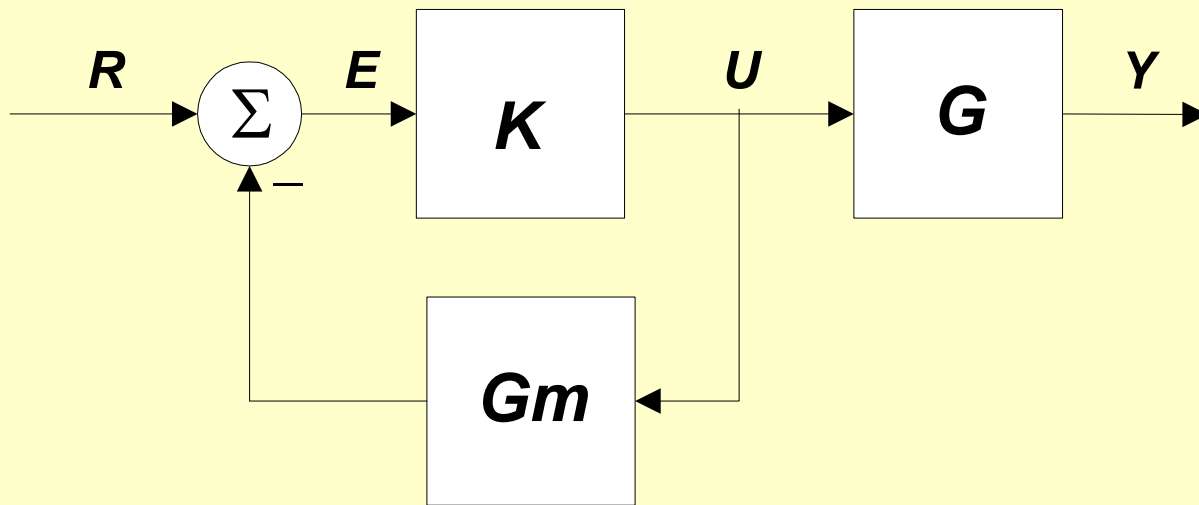


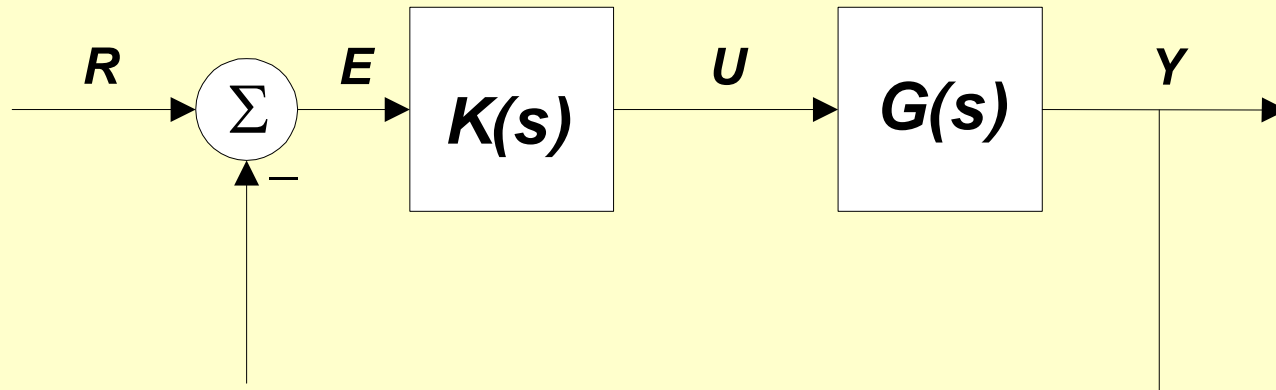
Structura sistemului de reglare automată a temperaturii dintr-o clădire

- *Feedback* (legătura inversă negativă de la temperatura interioară a clădirii)
- *Feedforward* (legătura directă de la temperatura exterioară clădirii)
- Conectarea în *cascadă* a sistemului de reglare automată a temperaturii și a sistemului de reglare automată a poziției robinetului
- Memorarea modelului invers de pornire - oprire *secvențială* sau în *paralel* al cazanelor

