

**POLITECHNIKA WROCLAWSKA**

**Wydziałowy Zakład Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej**

**Laboratorium elementów automatyki i pomiarów w  
technologii chemicznej**

**Instrukcja do ćwiczenia  
Regulacja dwupołożeniowa**

**Wrocław 2005**

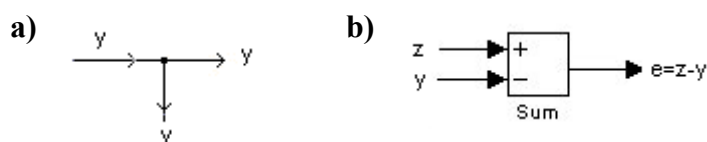
## 1. Wprowadzenie

Z regulacją dwupołożeniową (dwustawną, dwustanową - zwłaszcza temperatury) mamy często do czynienia w życiu codziennym – przykładem jest lodówka, zamrażarka, pralka itd. Regulacja ta jest również szeroko stosowana w wielu procesach technologicznych i w laboratoriach (suszarki, termostaty). Powszechność zastosowań regulacji dwupołożeniowej wynika z faktu, że jest to najprostszy sposób regulacji automatycznej.

Analiza układu regulacji automatycznej wymaga określenia kilku związanych z tym układem pojęć. Pierwszym z nich jest pojęcie sygnału. Przez **sygnał** będziemy rozumieli przebieg czasowy wielkości fizycznej – w praktyce elektrycznej tj. napięcia lub prądu, niosący jakąś informację. Często zamiast pojęcia **sygnał na wejściu** lub **wyjściu członu układu automatyki** mówi się w skrócie **wejście** lub **wyjście** tego członu. Na schematach sygnał jest zapisywany w postaci funkcji  $y(t)$ , gdzie  $t$  – oznacza czas, a  $y$  wartość wielkości stanowiącej sygnał, czasem używa się tylko samego symbolu  $y$ . Fizyczną interpretację sygnału może stanowić np. przebieg czasowy napięcia, którego wartość jest informacją o temperaturze obiektu.

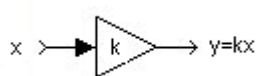
Innym pojęciem (elementem, członem układu automatyki) jest **węzeł**. Na Rys. 1 pierwszym przedstawione są:

- **węzeł informacyjny** (Rys. 1a), rozdzielający ten sam sygnał  $y$  na wiele ścieżek
- **węzeł sumacyjny** (Rys. 1b), realizujący sumę algebraiczną sygnałów wchodzących do węzła



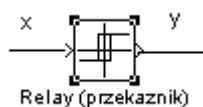
Rys. 1 Węzły  
a) informacyjny  
b) sumacyjny

Na Rys. 2 przedstawiony jest inny człon używany w układach regulacji – **człon proporcjonalny** (mnożący sygnał wejściowy  $x$  przez stałą  $k$ ). Często człon ten nazywany **wzmacniaczem**, choć wartość  $k$  może być mniejsza od 1.



Rys. 2 Człon proporcjonalny (wzmacniacz)

Charakterystyka wzmacniacza jest z definicji **liniowa**. W układach regulacji występują również człony o **charakterystyce nieliniowej** – przykładem jest przekaźnik przedstawiony na Rys. 3.

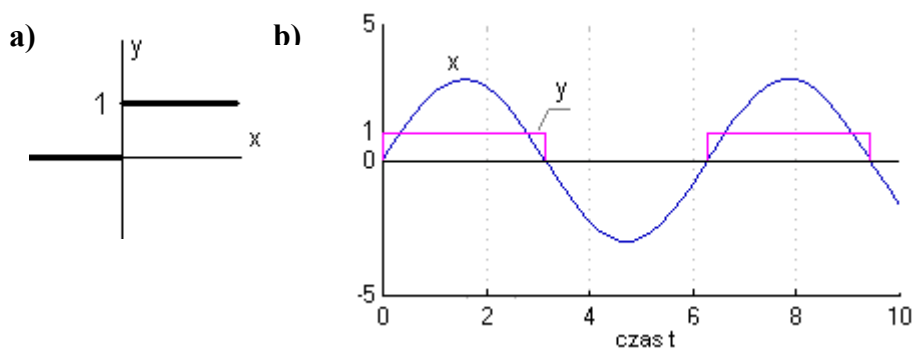


Rys. 3 Przekaznik

W najprostszym przypadku przekaźnik realizuje następującą funkcję:

