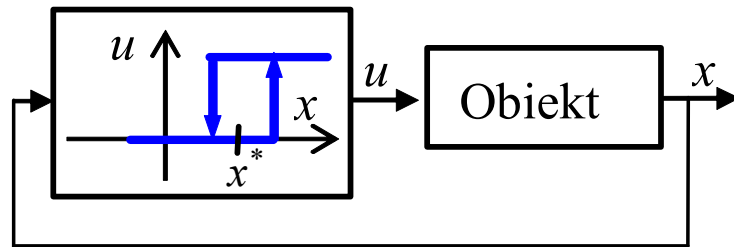
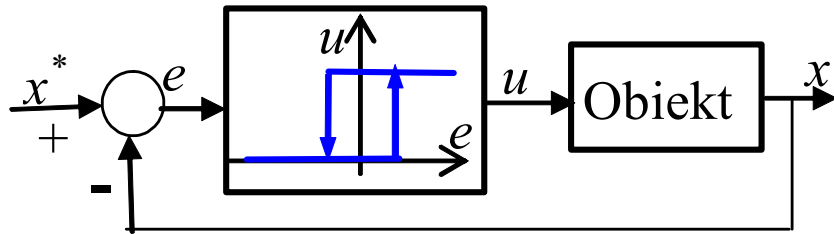
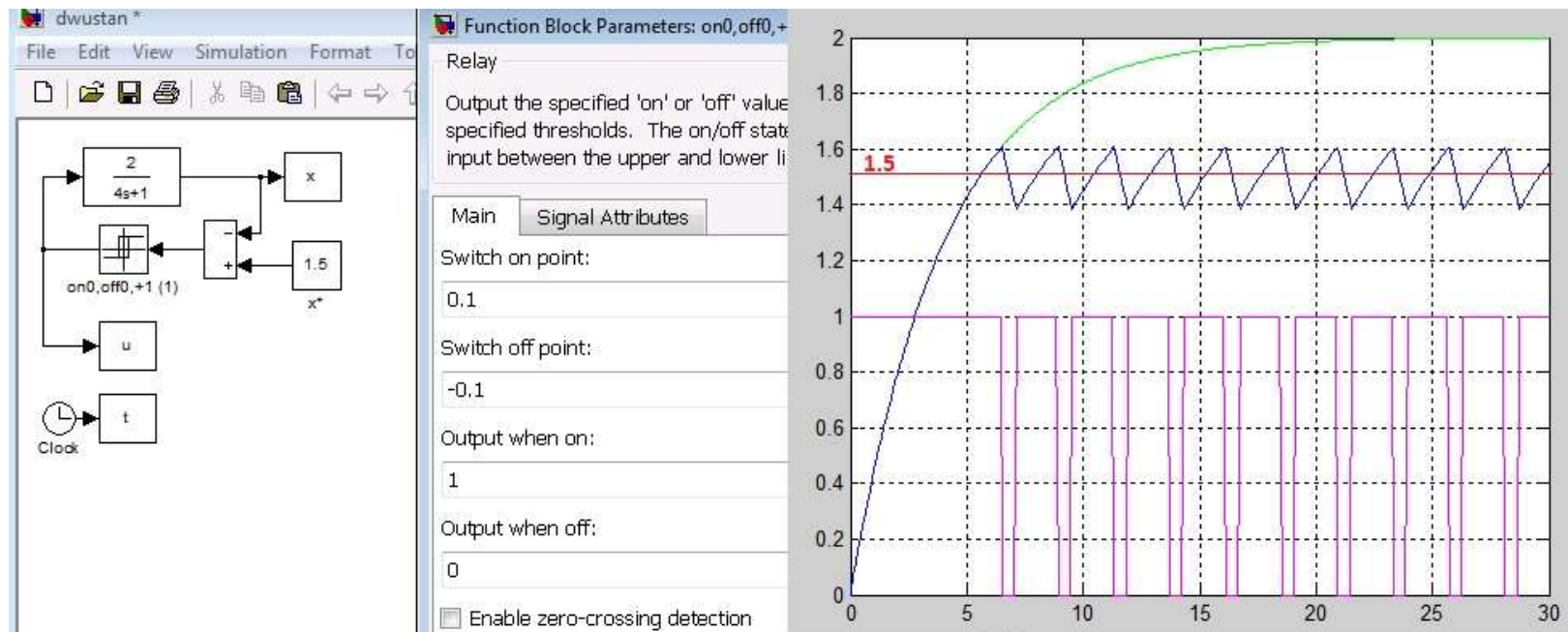