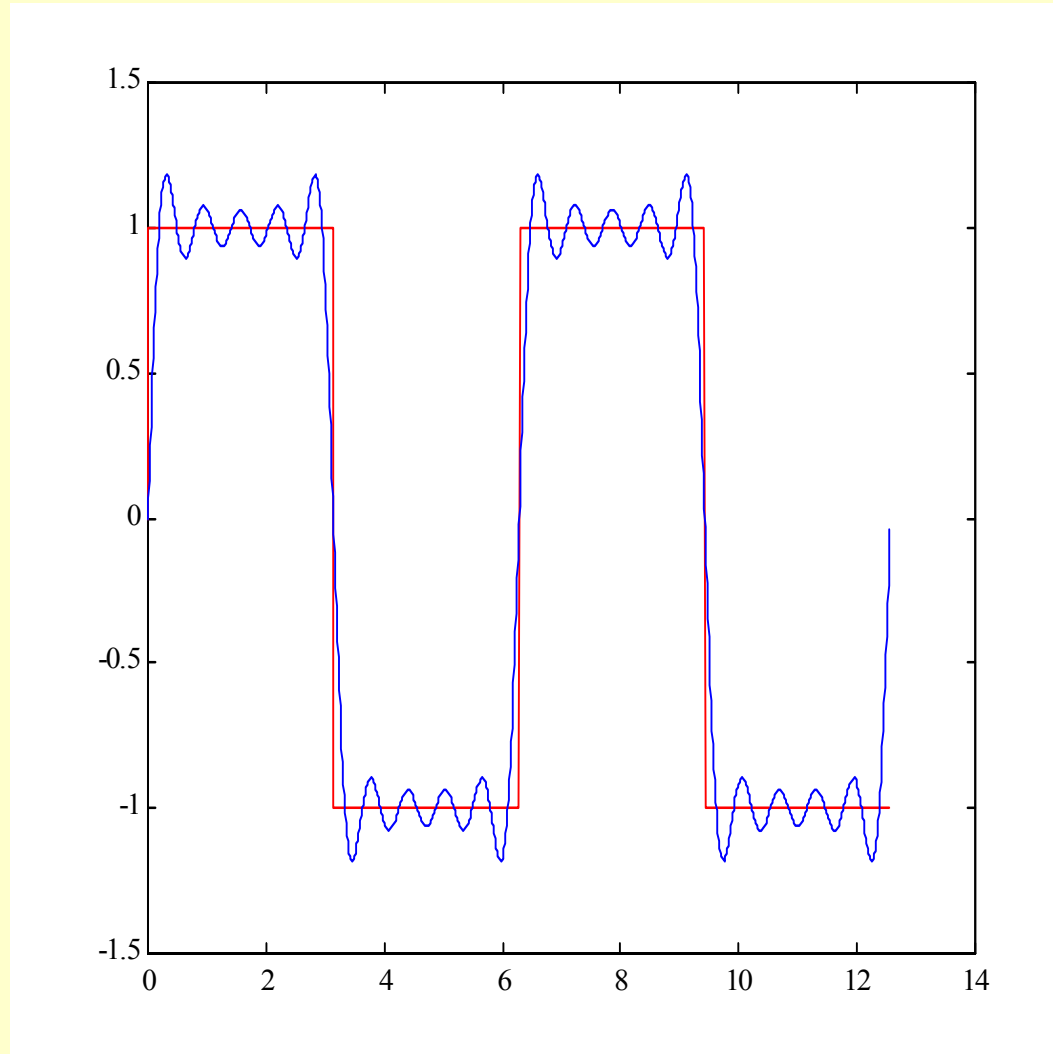
Memorarea și inversarea se poate și face printr-o legătură inversă negativă



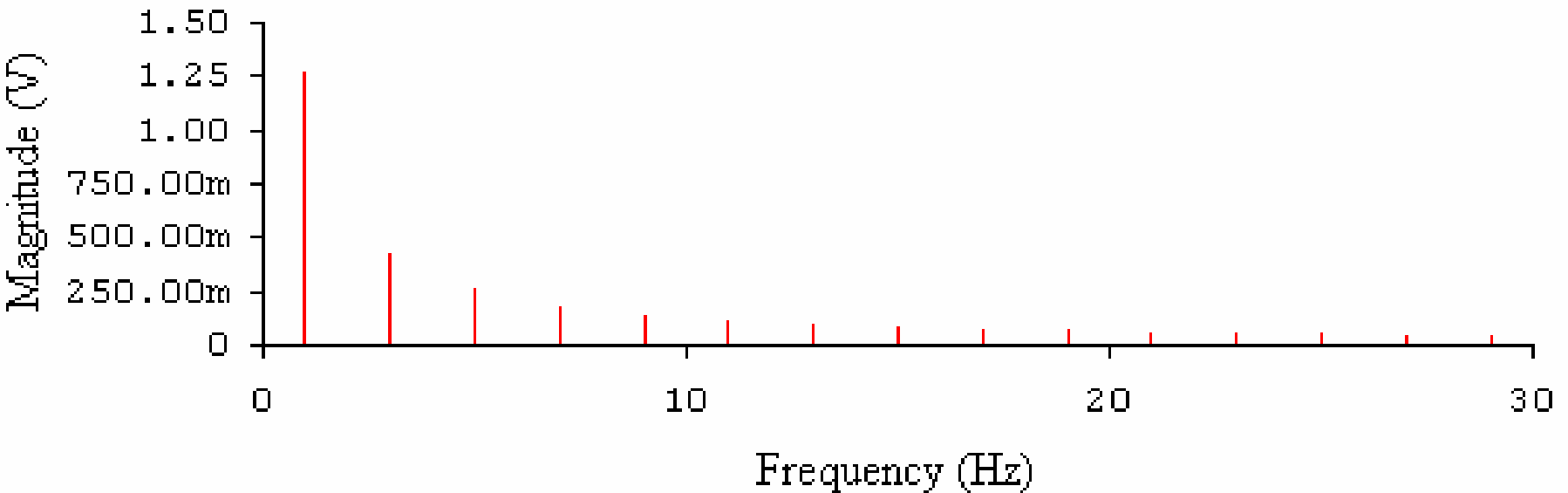
Dacă $G_m(s) = G(s)$ se obține schema echivalentă
tip buclă cu compensator $K(s)$ și proces $G(s)$



