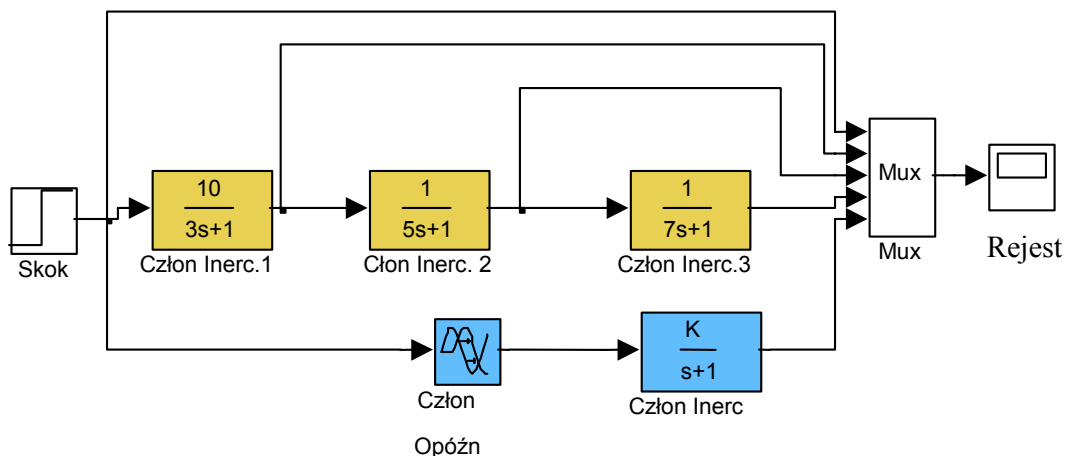
— rzeczywista charakterystyka skokowa;  
 - - - - - zastępcza (uproszczona) charakterystyka skokowa.

Rys.3 Zasada przybliżania odpowiedzi skokowej obiektu inercyjnego wyższego rzędu charakterystyką członu inercyjnego I-go rzędu o stałej czasowej  $\tau$  i wzmocnieniu  $K_0$  połączonego łańcuchowo z członem opóźniającym o opóźnieniu  $T_0$ .

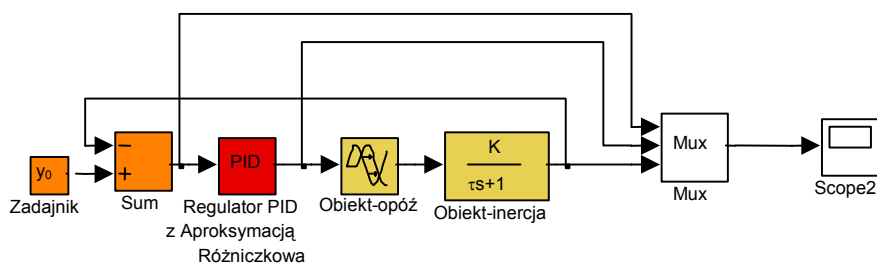
Praktyczne kryteria doboru rodzaju regulacji do obiektu scharakteryzowanego czasem opóźnienia (czasem martwym)  $T_0$  i stałą czasową  $\tau$  zakładają że stosuje się:

- regulację dwupołożeniową jeżeli  $\frac{T_0}{\tau} < 0.2$ ,
- regulację ciągłą jeżeli  $0.2 \leq \frac{T_0}{\tau} \leq 1$ ,
- regulację krokowo-impulsową jeżeli  $1 < \frac{T_0}{\tau}$

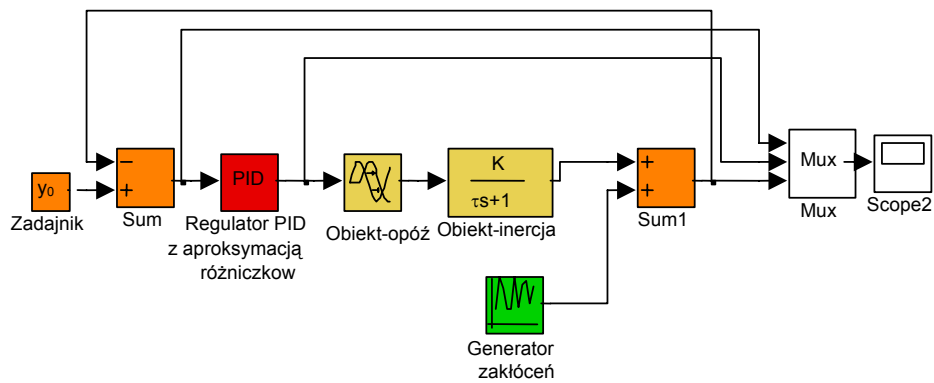
Zadanie przybliżania charakterystyk dynamicznych można przeprowadzić analitycznie, można też zrealizować eksperymentalnie korzystając np. z pakietu „Simulink” programu Matlab podczas eksperymentu porównywania odpowiedzi skokowej modelu obiektu (człon inercyjny n-tego rzędu) i przybliżonego modelu w postaci łańcuchowego połączenia członów opóźniającego i inercyjnego 1-go rzędu. Ocena jakości dopasowania odbywa się na podstawie porównania zarejestrowanych odpowiedzi skokowych za pomocą rejestratora (rys.4)