$$\begin{aligned} y &= 1 \text{ dla } x \geq 0 \\ y &= 0 \text{ dla } x < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

co ilustruje Rys. 4. Stan  $y = 1$  nazywamy załączeniem, a  $y = 0$  wyłączeniem przekaźnika.



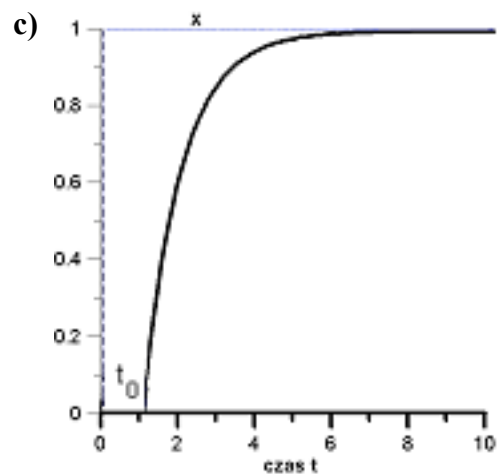
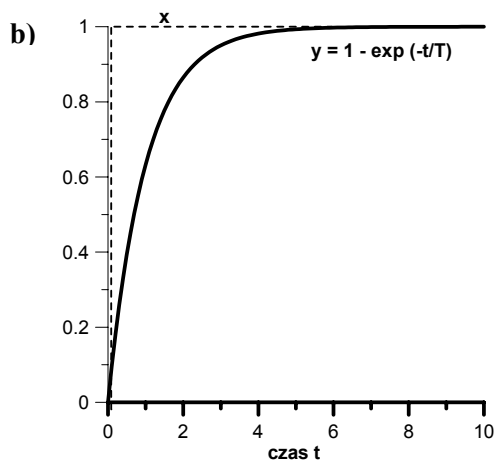
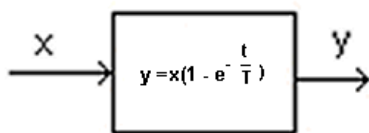
Rys. 4 Graficzna prezentacja funkcji realizowanej przez przekaźnik  
a) charakterystyka przekaźnika  
b) przykład pracy przekaźnika

Omawiane dotychczas człony miały **charakter statyczny**, tzn. stan ich wyjścia zależał od wartości wejściowej, natomiast nie zależał od czasu. Z punktu widzenia automatyki istotne jest, że wiele obiektów ma **charakter dynamiczny**, co oznacza, że ich sygnał wyjściowy (ze względu na procesy przetwarzania energii) nie ustala się natychmiast po zmianie sygnału wejściowego. Dla przykładu: z doświadczenia wiadomo, że jeśli czujnik temperatury o ustalonej temperaturze początkowej włożymy do ośrodka o temperaturze wyższej (mówimy, że na wejściu czujnika nastąpił skok wartości), to sygnał wyjściowy czujnika (np. słupkę rtęci w termometrze rtęciowym) nie ustali się natychmiast na nowej wartości – czasem mówi się o bezwładności (lub inercji) takich obiektów. Zachowanie się obiektów takich jak termometr, termostat itd. opisuje się równaniami różniczkowymi zwyczajnymi - w najprostszym przypadku równaniem różniczkowym pierwszego rzędu. Człon przedstawiający obiekt opisywany równaniem różniczkowym pierwszego rzędu nazywany jest **członem inercyjnym pierwszego rzędu**. Na Rys. 5a przedstawiony jest taki człon wraz z funkcją opisującą zmianę sygnału wyjściowego,