Analiza Fourier până la armonica 9 a unui semnal rectangular de amplitudine 1V



Spectrul Fourier de amplitudini a unui semnal rectangular de 1 V și 1 Hz



Funcția de transfer $H_u(s)$ a sistemului automat și sensibilitatea sa $S(s)$

$$H_u(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G(s)}$$

$$S(s) = \frac{\frac{dH_u(s)}{H_u(s)}}{\frac{dG(s)}{G(s)}} = \frac{dH_u}{dG} \frac{G}{H_u}$$

Semnalul sinusoidal în domeniul frecvență

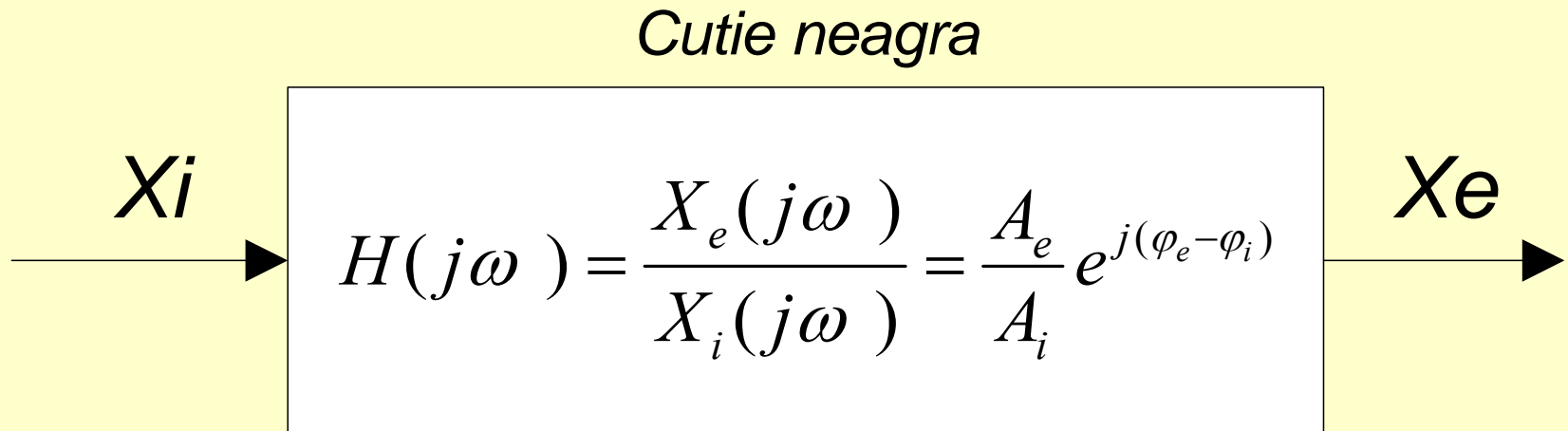
$$s = \sigma + j\omega$$

- Răspunsul unui sistem liniar la un semnal sinusoidal este tot un semnal sinusoidal, cu aceeași frecvență, dar cu amplitudinea și faza diferită.
- Semnalul sinusoidal în domeniul timp și în domeniul frecvență:

$$x_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$X_1(s) = X_1(j\omega) = A_1 e^{j\varphi_1} \frac{\pi}{j} [\delta(\omega - \omega_1) - \delta(\omega + \omega_1)]$$

Funcția de transfer pentru semnale sinusoidale



Sensibilitatea $S(s)$ și sensibilitatea complementară $T(s)$ a sistemului automat

