# Ocena działania układu regulacji

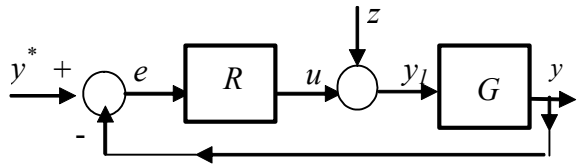
1) Ocenić stabilność:
   - *ocenić wrażliwość na zmianę nastaw*
   - *określić zapas stabilności (np. na charakterystykach częstotliwościowych)*

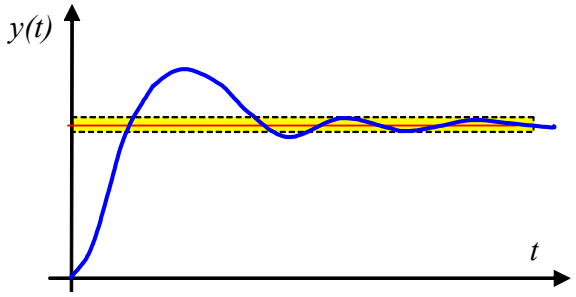
2) Ocenić jakość – wyznaczyć (zmierzyć) wartości wskaźników:
   - błąd statyczny (ustalony, końcowy)
   - błędy dynamiczne (błąd maksymalny, szybkość regulacji, ...)
   - inne, np. licznik energii

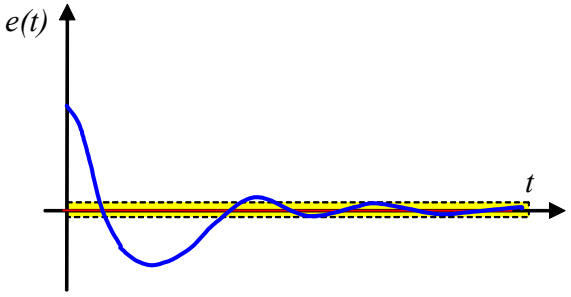
3) Optymalizować ....