gdy na wejściu następuje skok wartości. Rys. 5b podaje przykład jego odpowiedzi (sygnał wyjściowy  $y$ ) na skokową zmianę wartości sygnału wejściowego  $x$  (w chwili  $t = 0$  sygnał  $x$  zmienia wartość z 0 na 1). Odpowiedź członu inercyjnego pierwszego rzędu ma charakter wykładniczy i asymptotycznie zmierza do wartości wejściowej  $x$ . Czas ustalania się odpowiedzi obiektu zależy od jego właściwości fizycznych takich jak masa i ciepło właściwe. Matematycznie opisuje go **stała czasowa  $T$** , występująca w równaniu na Rys. 5b.

Rzeczywiste obiekty opisywane są jako człony inercyjne wyższego rzędu, a ich odpowiedź na skok wartości na wejściu można (choć tylko w przybliżeniu) traktować jako odpowiedź **członu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem**, na Rys. 5c oznaczonym jako  $t_0$ . Należy podkreślić, że opóźnienie wprowadzane przez obiekty rzeczywiste ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia układów regulacji, ponieważ oznacza, że obiekty te nie reagują natychmiast na sygnały podawane z regulatora.

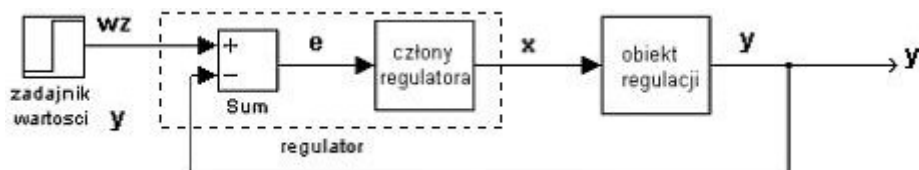
a)



Rys. 5 Człon inercyjny a) i jego odpowiedź na skok wartości na wejściu  
 b) człon inercyjny pierwszego rzędu  
 c) człon inercyjny wyższego rzędu

## 2. Układ dwupołożeniowej regulacji automatycznej

Ogólny schemat układu automatycznej regulacji przedstawia Rys. 6.



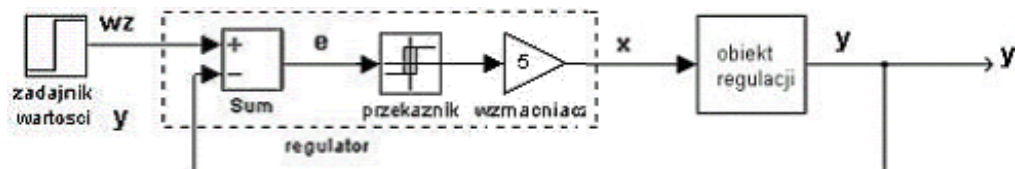
Rys. 6 Układ regulacji automatycznej

W układzie tym istnieje człon zadający wartość  $wz$ , jaką chcemy uzyskać na wyjściu obiektu (np. zadajemy temperaturę termostatu). W węzle sumacyjnym (będącym częścią regulatora) od wartości zadanej  $wz$  odejmowana jest wartość sygnału wyjściowego z obiektu  $y$  (np. jego temperatura) – ich różnicę nazywamy sygnałem błędny  $e$ . W zależności od wartości sygnału  $e$  kolejne człony regulatora podejmują odpowiednie działania w stosunku do obiektu.

W najprostszym przypadku działanie regulatora może być dwustanowe:

$$\begin{aligned} \text{dla } e \geq 0 \quad (y < wz) \quad x > 0 \quad (\text{regulator dostarcza mocy do obiektu}) \\ \text{dla } e < 0 \quad (y > wz) \quad x = 0 \quad (\text{regulator nie dostarcza mocy do obiektu}) \end{aligned} \quad (3)$$

Przykładowo oznacza to, że jeśli temperatura zadana jest większa od wartości uzyskanej w obiekcie, to regulator włącza grzanie i wyłącza je, jeśli wartość zadana jest większa od wartości wyjściowej z obiektu. Takie działanie można zrealizować w oparciu o przedstawiony powyżej człon zwany przekaźnikiem, uzyskując układ przedstawiony na Rys. 7. Należy jednak podkreślić, że z przyczyn energetycznych sygnał podawany na wejście obiektu musi mieć wartość większą od spodziewanej wartości wyjściowej z obiektu (regulator musi dysponować nadwyżką mocy), dlatego po przekaźniku wprowadzono człon proporcjonalny o wzmacnieniu większym od 1.