$$S(s) = \frac{1}{1 + K(s)G(s)} = \frac{1}{1 + L(s)}$$

$$T(s) = \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G(s)}$$

$$S(s) + T(s) = 1$$

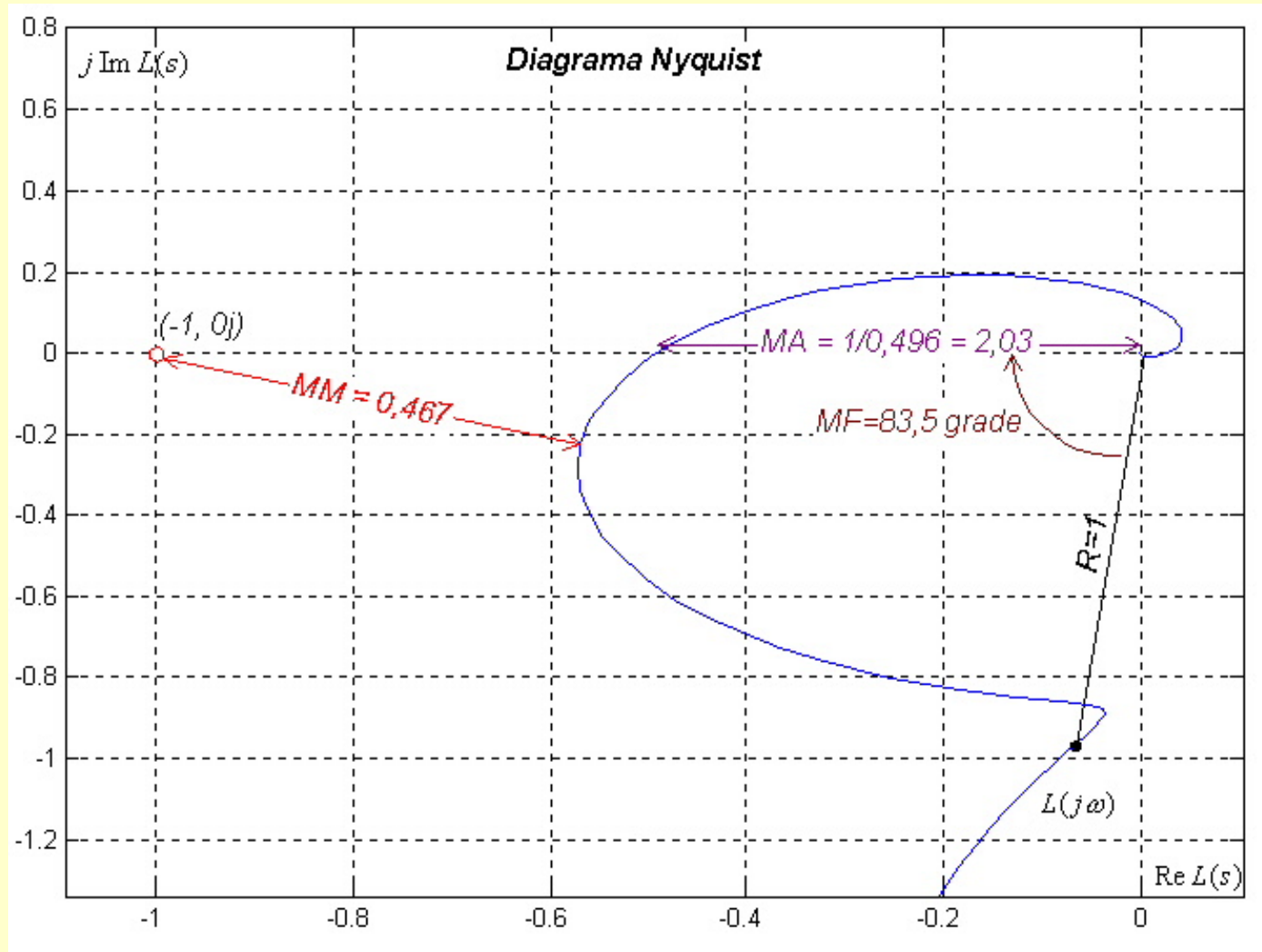
Exemplu de proces $G(s)$ și compensator $K(s)$ tip PID serie cu filtrarea componentei derivativă

$$G(s) = \frac{e^{-0,4s}}{(s+1)^4}$$

$$K(s) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \frac{T_d s + 1}{\alpha T_d s + 1} = 1,195 \left(1 + \frac{1}{3,23s} + 2,3s \right) \frac{1}{0,2s + 1}$$

$$L(j\omega) = K(j\omega)G(j\omega)$$

Stabilitatea și robustețea sistemului automat cu ajutorul hodografului Nyquist al lui $L(j\omega)$



Proiectarea pe baza de reguli pentru asigurarea stabilității, robusteții și performanțelor