---

Punkt pomiaru

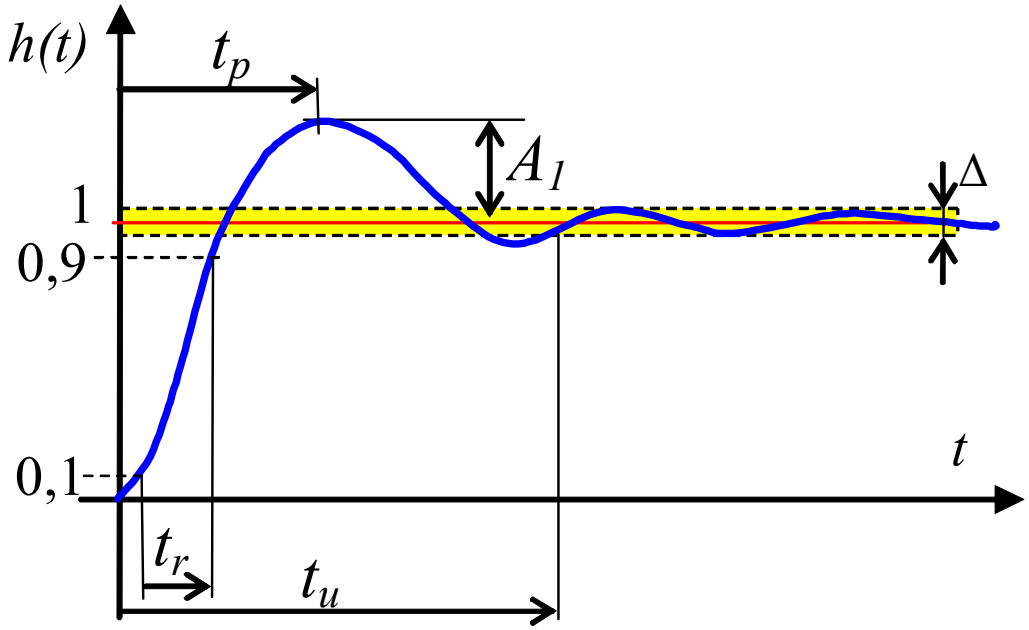


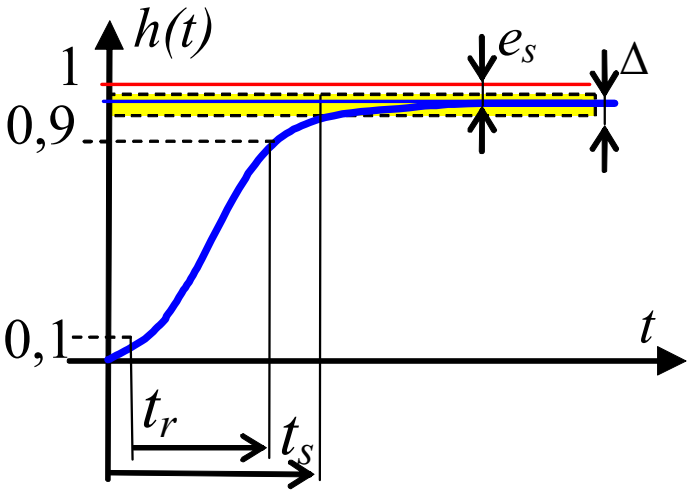



# Ocena jakości - wskaźniki bezpośrednie

## definicje




$e_s$ , $e_k$ - uchyb ustalony (końcowy)

$A_1$ - przeregulowanie ($e_1$ - max uchyb dynamiczny)

$t_p$ - czas pierwszego przeregulowania

$t_r$ - czas narostu

$t_{u,}$ - czas regulacji (czas ustalania)

Δ

$e_s$ – steady-state error

$M_p$ – overshoot

$t_p$ - peak time

$t_r$ – rise time

$t_s$ – settling time

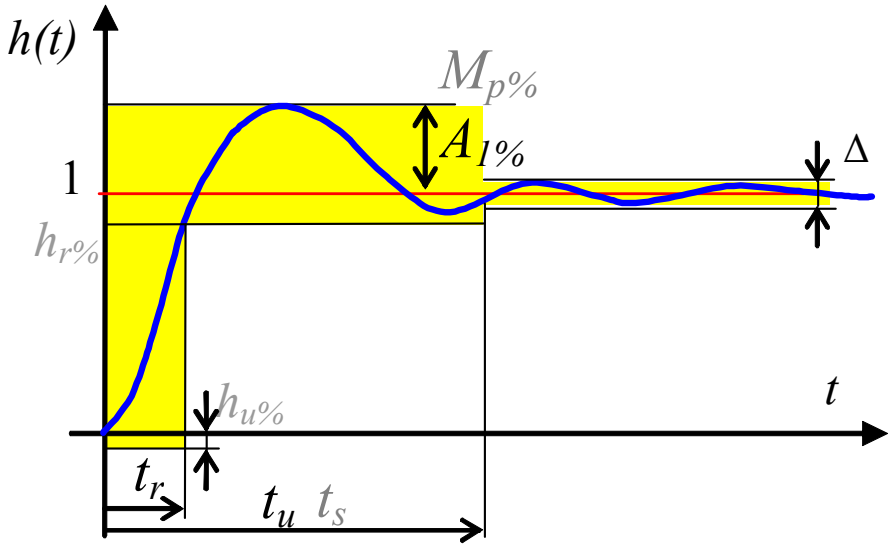
Δ = ±1% (±5%)

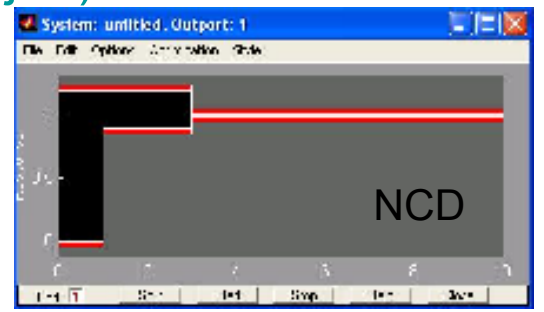
*Matlab: step*

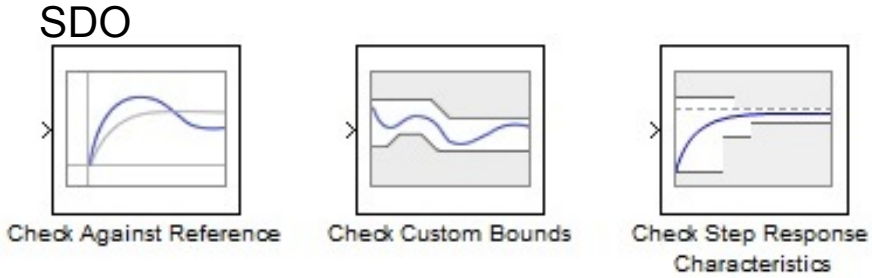
[Górecki/215] [Findeisen/117][Franklin/134 ]

# Ocena jakości - wskaźniki bezpośrednie

## projektowanie (metoda symulacyjna)




Settling time $t_s$=3
Precent settling Δ =1
Precent overshoot $M_{p\%}$ =20

Rise time $t_r$ =1
Precent rise $h_{r\%}$ =90
Precent undershoot $h_{u\%}$ =1

*Matlab: Nonlinear Control Design / NCD Output*
*Simulink Response Optimization / Signal Constrind Block*
*Simulink Design Optimization / Desired Step Response*