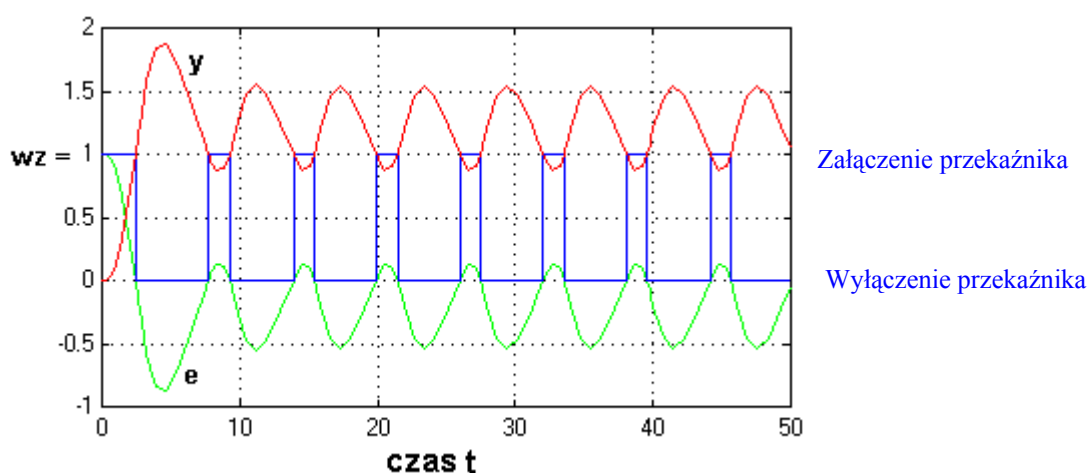


Rys. 7 Układ regulacji dwupołożeniowej

Przykład odpowiedzi układu regulacji dwupołożeniowej na skokową zmianę wartości zadanej przedstawia Rys. 8 (przykładowo: przez skokową zmianę wartości zadanej rozumiemy sytuację, gdy temperatura termostatu wynosi np.  $20^{\circ}\text{C}$ , a w pewnej chwili  $t$  ustawiamy nową wartość zadaną np.  $30^{\circ}\text{C}$ ). W przykładzie na Rys. 8 wartość  $wz$  wynosi początkowo 0, a w chwili  $t = 0$  zmieniono ją na wartość  $wz = 1$  (skok jednostkowy). Na rysunku oprócz sygnału wyjściowego z

obiektu  $y$  pokazano również przebieg sygnału błędu  $e$  oraz stany załączenia i wyłączenia przekaźnika. Jak widać, przekaźnik realizuje funkcję podaną zależnością (1) i (3). Należy zwrócić uwagę, że

- sygnał wyjściowy z obiektu nie ma wartości stałej – widoczne są tętnienia o określonej amplitudzie i okresie powtarzania
- amplituda pierwszego przeregulowania i czas pierwszego włączenia przekaźnika mają wartości większe od kolejnych, widocznych na rysunku
- pomimo wyłączenia przekaźnika (regulator nie dostarcza mocy do obiektu) sygnał na wyjściu rośnie przez pewien czas, i odwrotnie – pomimo załączenia przekaźnika sygnał na wyjściu maleje przez pewien czas. Efekty te mają związek z przedstawionym na Rys. 5c parametrem obiektu zwanym czasem opóźnienia  $t_0$ .