$$MM = \frac{1}{|S(j\omega)|_{\max}}$$

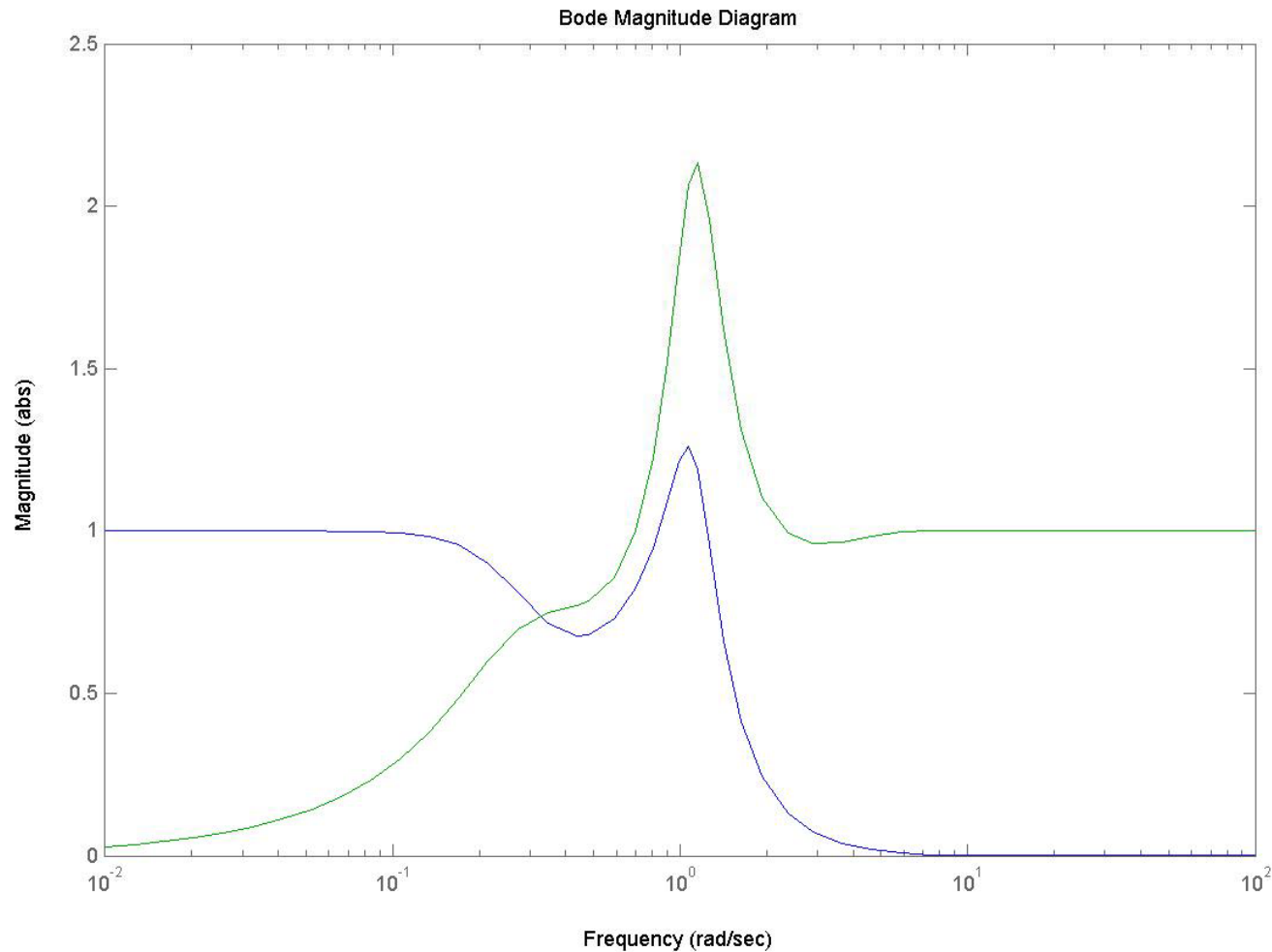
MA > 2 (6dB), cel puțin 1,6 (4dB)

$60^\circ > MF > 30^\circ$

MM ≥ 0.5 (−6dB), cel puțin 0,4 (−8dB)

Robustete și performante $0,5 < MM \leq 2$

Diagrama Bode a sensibilității $S(s)$ și a sensibilității complementare $T(s)$. Patul de apă



Performanțele sistemului de ordin doi în domeniul frecvență cu diagrama Bode a lui T(s)