## Regulator dwupołożeniowy (przełącznikowy, binarny, włącz-wyłącz)



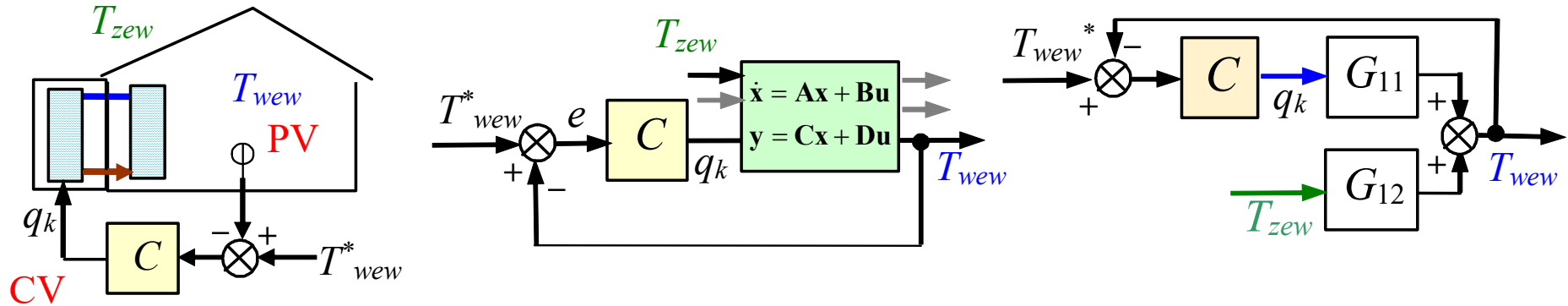
Własności (stan ustalony, błąd regulacji) zależą od:

- histerezy,
- wartości sygnału sterującego,
- inercji obiektu.