Rys. 8 Przebieg regulacji dwupołożeniowej

Przedstawiony na rys. 8 przebieg sygnału wyjściowego  $y$  (wielkości regulowanej) jest przebiegiem typowym dla układów regulacji dwupołożeniowej w warunkach bez **zakłóceń**. Jeżeli w trakcie procesu regulacji, np. temperatury w komorze suszarki, dojdzie do chwilowego otwarcia drzwi tej komory, to mówimy, że w obiekcie regulacji wystąpiło zakłócenie. Zakłócenie może zmienić chwilowy przebieg wielkości regulowanej, jednak układ regulacji powinien w skończonym czasie przywrócić stan sprzed wystąpienia zakłócenia.

### 3. Program i realizacja ćwiczenia

#### 3.1 Badanie charakterystyki statycznej przekaźnika

Po uruchomieniu pakietu Simulink otworzyć ze wskazanego folderu plik o nazwie **przekaznik.mdl**. Dwukrotnie „kliknąć” lewym przyciskiem myszy człon przekaźnik. Pojawi się okno edycji parametrów przekaźnika, w którym podaje się:

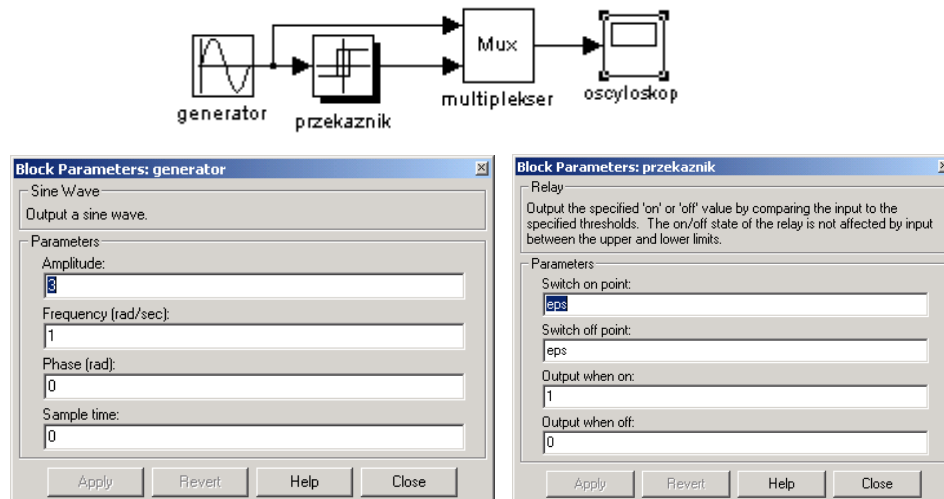
- wartość, przy której następuje załączenie przekaźnika (switch on point)
  - wartość, przy której następuje wyłączenie przekaźnika (switch off point)
- (domyślnie wpisane są wartości **eps**, co oznacza brak histerezy – przekaźnik o charakterystyce podanej zależnością (1) i na Rys. 3 )

- wartość na wyjściu przełącznika, gdy jest on załączony (Output when on) – pozostawić **1**
- wartość na wyjściu przełącznika, gdy jest on wyłączony (Output when off) – pozostawić **0**

Należy zaakceptować powyższe parametry (Apply) i zamknąć okno (close).

Podobnie należy otworzyć okno generatora i ustawić wartość jego amplitudy większą od 1 np. **3**.

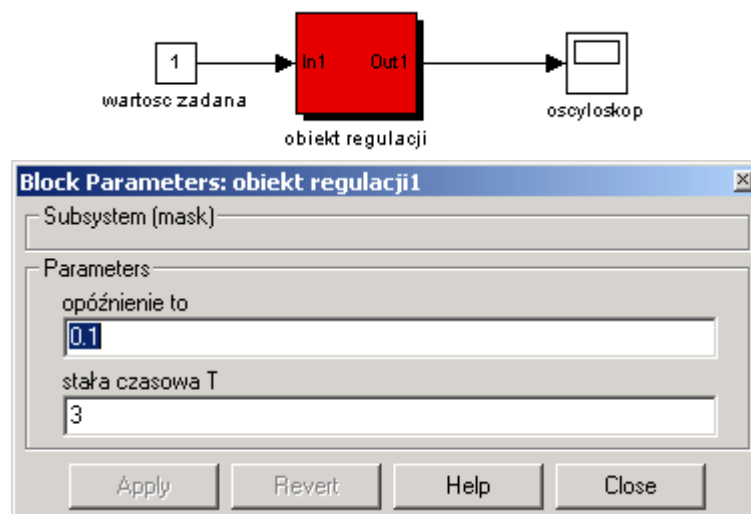
Pokazany na Rys. 9 oscyloskop służy do obserwowania przebiegów na wejściu i wyjściu przełącznika (sygnały te zbiera człon zwany multiplekserem).