$$W^k = \frac{5\zeta^2 \sqrt{1-\zeta^2}}{J}$$

Amplitudinea maxima

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2\zeta^2}$$

Pulsatia de rezonanta

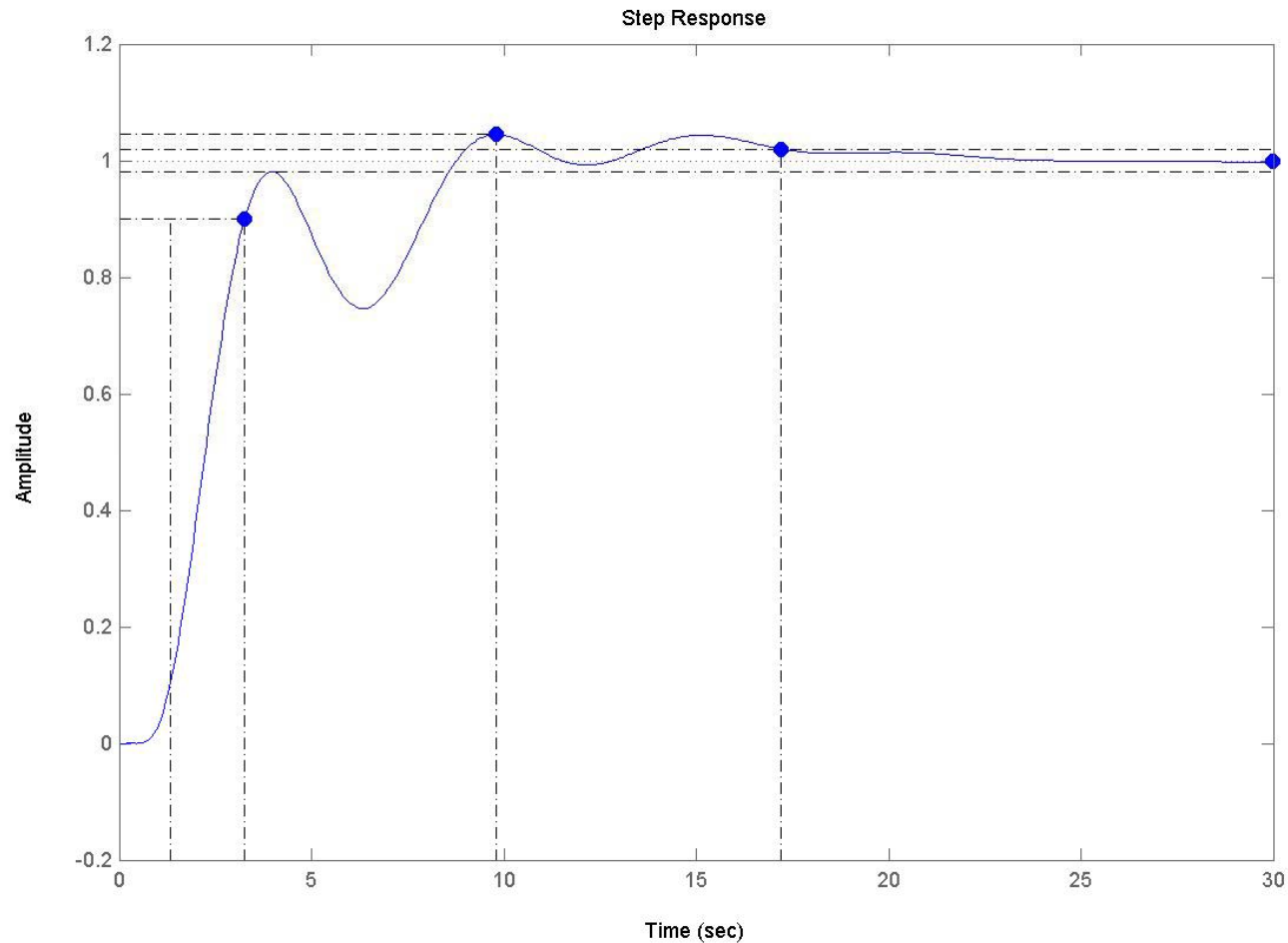
$$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

Pulsatia proprie

$$\omega_b \cong \omega_n \quad \text{pentru} \quad \zeta = 0,5..0,8$$

Banda de trecere

Determinarea performanțelor în domeniul timp cu ajutorul răspunsului la treaptă unitară



Performanțele sistemului de ordin doi în domeniul timp pentru răspunsul indicial

$$H_u(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\sigma = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$\delta = \sigma^2$$

$$t_t = \frac{3}{\zeta\omega_n}$$

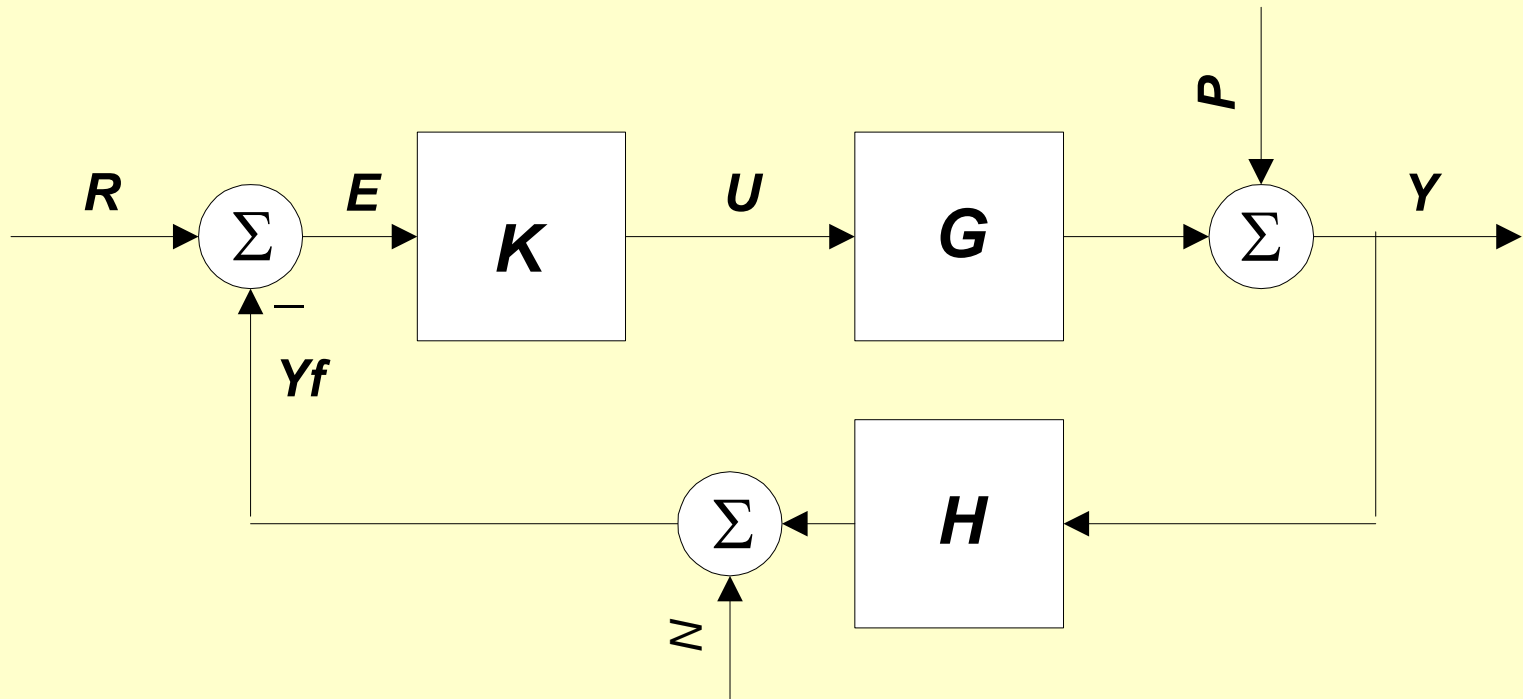
$$t_c = \frac{2,16\zeta + 0,60}{\omega_n}$$