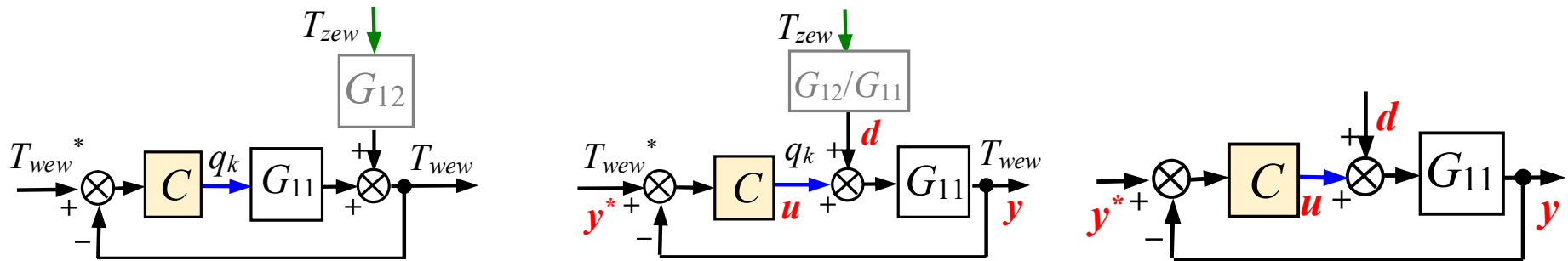


Simulink: relay

## Regulator ciągły PID



Układ regulacji na obiekcie



Układ regulacji na modelu

## Metody doboru nastaw (strojenia)

Metody oparte na modelu

- model PV/CV
- określona forma modelu
- określona metoda identyfikacji

Metody doświadczalne

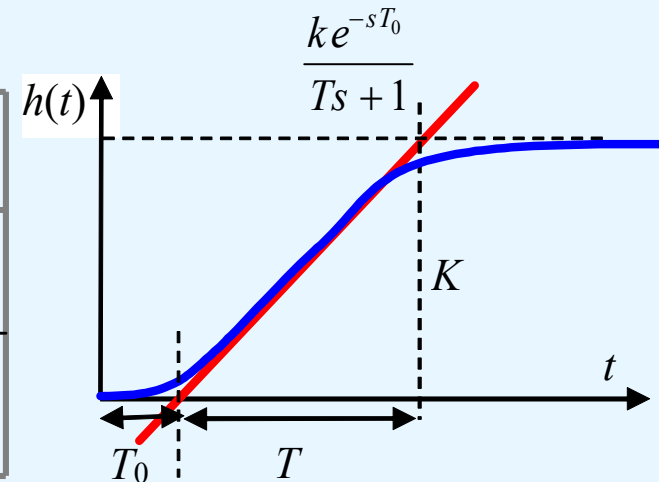
np. metody cyklu granicznego

## Dobór nastaw

### ► 2 metoda Zieglera-Nicholsa (Ziegler-Nichols step response)

- identyfikacja modelu (przy otwartej pętli)
- nastawy wg tabel dla różnych klas obiektów

Regulator	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>PI</b>	$\frac{0.9 T}{k T_0}$	$3.33 T_0$	
<b>PID</b>	$\frac{1.2 T}{k T_0}$	$2 T_0$	$0.5 T_0$

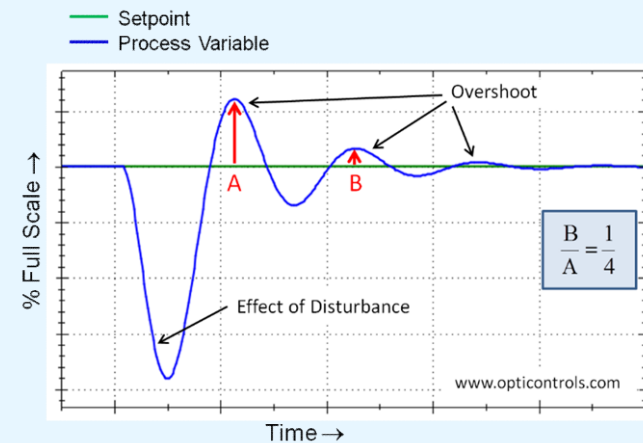


### Metoda QDR (Quarter-Decay Ratio)

- każde następne przeregulowane 4 razy mniejsze od poprzedniego

Uwagi:

- Esperyment Zieglera-Nicholsa (1942) zautomatyzowany w latach '70
- (+) prosty eksperyment
- (-) identyfikacja modelu obiektu przy rozwartej pętli regulacji
  - PID-kaskadowy (interaktywny), PI ISA
  - A jeśli  $T_0 \approx 0$ ?      A jeśli  $K$  jest ujemne?
  - „skłonność” do oscylacji (można stosować mniejsze wzmocnienie, np.  $K_p/2$ )



## Dobór nastaw

Ziegler-Nichols [Pid controllers; Astrom; Tab4.1]

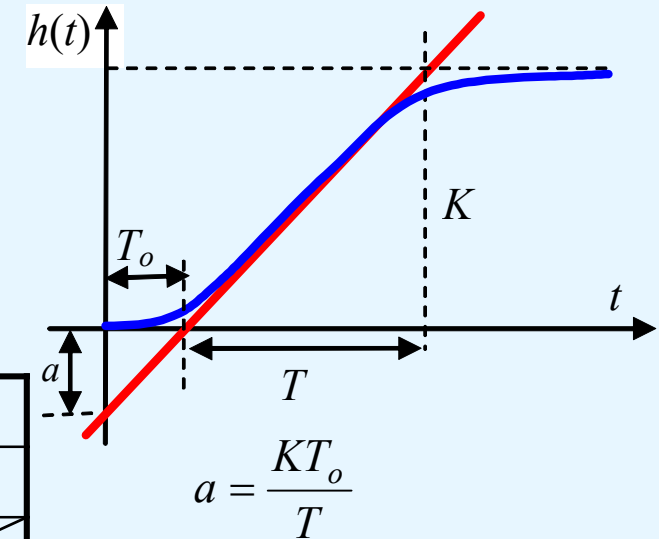
	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$1/a$	X	X
PI	$0.9/a$	$3T_o$	X
PID	$1.2/a$	$2T_o$	$T_o/2$

Chien, Hrones, Reswick [Pid controllers; Astrom; Tab4.4]