# Ocena jakości - wskaźniki całkowe

## definicje

Integral Error

$$I_{IE} = \int_0^\infty e(t)dt$$

w układach bez przeregulowania

I. of Squared Error

$$I_{ISE} = \int_0^\infty e^2(t)dt$$

oscylacyjność do 35%

$$\int_0^\infty \left(e^2(t) + a_1\dot{e}^2(t) + \ldots\right)dt$$

I.of Absolute Error

$$I_{IAE} = \int_0^\infty |e(t)|\,dt$$

oscylacyjność do 10%

I. of Absolute Error Multiplied by Time

$$I_{ITAE} = \int_0^\infty t\,|e(t)|\,dt$$

przebiegi aperiodyczne

I.of Absolute Error Multiplied by S.Time

$$I_{ISTAE} = \int_0^\infty t^2\,|e(t)|\,dt$$

krótki czas regulacji

[Amborski/354][Górecki/213]

# Ocena jakości - wskaźniki bezpośrenie i całkowe

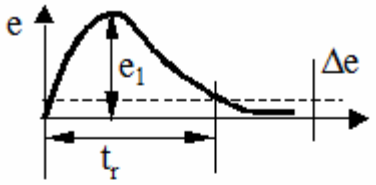
## projektowanie przez optymalizację wskaźników

| | PI | | PID | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Kryterium | $K_p$ | $T_i$ | $K_p$ | $T_i$ | $T_i$ |
| $\min \int_0^\infty e^2(t)dt$ | $\frac{T}{kT_o}$ | $T_o + 3.33T$ | $\frac{1.4T}{kT_o}$ | $1.3T_o$ | $0.5T_o$ |
| $\min t_r$<br>$M_p = 0\%$ | $\frac{0.6 \cdot T}{kT_o}$ | $0.8T_o + 0.5T$ | $\frac{0.95T}{kT_o}$ | $2.4T_o$ | $0.4T$ |
| QDR | | | | | |

# Ocena jakości - wskaźniki bezpośrenie i całkowe

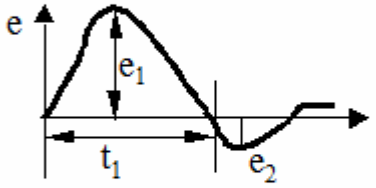
## projektowanie przez optymalizację wskaźników

a) przebieg aperiodyczny



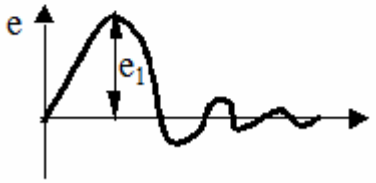

$\Delta e = 0.05 e_s$
minimum $t_r$

b) przeregulowanie 20%
oscylacyjność




$e_2/e_1 = 0.2$
minimum $t_r$ (albo minimum $t_1$)

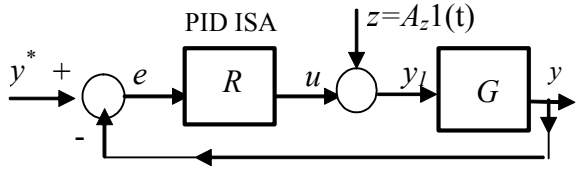
c) minimum ISE




$$I_{ISE} = \int_0^\infty e^2(t)dt \rightarrow \min$$

$$G = \frac{ke^{-T_0 s}}{Ts+1}$$

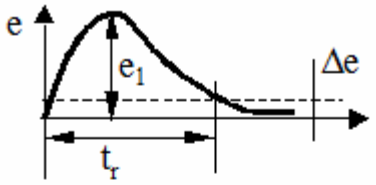
| Kr. | R | Optymalne nastawy | | | Wskaźnik jakości | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $K_p$ | $T_i$ | $T_d$ | $\frac{t_r}{T_0}$ | $\frac{e_1}{kA_z}$ | $\frac{e_u}{kA_z}$ | $\frac{I_{ISE\min}}{T_0 kA_z}$ |
| a | P | $\frac{0.3}{kT_0/T}$ | - | | 4.5 | $\frac{T_0/T}{0.3+T_0/T}$ | $\frac{T_0/T}{0.3+T_0/T}$ | - |
| | PI | $\frac{0.6}{kT_0/T}$ | $0.8T_0+0.5T$ | | 8 | $0.1+T_0/T$ | 0 | - |
| | PID | $\frac{0.95}{kT_0/T}$ | $2.4T_0$ | $0.4T_0$ | 5.5 | $0.06+0.84T_0/T$ | 0 | - |
| b ($t_r$) | P | $\frac{0.7}{kT_0/T}$ | - | | 6.5 | $\frac{1.2T_0/T}{0.7+T_0/T}$ | $\frac{T_0/T}{0.7+T_0/T}$ | - |
| | PI | $\frac{0.7}{kT_0/T}$ | $T_0+0.3T$ | | 12 | $0.05+0.95T_0/T$ | 0 | - |
| | PID | $\frac{1.2}{kT_0/T}$ | $2.0T_0$ | $0.4T_0$ | 7 | $0.05+0.78T_0/T$ | 0 | - |
| c | P | - | - | | - | - | - | - |
| | PI | $\frac{1.0}{kT_0/T}$ | $T_0+0.35T$ | | 16 | $0.03+0.9T_0/T$ | - | $0.03+0.5T_0/T$ |
| | PID | $\frac{1.4}{kT_0/T}$ | $1.3T_0$ | $0.5T_0$ | 10 | $0.05+0.7T_0/T$ | - | $0.07+0.22T_0/T$ |