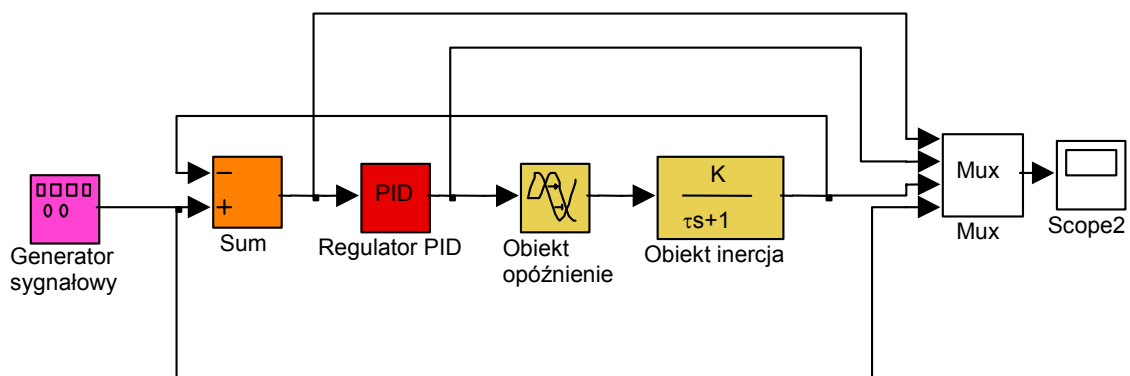
**Rys. 4** Struktura przykładowa umożliwiająca porównanie odpowiedzi skokowej obiektu: człon inercyjny 3-go rzędu (kolor żółty) z odpowiedzią skokową modelu przybliżającego: łańcuchowe połączenie czlonu opóźniającego i czlonu inercyjnego 1-go rzędu (kolor niebieski).



**Rys. 5** Struktura umożliwiająca badanie stanu przejściowego w układzie regulacji automatycznej typu P,PI,PID, bez obecności zakłóceń dla obiektu inercyjnego 1-go rzędu z opóźnieniem.



**Rys.6** Struktura umożliwiająca badanie stanu przejściowego w układzie regulacji automatycznej typu P,PI,PID, z obecnością zakłóceń dla obiektu inercyjnego 1-go rzędu z opóźnieniem.



**Rys.7** Struktura umożliwiająca badanie zachowania się obiektu w odpowiedzi na programowaną (przebiegi: piłokształtny, prostokątny, sinusoidalny) zmianę wartości zadanej

### 3. Dobór nastaw regulatora

Aby uzyskać przebieg regulacji spełniający wymagania narzucone przez automatyzowany proces technologiczny trzeba dobrać nastawy regulatora tak aby odchyłka regulacji  $\varepsilon(t)$  zmieniała się zgodnie z założonymi parametrami. Do parametrów określających bezpośrednie cechy przebiegu odchyłki przede wszystkim należą: *czas regulacji*  $t_r$  a więc czas, po którym odchyłka jest mniejsza od dopuszczalnej, *maksymalna odchyłka chwilowa*  $\varepsilon_{max}$ , *odchyłka ustalona*  $\varepsilon_{ust}$  utrzymująca się po ustaniu zakłócenia, *przeregulowanie*  $\kappa$  (rys.2). Istnieją opracowane algorytmy, które dla przyjętych kryteriów jakości, pozwalają dobrać wstępnie nastawy regulatorów. Współczesne, inteligentne regulatory umożliwiają samoczynny dobór nastaw regulatora według wybranego przez obsługę kryterium.