Przereg.	0%			20%		
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$k_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.3/a$	X	X	$0.7/a$	X	X
PI	$0.35/a$	$1.2T$	X	$0.6/a$	$T$	X
PID	$0.6/a$	$T$	$0.5T_o$	$0.95/a$	$1.4T$	$0.47T_o$

Cohen - Coon [Pid controllers; Astrom; Tab4.8]

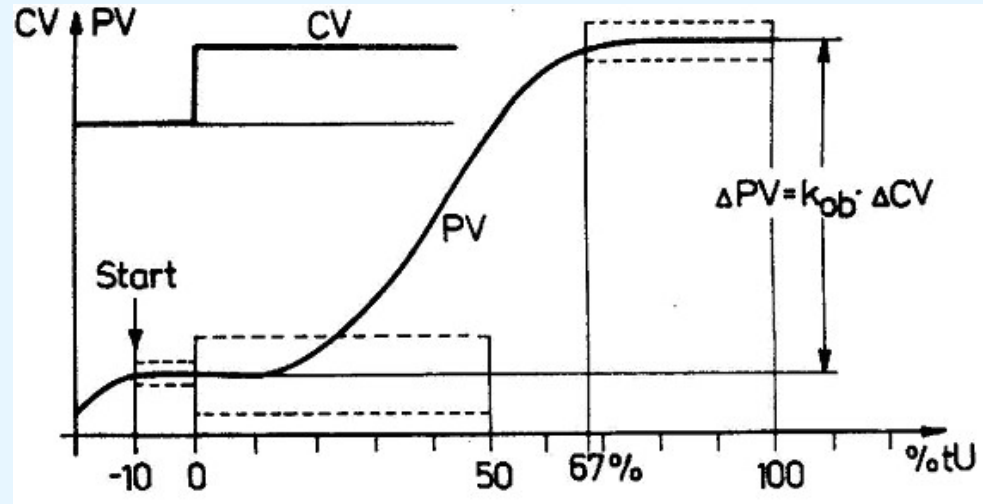
Reg.	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1}{a} \left( 1 + \frac{0,35\tau}{1-\tau} \right)$	X	X
PI	$\frac{0.9}{a} \left( 1 + \frac{0.92\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{3.3 - 3.0\tau}{1 + 1.2\tau} T_o$	X
PD	$\frac{1.24}{a} \left( 1 + \frac{0.13\tau}{1-\tau} \right)$	X	$\frac{0.27 - 0.36\tau}{1 - 0.87\tau} T_o$
PID	$\frac{1.35}{a} \left( 1 + \frac{0.18\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{2.5 - 3.0\tau}{1 - 0.39\tau} T_o$	$\frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau} T_o$



$$\tau = \frac{T_o}{T_o + T}$$

# Auto-tuning - SIPART

Metoda Preußa (Preussa)



- I. Sprawdzenie stałości PV przez okres 0.1 tU
- II. Wmuszenie skokowe CV i zapis odpowiedzi skokowej
- III. Zbadanie warunków wiarygodności eksperymentu
- IV. Obliczenie parametrów modelu Strejca  $G(s)=k/(Ts+1)^n$  (dla  $1 \leq n \leq 8$ )
- V. Wylczenie nastaw i sugestia algorytmu (PI lub PID)
- VI. Wybór algorytmu i akceptacja nastaw przez operatora

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Regulator PI $R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$	$\frac{1}{4K} \frac{n+2}{n-1}$	$\frac{T}{3} (n+2)$	
Regulator PID $R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$	$\frac{1}{16K} \frac{7n+16}{n-2}$	$\frac{T}{15} (7n+16)$	$\frac{T(n^2 + 4n + 3)}{7n+16}$

► 1 metoda Zieglera-Nicholsa (Ziegler-Nichols frequency response)

- nastaw działanie proporcjonalne
- zwiększaj wzmacnienie aż odpowiedź na skokowe/impulsowe wymuszenie to oscylacje o stałej amplitudzie – odczytaj okres oscylacji
- nastawy wg wzorów dla różnych regulatorów

Regulator	$k_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$0.5 k_{pkryt}$		
<b>PI</b>	$0.45 k_{pkryt}$	$0.85 T_{osc}$	
<b>PID</b>	$0.6 k_{pkryt}$	$0.5 T_{osc}$	$0.12 T_{osc}$