Răspunsul la un semnal treaptă unitară (indicial) al sistemului de ordin doi

$$y^1(t) = u^1(t) \left\{ 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos\left[(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2})t - \varphi\right] \right\}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

Schema bloc a sistemului automat cu referința R , perturbația P , traductorul H și zgomotul N



Proiectarea pentru asigurarea performanțelor pe baza analizei sistemului automat cu regulator

$$Y(s) = T(s)R(s) + S(s)P(s) - T(s)N(s)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) - N(s) = S(s)[R(s) - P(s) - N(s)]$$

$$U(s) = K(s)E(s) = \frac{T(s)}{G(s)} [R(s) - P(s) - N(s)]$$

Eroarea indicială staționară și marginea de modul MM pentru un sistem automat

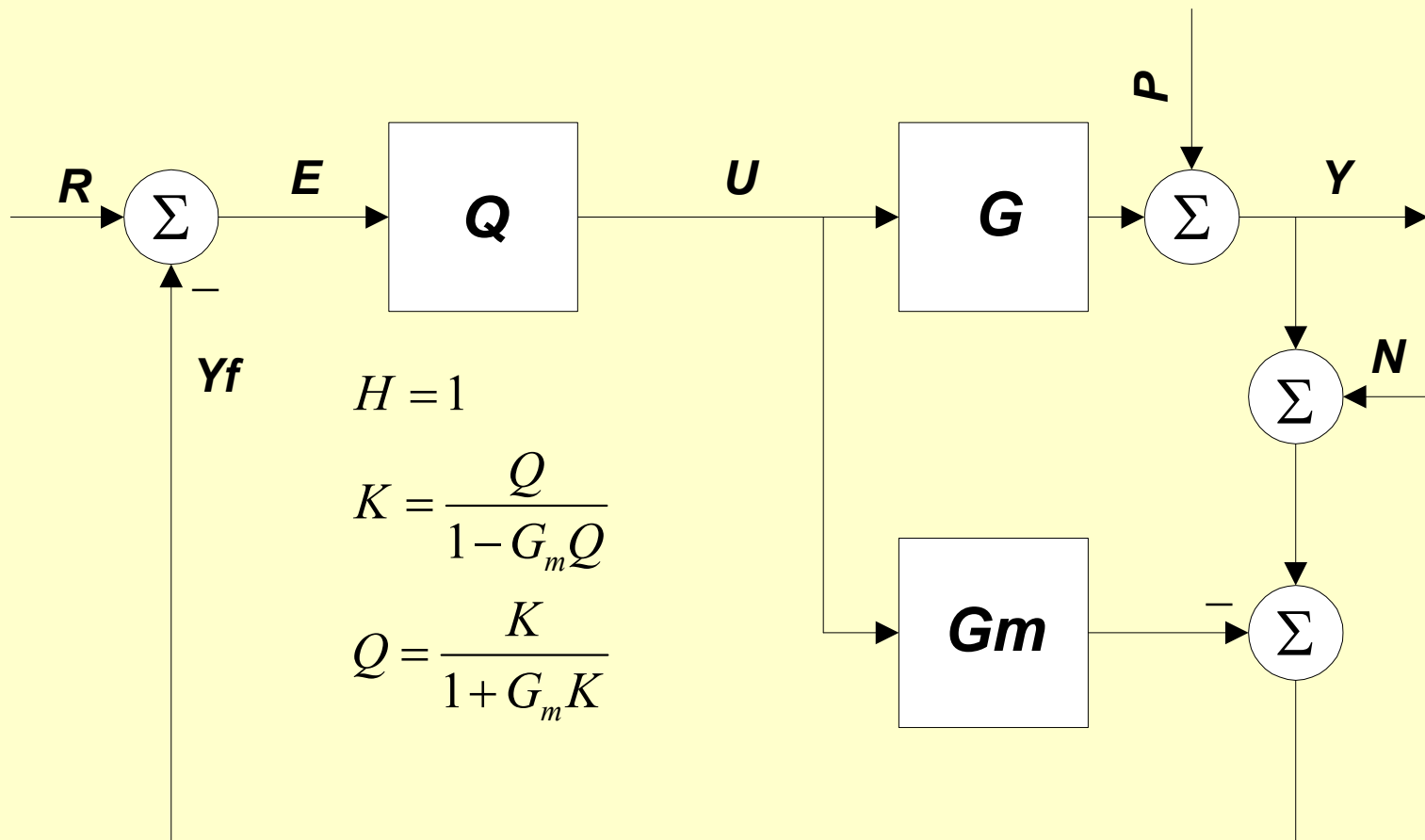
$$E^1(s) = S(s)R^1(s) = S(s)\frac{1}{s}$$