**Tab.1** Dobór nastaw regulatorów ciągłych (  $K_p$  - wzmacnienie;  $T_i$ - czas całkowania;  $T_d$  – czas różniczkowania) dla obiektów statycznych o wzmacnieniu  $K_{ob}$ ; czasie opóźnienia  $T_0$  ; stałej czasowej  $\tau$  , przy założeniu minimalnego czasu regulacji  $t_r$  i dwóch wartościach przeregulowania. (Poradnik inżyniera automatyka, WNT Warszawa 1995.)

Typ Regulatora	Przeregulowanie $\approx 0\%$ , minimum $t_r$		Przeregulowanie $\approx 20\%$ , minimum $t_r$	
	$\frac{t_r}{T_0}$	Nastawy	$\frac{t_r}{T_0}$	Nastawy
P	4.5	$K_p = \frac{0.3}{K_{ob} \frac{T_0}{\tau}}$	6.5	$K_p = \frac{1.0}{K_{ob} \frac{T_0}{\tau}}$
PI	8	$K_p = \frac{0.6}{K_{ob} \frac{T_0}{\tau}}, T_i = 0.8T_0 + 0.5\tau$	12	$K_p = \frac{0.7}{K_{ob} \frac{T_0}{\tau}}, T_i = T_0 + 0.3\tau$
PID	5.5	$K_p = \frac{0.95}{K_{ob} \frac{T_0}{\tau}}, T_i = 2.4T_0, T_d = 0.4T_0$		$K_p = \frac{1.2}{K_{ob} \frac{T_0}{\tau}}, T_i = 2.0T_0, T_d = 0.4T_0$

Dane w tabeli wyznaczone zostały dla następującej funkcji przetwarzania regulatora:

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

#### 4. Program ćwiczenia

4.1 Dla obiektu inercyjnego wyższego rzędu (np. pieca, czujnika) o modelu zadanym przez prowadzącego dobrać eksperymentalnie model przybliżony w postaci łańcuchowego połączenia członu opóźniającego i członu inercyjnego pierwszego rzędu – wyznaczyć parametry zgodnie z modelem przedstawionym na rys. 3.

4.2 Dla obiektu z pkt. 4.1 zaprogramować układ regulacji ciągłej PID o stałej wartości zadanej  $y_0$  (uzgodnionej z prowadzącym) bez obecności zakłóceń (rys.5). zarejestrować przebiegi czasowe:

- odpowiedzi obiektu,
- odchyłki regulacji,
- sygnału na wyjściu regulatora.

Wyznaczyć liczbowe wartości czasu regulacji  $t_r$ , przeregulowania  $\kappa$ , odchyłki statycznej  $\varepsilon_{ust}$ .

Badania przeprowadzić dla różnych nastaw regulatorów P, PI, PID, określić wartości nastaw przy których układ regulacji przestaje być stabilny.

**Uwaga a !! nastawy regulatora PID w pakiecie Simulink,**

**zdefiniowane są następująco:**  $I = \frac{K_p}{T_i}, P = K_p, D = T_d K_p$

4.3 Do struktury z pkt. 4.2 włączyć generator zakłócający (rys.6). Dla uprzednio wybranych nastaw regulatorów przeprowadzić badania wpływu zakłóceń.

Wartości średnie i wariancje zakłóceń dobierać ze zbioru:

[ 0; 0.05 $y_0$ ; 0.1 $y_0$ ; 0.2 $y_0$ ]

Porównać uzyskane wyniki z wynikami z zad. 4.2.

4.4 Dobrać optymalne warunki nastaw regulatora i przeprowadzić proces regulacji, stałowartościowej dla regulatora P oraz PI, porównać uzyskane wyniki z wynikami z poprzednich zadań.

4.5 Dla optymalnych nastaw regulatora przeprowadzić symulację regulacji przy

programowej zmianie wartości zadanej  $y_0$ , bez obecności zakłóceń, (rys. 7).  
Zalecany wybór piłokształtnego przebiegu  $y_0$ .

## 5. Literatura uzupełniająca

- [1] S. Węgrzyn, Podstawy automatyki, PWN Warszawa.
- [2] Kostro, Automatyka w pytaniach i odpowiedziach, WNT Warszawa 1990
- [3] Praca zbiorowa, Poradnik inżyniera Automatyka. WNT, Warszawa 1973.
- [4] Notatki z wykładu

### ***Podstawowe liniowe człony dynamiczne.***

Ponieważ w programie ćwiczenia przewidziano korzystanie z modeli opisywanych z zastosowaniem przekształcenia Laplace'a poniżej zamieszczono zestawienie opisów matematycznych tych modeli.