Dobre wyniki gdy  $2 < k \cdot k_{pkryt} < 20$   
(gdzie  $k$  obiektu)

PI kaskadowy (interaktywny) = PI ISA

PID kaskadowy (interaktywny)

Modyfikacja Pessena:  $k_p = 0.2k_{pkryt}$ ;  $T_i = 0.33T_{osc}$ ;  $T_d = 0.5T_{osc}$

Modyfikacja Hanssena-Offereinsa (eliminacja pomiaru  $T_{osc}$ ):

PI:

- ustaw tylko działanie P ( $T_i = \max$ )
- zwiększaj  $k_p$  do granicy stabilności;
- odczytaj  $k_{pkryt} \rightarrow$  ustaw  $k_p = 0,45 k_{pkryt}$
- zmniejszaj  $T_i$  do granicy stabilności;
- odczytaj  $T_{ikryt} \rightarrow$  ustaw  $T_i = 3T_{ikryt}$

PID:

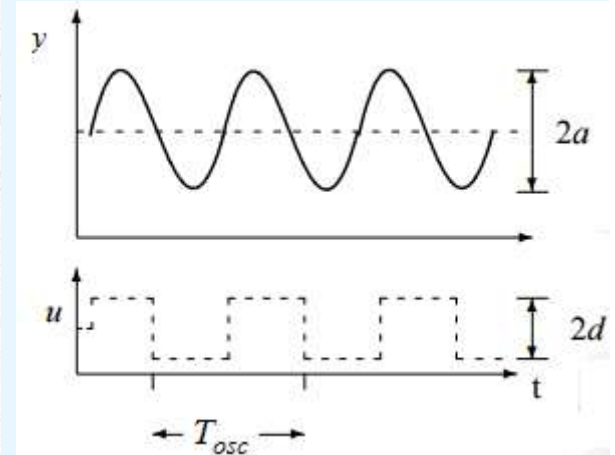
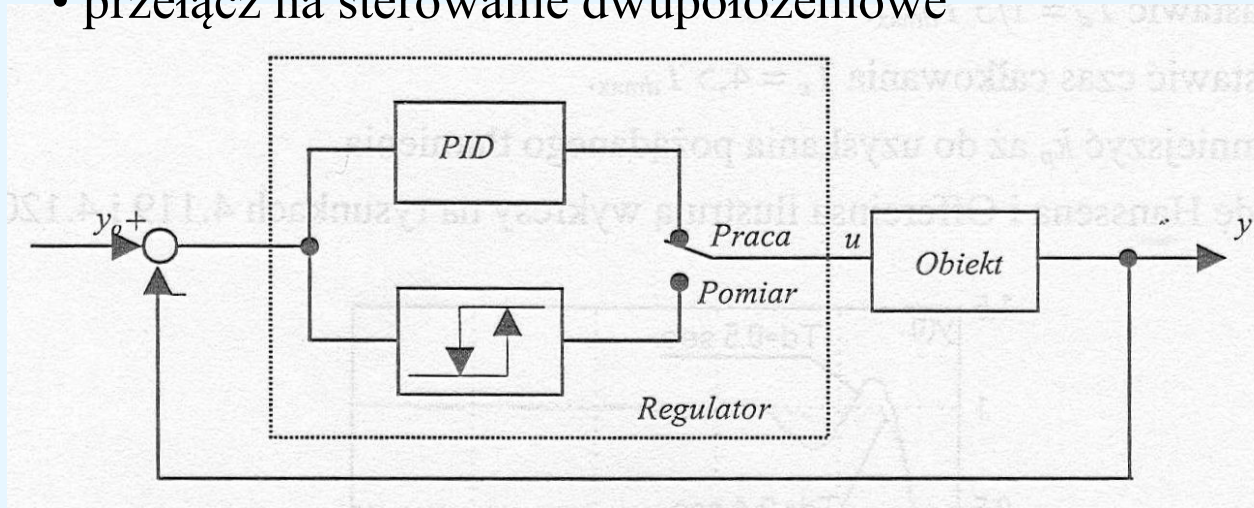
- dobierz nastawy dla działania PI
- zwiększaj  $T_d$  (do  $T_{dmax}$ ) do maksymalnego tłumienia
- ustaw  $T_d = 1/3 T_{dmax}$  oraz  $T_i = 4,5 T_{dmax}$
- zmniejszaj  $k_p$  do uzyskania pożądanego tłumienia