$$e_{st}^1 = \lim_{t \rightarrow \infty} e^1(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E^1(s) = \lim_{s \rightarrow 0} S(s)$$

$$MM = \left| 1 + L(j\omega) \right|_{\min} = \frac{1}{\left| S(j\omega) \right|_{\max}}$$

Bucła echivalentă cu regulator cu model intern

G_m evidențiază eroarea de modelare



Trei regimuri de funcționare ale sistemului automat:

- Urmărire, pentru reproducerea referinței $P=0$, $N=0$.
- Reglare, pentru înlăturarea perturbațiilor $R=0$, $N=0$.
- Filtrare, pentru înlăturarea zgomotelor $P=0$, $R=0$.

$$Y = \frac{GQ}{1 + Q(G - G_m)} R + \frac{1 - G_m Q}{1 + Q(G - G_m)} P - \frac{GQ}{1 + Q(G - G_m)} N$$

Dacă modelarea instalației este perfectă $G_m = G$
performanțele se determină cu relațiile:

$$Y = G_m Q R + (1 - G_m Q) P - G_m Q N$$

$$U = Q R - Q P - Q N$$

$$E = (1 - G_m Q) R - (1 - G_m Q) P - (1 - G_m Q) N$$

$$Q = \frac{1}{G_m} \quad Q = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \frac{1}{G_{m1}}$$

Proiectarea compensatorului pentru modelul Strejc cu timp mort

$$G_m = \frac{K_p e^{-\tau s}}{(Ts + 1)^n} \quad ; \quad G_{m1} = \frac{1}{(Ts + 1)^n}$$

$$Q = \frac{(Ts + 1)^n}{K_p (\lambda s + 1)}$$

$$K = \frac{Q}{1 - G_m Q} = \frac{1}{K_p} \frac{(Ts + 1)^n}{\lambda s + 1 - e^{-\tau s}} \quad e^{-\tau s} \cong 1 - \tau s$$

$$K = \frac{1}{K_p (\lambda + \tau)s} (Ts + 1)^n$$

Aproximarea cu un compensator PID ideal

$$(Ts + 1)^n \cong 1 + nTs + \frac{T}{2}nT^2(n-1)s^2$$

$$K = \frac{nT}{K_p(\lambda + \tau)} \left[1 + \frac{1}{nTs} + (n-1)\frac{T}{2}s \right]$$

$$K = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Acordarea Larionescu pentru regulatorul PID ideal și procesul Strejc

$$K_r = \frac{nT}{K_p(\lambda + \tau)} \quad \lambda \geq \tau$$

$$T_i = nT$$

$$T_d = (n - 1) \frac{T}{2}$$

Acordarea Ziegler și Nichols pentru regulatorul PID serie și proces Kupfmuller. Amortizare $\delta = \frac{1}{4}$

$$G_m = \frac{K_p e^{-\tau s}}{T_s s + 1}$$

$$K = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) (1 + T_d s)$$

| | K_r | T_i | T_d |
|-------|-------------------|------------------|-------------------|
| P | $\frac{1}{K_p}$ | $\frac{T}{\tau}$ | |
| PI | $\frac{0,9}{K_p}$ | $\frac{T}{\tau}$ | 3τ |
| PID | $\frac{1,2}{K_p}$ | $\frac{T}{\tau}$ | 2τ $0,5\tau$ |

Acordarea Cohen și Coon pentru regulatorul PID ideal și proces Kupfmuller. Amortizare $\delta = \frac{1}{4}$

$$G_m = \frac{K_p e^{-\tau s}}{T_s + 1}$$

$$K = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

K_r

T_i

T_d

P

$$\frac{1}{K_p} \frac{T}{\tau} \left[1 + \frac{\tau}{3T} \right]$$

PI

$$\frac{1}{K_p} \frac{T}{\tau} \left[1 + \frac{\tau}{3T} \right]$$

$$\frac{\tau [30T + 3\tau]}{9T + 20\tau}$$

PID

$$\frac{1}{K_p} \frac{T}{\tau} \left[1 + \frac{\tau}{3T} \right]$$

$$\frac{\tau [32T + 6\tau]}{13T + 8\tau}$$

$$\frac{4\tau T}{11T + 2\tau}$$