- *Człon proporcjonalny*

Równanie przetwarzania	$y(t) = K u(t)$
Transmitancja operatorowa	$\frac{y(s)}{u(s)} = K$
  
- *Człon inercyjny pierwszego rzędu*

Równanie przetwarzania	$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ku(t)$
Transmitancja operatorowa	$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$
  
- *Człon całkujący*

Równanie przetwarzania	$y(t) = \frac{1}{T_i} \int u(t) dt$
Transmitancja operatorowa	$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{T_i s}$
  
- *Człon całkujący rzeczywisty*

Równanie przetwarzania	$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{1}{T_i} \int u(t) dt$
Transmitancja operatorowa	$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{T_i s (\tau s + 1)}$
  
- *Człon różniczkujący*

Równanie przetwarzania	$y(t) = T_d \frac{du(t)}{dt}$
Transmitancja operatorowa	$\frac{y(s)}{u(s)} = T_d s$
  
- *Człon różniczkujący rzeczywisty*

Równanie przetwarzania	$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = T_d \frac{du(t)}{dt}$
Transmitancja operatorowa	$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{T_d s}{\tau s + 1}$
  
- *Człon opóźniający*

Równanie przetwarzania  $y(t) = u(t-T_0)$   
 Transmitancja operatorowa  $\frac{y(s)}{u(s)} = e^{-sT_0}$

- *Regulator PID*

Równanie przetwarzania  $y_R(t) = K_p \left\{ \varepsilon(t) + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon(t) dt \right\}$

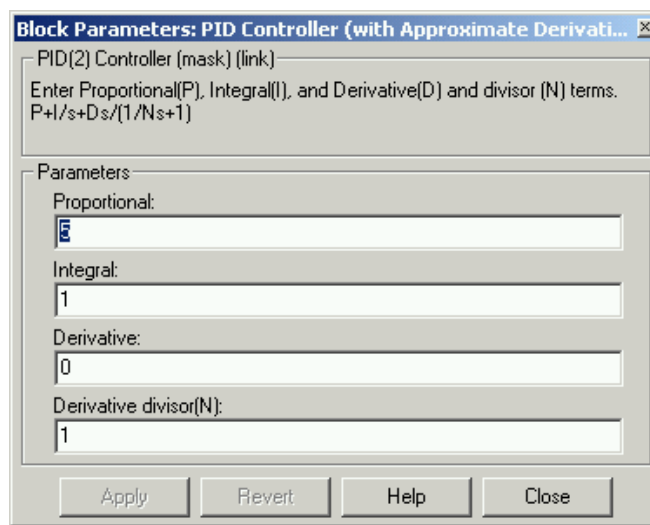
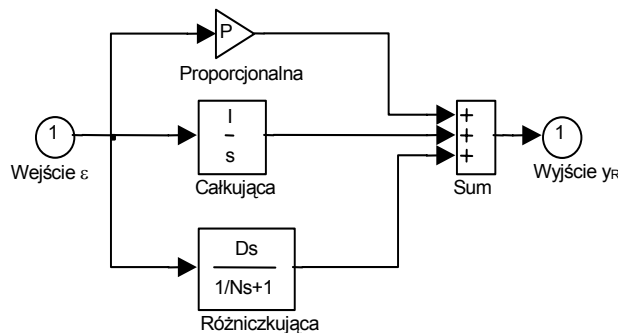
Transmitancja operatorowa  $\frac{y_R(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left\{ 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right\}$

- **Regulator PID stosowany w pakiecie Simulink programu Matlab** zawiera składową inercyjną w bloku odpowiadającym za różniczkowanie sygnału odchyłki  $\varepsilon(t)$ . Poszczególne nastawy do poprzednio sformułowanego opisu zdefiniowane są następująco:

$$I = \frac{K_p}{T_i}, \quad P = K_p, \quad D = T_d K_p$$

Transmitancja tego regulatora ma postać:

$$\frac{y_R(s)}{\varepsilon(s)} = P + \frac{Ds}{1/Ns+1} + I \frac{1}{s}$$



**Rys.8** Struktura regulatora PID wykorzystywanego w ćwiczeniu i jego tablica nastaw.