Rys. 9 Układ do badania charakterystyki przełącznika wraz z oknami edycji jego parametrów

Uruchomić symulację poleceniem Start w menu Simulation. Na podstawie przebiegów pokazanych przez oscyloskop należy ustalić, przy jakich wartościach sygnału na wejściu, przełącznik zmienia stan na wyjściu. Zamknąć plik przekaznik.mdl.

### 3.2 Badanie odpowiedzi obiektu na skok wartości



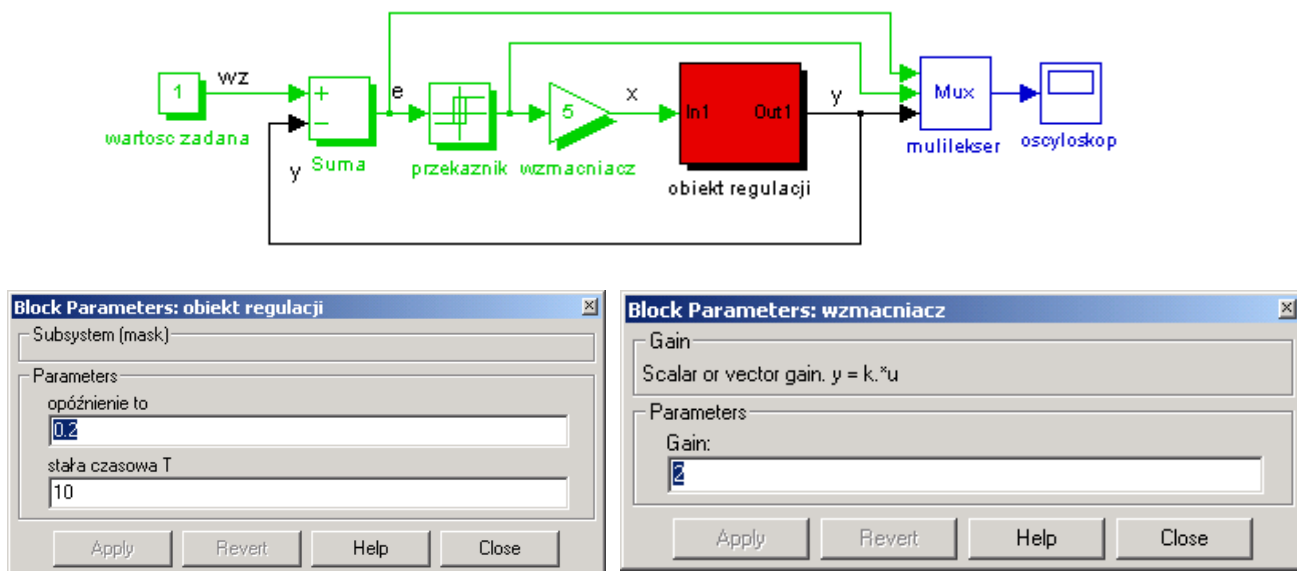
Rys. 10 Układ do badania odpowiedzi obiektu na skok wartości wraz z oknem edycji parametrów obiektu regulacji

Otworzyć plik o nazwie **obiekt.mdl**. Zbadać odpowiedzi obiektu na skok wartości (podawanie na jego wejściu stałej wartości, tu równej 1).