## Auto-tuning (samonastajanie)

- ▶ 1 metoda Zieglera-Nicholsa – modyfikacja Äströma-Hägglunda
  - przełącz na sterowanie dwupołożeniowe

[PID controllers; Astrom; Rys.6.4]



- wyznacz amplitudę i okres oscylacji:  $A_{osc} = 4d / (\pi a)$ ,  $T_{osc}$
- nastawy PID ZN na podstawie oscylacji i okresu wg [1] wg [2]

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
orginalne	$0.6A_{osc}$	$T_{osc}/2$	$T_{osc}/8$
małe przeregulowanie	$0.33A_{osc}$	$T_{osc}/2$	$T_{osc}/3$
bez przeregulowania	$0.2A_{osc}$	$T_{osc}/2$	$T_{osc}/3$

$$K_p = 0.35A_{osc}$$

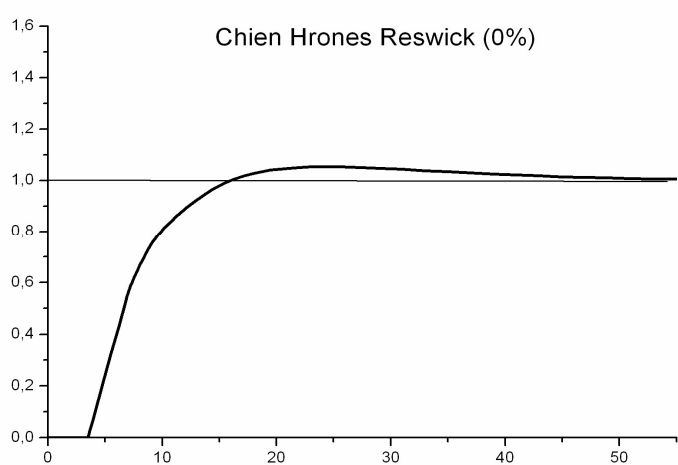
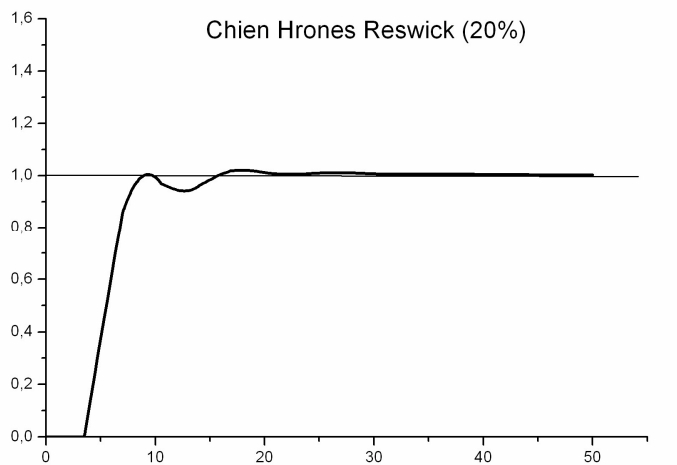