# Ocena jakości - wskaźniki bezpośrenie i całkowe

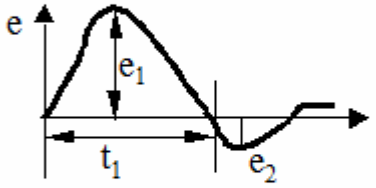
## projektowanie przez optymalizację wskaźników

a) przebieg aperiodyczny



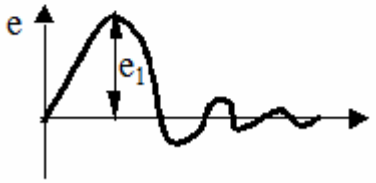

$\Delta e = 0.05 e_s$
minimum $t_r$

b) przeregulowanie 20%
oscylacyjność




$e_2/e_1 = 0.2$
minimum $t_r$ (albo minimum $t_1$)

c) minimum ISE




$$I_{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \rightarrow \min$$

$$G = \frac{ke^{-T_0 s}}{s(Ts+1)}$$

| Kr. | R | Optymalne nastawy | | | Wskaźnik jakości | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $K_p$ | $T_i$ | $T_d$ | $\frac{t_r}{T_0}$ | $\frac{e_1 T}{kA_z T_0}$ | $\frac{e_u}{kA_z}$ | $\frac{I_{ISEmin}}{T_0 kA_z}$ |
| a | P | $\frac{0.37}{T_0/T}$ | - | | 5.5 | 2.7 | $\frac{1}{K_p}$ | - |
| | PI | $\frac{0.46}{T_0/T}$ | $5.75T_0$ | | 13.2 | 1.9 | 0 | - |
| | PID | $\frac{0.65}{T_0/T}$ | $5T_0$ | $0.23T_0$ | 9.8 | 1.38 | 0 | - |
| b ($t_r$) | P | $\frac{0.7}{T_0/T}$ | - | | 7.5 | 1.43 | $\frac{1}{K_p}$ | - |
| | PI | $\frac{0.7}{T_0/T}$ | $3T_0$ | | 15 | 1.62 | 0 | - |
| | PID | $\frac{1.1}{T_0/T}$ | $2T_0$ | $0.37T_0$ | 12 | 1.12 | 0 | - |
| c | P | - | - | | - | - | - | - |
| | PI | $\frac{1}{T_0/T}$ | $4.3T_0$ | | 18 | 1.44 | - | - |
| | PID | $\frac{1.36}{kT_0/T}$ | $1.6T_0$ | $0.5T_0$ | 15 | 1.03 | - | - |

# Ocena jakości regulacji:

## I. Kryteria dla standardowego sygnału zewnętrznego

- bezpośrednie parametry odpowiedzi skokowej
  - uchyb ustalony
  - przeregulowanie (max uchyb dynamiczny)
  - oscylacyjność
  - czas regulacji
- całkowe wskaźniki odpowiedzi skokowej
  - IE, ISE, ISEG, IAE, ITAE

## II. Kryteria uniwersalne

- położenie pierwiastków
- parametry ch.częstotliwościowych
  - układu zamkniętego
  - układu otwartego

kryteria dla sygnału standardowego ⇔ kryteria uniwersalne

[Amborski/192,308][Findeisen/104][Górecki/206]

# Ocena jakości regulacji:

(narzędzia wspomagające w Matlabie)

## I. Kryteria dla standardowego sygnału zewnętrznego

1) Funkcje wspomagające (CACSD), np.:
   - rysowanie wykresów - step(), impulse(), ...
   - badanie zmienności funkcji

2) Narzędzia interaktywne, np.:

   - Simulink Design Optimization: Response Optimization →
     dobór nastaw za pomocą uniwersalnych metod optymalizacji

   - Simunik Control Design: PID Turner, SISO Design →

   - Control System Toolbox: ltiview, pidtool, sisoinit, sisotool →