Badania przeprowadzić dla kilku wartości opóźnień  $t_o \in (0.1, 5)$ , oraz stałych czasowych  $T \in (2, 10)$  – por. Rys. 5. Zanotować przebieg uzyskanych na oscyloskopie charakterystyk. Zamknąć plik obiekt.mdl.

### 3.3 Badanie układu regulacji dwupołożeniowej

#### 3.3.1 Badanie układu regulacji dwupołożeniowej bez zakłóceń



Rys. 11 Układ automatycznej regulacji dwupołożeniowej i okna edycji jego parametrów

1. Z foldera podanego przez prowadzącego otworzyć plik o nazwie **dwustanowa1.mdl**. Uruchomić symulację i określić następujące parametry:
  - czas, po którym sygnał wyjściowy z obiektu osiąga po raz pierwszy wartość zadaną
  - wartość przeregulowań (maksymalnych odchyłek od wartości zadanej) na wyjściu obiektu
  - czas pierwszego załączenia przekaźnika, stosunek kolejnych czasów załączeń i wyłączeń oraz czas trwania cyklu załączenie/wyłączenie
  - wartość średnią sygnału wyjściowego z obiektu (z pominięciem pierwszego przeregulowania)
2. Powtórzyć badania z p.1 dla różnych wzmocnień wzmacniacza  $Gain \in (1.5, 10)$ .
3. Powtórzyć badania z p.1 dla różnych czasów opóźnienia  $t_o \in (0.1, 1)$ .
4. Powtórzyć badania z p.1 dla różnych stałych czasowych obiektu  $T \in (2, 10)$
5. Porównać parametry określane w trakcie badań w p. 1-6 i wyciągnąć wnioski.

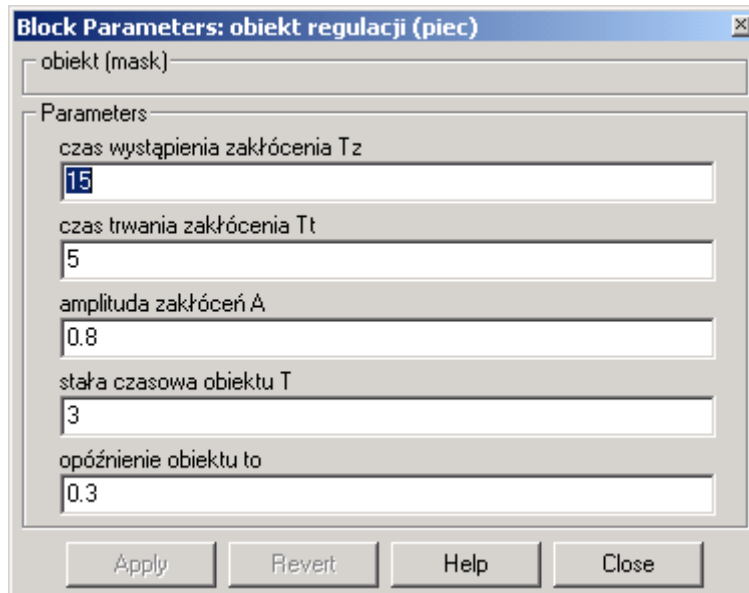
#### 3.3.2 Badanie układu regulacji dwupołożeniowej w przypadku zakłóceń występujących w obiekcie.

1. Z foldera podanego przez prowadzącego otworzyć plik o nazwie **dwustanowa2.mdl**. Model ten ma wbudowany układ zakłócający, symulujący np. otwieranie drzwiczek komory suszarki. Okno edycji parametrów obiektu – Rys. 12 - umożliwia określenie



czasu, po którym występuje zakłócenie (domyślnie 15), czasu trwania zakłócenia (domyślnie 5) oraz amplitudy zakłócenia (domyślnie 0.8 - przy wartości zadanej 1).