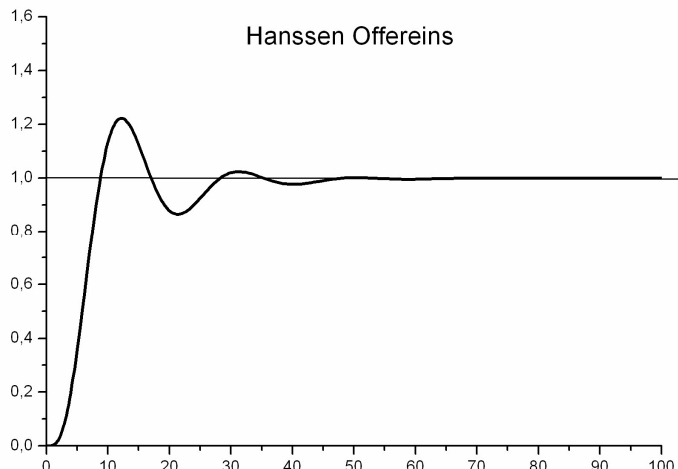
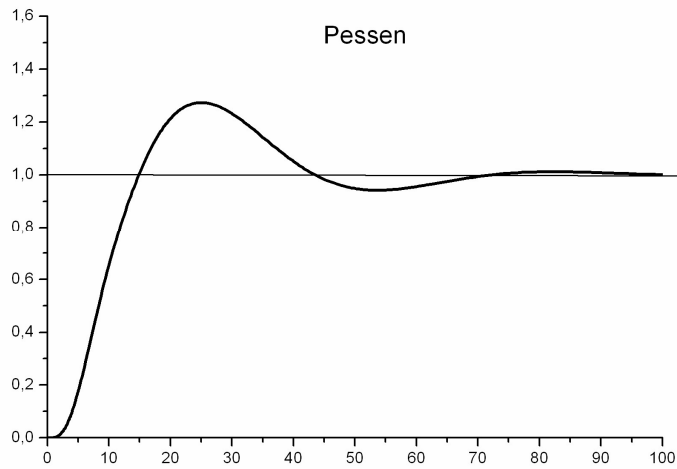
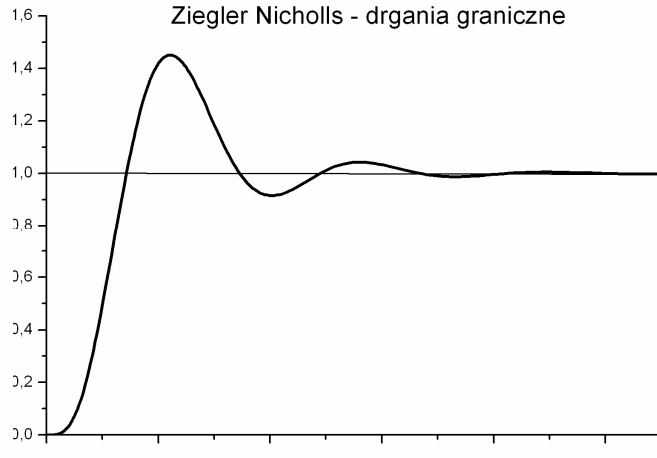
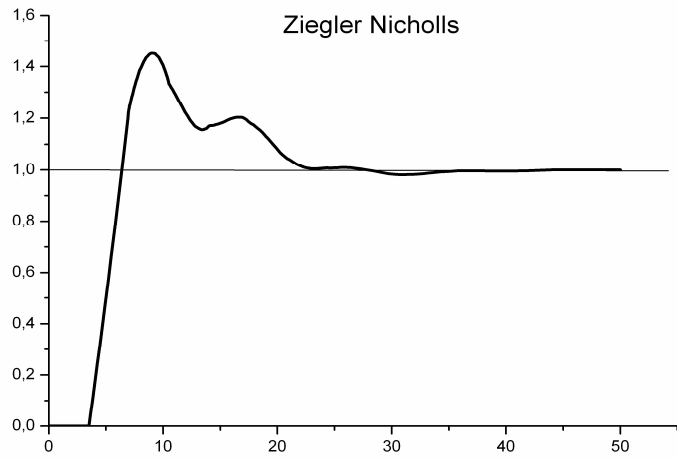
$$T_i = 0.77T_{osc}$$

$$T_d = 0.19T_{osc}$$

Karl Äström, Tore Hägglund, 1984, Institute of Technology Lund (Szwecja)  
 + bez rozwierania pętli  
 - konieczność wprowadzania układu w stan oscylacji

[1] [http://www.processcontrolstuff.net/wp-content/uploads/2015/02/relay\\_autot-2.pdf](http://www.processcontrolstuff.net/wp-content/uploads/2015/02/relay_autot-2.pdf)

[2] <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8847786&fileId=8859378>