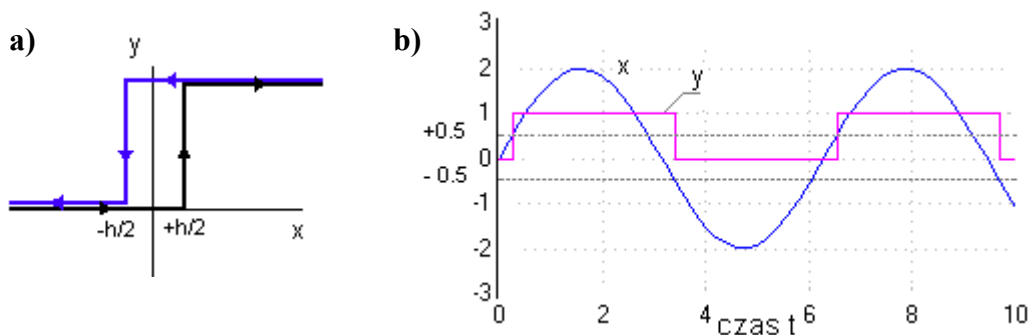
2. Uruchomić symulację dla kilku wartości czasu trwania i amplitudy zakłócenia. Porównać przebiegi wielkości regulowanej w obiekcie bez i z zakłóceniami obydwie obiekty muszą mieć te same wartości stałych czasowych  $T$  oraz czasu opóźnienia  $t_0$ , np. odpowiednio 3 i 0.3.



Rys. 12 Pole edycji parametrów obiektu regulacji z możliwością wystąpienia zakłóceń

### 3.3.3 Badanie układu regulacji dwupołożeniowej z histerezą przekaźnika

Działanie przekaźnika z histerezą jest przedstawione na Rys. 13.



Rys. 13 Graficzna prezentacja funkcji realizowanej przez przekaźnik z histerezą  
a) charakterystyka przekaźnika  
b) przykład pracy przekaźnika,  $h/2 = 0.5$

Przełączenie stanu wyjścia tego przełącznika z wartości 1 na 0 (lub odwrotnie) zależy od kierunku zmian tej wartości wejściowej  $x$  i odbywa się przy różnych wartościach  $x$ , co przedstawia zależność (2) i Rys. 5

$$\begin{aligned} y &= 1 \text{ dla } x \geq +h/2, \text{ gdy wartość } x \text{ rośnie} \\ y &= 0 \text{ dla } x < -h/2 \text{ gdy wartość } x \text{ maleje} \end{aligned} \quad (2)$$

Innymi słowy, w przełączniku z histerezą następuje rozdzielenie progów przełączania stanu wyjścia przełącznika – załączenie odbywa się na innym poziomie ( $+h/2$ ) niż wyłączenie ( $-h/2$ ). Szerokość przedziału ( $-h/2, +h/2$ ) nazywamy **strefą histerezy przełącznika**. W przykładzie pokazanym na Rys. 13b strefa histerezy wynosi  $(-0.5, +0.5)$ .

W ramach badań należy:

1. Otworzyć plik `przekaznik.mdl`  
Powtórzyć badanie z p. 3.1, ale z niezerową wartością histerezy przełącznika. W tym celu należy zastąpić wartości  $\epsilon$  w oknie edycji parametrów przełącznika - Rys. 9 - wartościami liczbowymi np.  $+0.2$  oraz  $-0.2$ . Uruchomić symulację poleceniem Start w menu Simulation.
2. Na podstawie przebiegów pokazanych przez oscyloskop należy ustalić, przy jakich wartościach sygnału na wejściu przełącznik zmienia stan na wyjściu. Zamknąć plik `przekaznik.mdl`.
3. Otworzyć plik o nazwie **dwustanowa1.mdl**.
4. Uruchomić symulację, zmieniając wartość czasu opóźnienia  $t_o$  w przedziale  $t_o \in (0.05, 0.2)$ . Zaobserwować zależność okresu załączeń przełącznika od wartości  $t_o$ .
5. Ustawić niezerową histerezę przełącznika np.  $+0.2$  oraz  $-0.2$  i powtórzyć badania z p. 4.
6. Omówić wpływ histerezy przełącznika na częstotliwość jego załączeń w przypadku obiektów o małych czasach opóźnienia  $t_o$ .