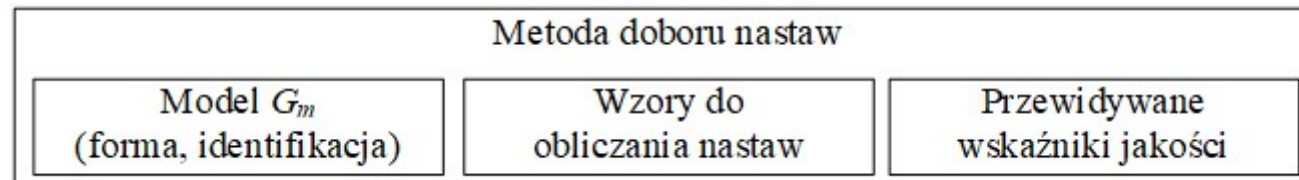




## Przegląd metod doboru nastaw (strojenia)

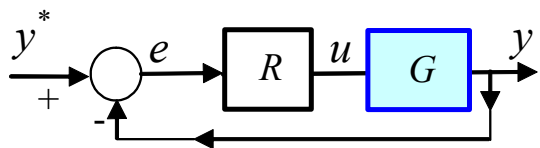
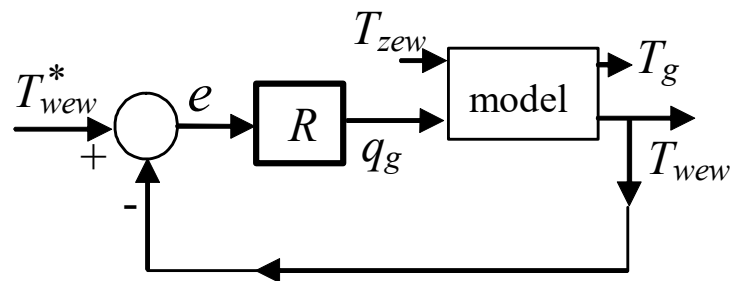
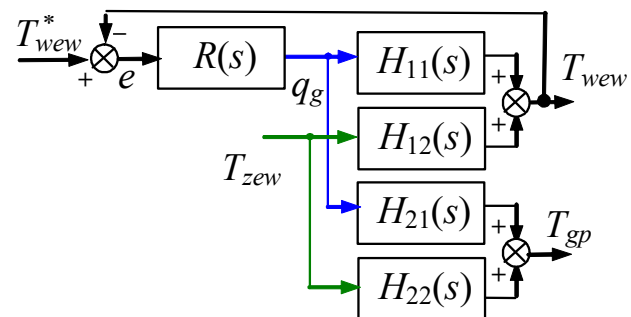
Aidan O'Dwyer; [Handbook of PI and PID controller tuning rules](#); ImperialCollege Press, London, 2009

	FOLPD z/bez zera	SOSPD z/bez zera	Inne stabilne	Nieokreśl.	Z całkowaniem	Niestabilne	
(2.3) PI ideal	<b>261</b>	63	58	59	90	32	563
(2.4) PID ideal	140	82	20	63	66	35	406
(2.6) Ideal z inercją	20	23	3	9	16	17	88
(2.7) PID z filtrowanym D	36	9	5	11	6	0	67
(2.8) Klasyczny	74	53	1	12	26	17	183
(2.11) Ogólny klasyczny	7	7	1	4	5	6	30
(2.12) 2DOF1	74	36	14	9	106	37	276
(2.16) 2DOF2	7	3	0	0	16	8	34
(2.17) 2DOF3	28	15	1	2	8	30	84
W sumie	<b>649</b>	<b>291</b>	<b>103</b>	<b>169</b>	<b>339</b>	<b>182</b>	<b>1731</b>



# Dobór nastaw PID

Która transmitancja jest potrzebna (ma być zidentyfikowana)?



Jaka struktura regulatora (w metodzie, na obiekcie)?

*Przeliczenie*

$$R_{IND} = k_p + \frac{1}{t_i s} + t_d s$$

$$R_{IND} = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s$$

$$R_{par} = P + I \frac{1}{s} + D \frac{Ns}{s + N}$$

$$R_{ISA} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$R_{ISA} = K_p \left( 1 + K_i \frac{1}{s} + K_d s \right)$$

$$R_{id} = P \left( 1 + I \frac{1}{s} + D \frac{Ns}{s + N} \right)$$

## 1. Identyfikacja modelu na podstawie odpowiedzi skokowej, np:

- model FOTD na podstawie punktu przegięcia
- model Strejca na podstawie punktu przegięcia

## 2. Autotuning (na podstawie odpowiedzi skokowej)

- przeprowadzenie eksperymentu
- identyfikacja modelu
- wyznaczenie nastaw

Uwagi:

– autotuning podczas symulacji „online”