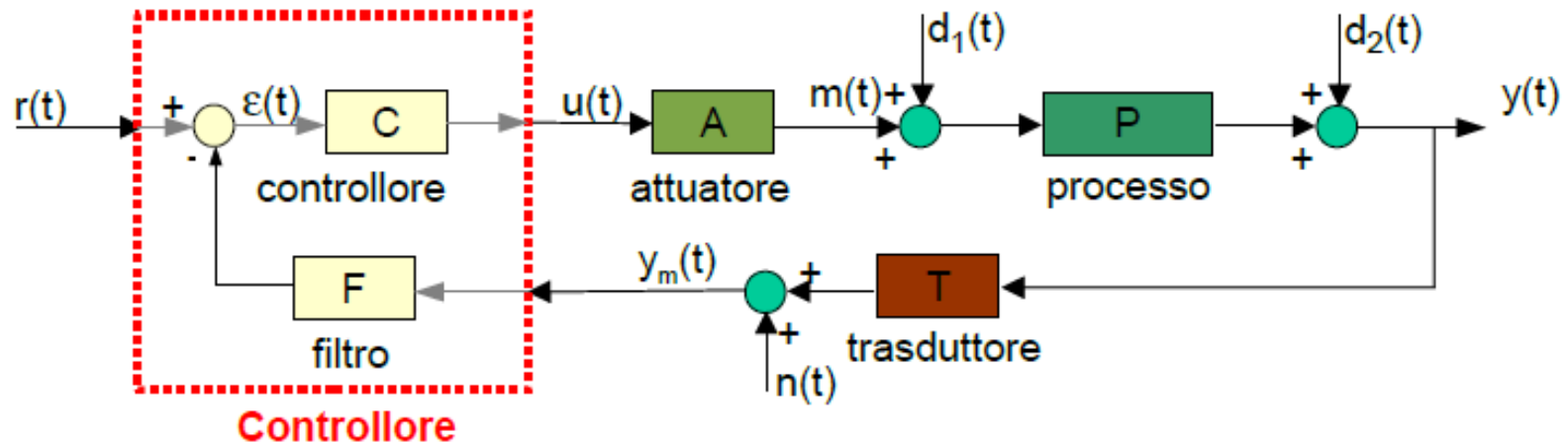


La taratura dei Regolatori PID

- Realizzazione dei regolatori
- La taratura dei regolatori
- Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso
- Metodo Ziegler-Nichols a ciclo aperto
- Condizioni di applicabilità

Realizzazione dei regolatori



Il controllore è inserito in anelli di controllo caratterizzati da componenti estremamente variabili.

L'impianto è considerato tutto ciò che è esterno al Controllore.

Il Filtro in ingresso al Controllore ha il compito di adattare i segnali provenienti dall'impianto alle caratteristiche realizzative del Controllore e, eventualmente, inserire un coefficiente di guadagno.

Realizzazione dei regolatori



Regolatore pneumatico – Museo della scienza di Milano

Regolatore elettronico – DIEE Laboratorio di Automatica

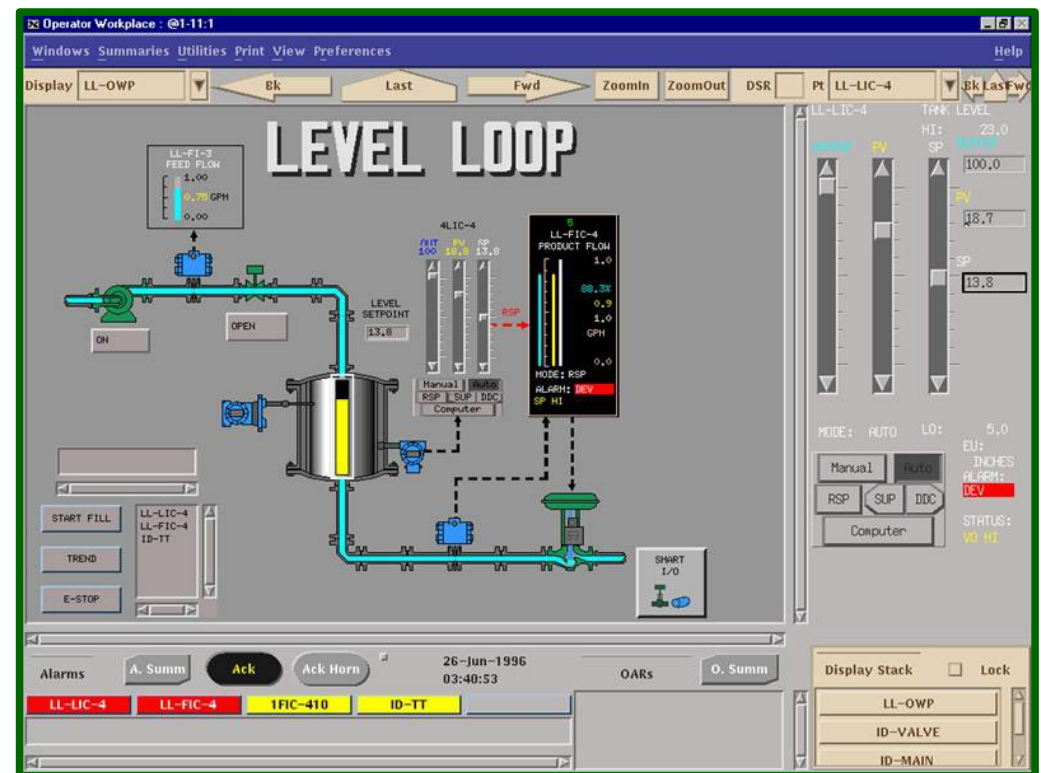


Realizzazione dei regolatori



Regolatore digitale discreto
(realizzazione via microprocessore)

Regolatore digitale su DCS
(realizzazione via software)



Realizzazione dei regolatori

Tranne per esigenze particolari i controllori sono attualmente realizzati in forma digitale mediante microprocessori

$$u(t) = k_P e(t) + k_I \int e(\tau) d\tau + k_D \frac{d e(t)}{d t}$$

$$x_k = x(kT)$$

Campionamento dei segnali con periodo T

$$\left[\frac{d e}{d t} \right]_{t=kT} \approx \frac{e_k - e_{k-1}}{T}$$

Approssimazione della derivata

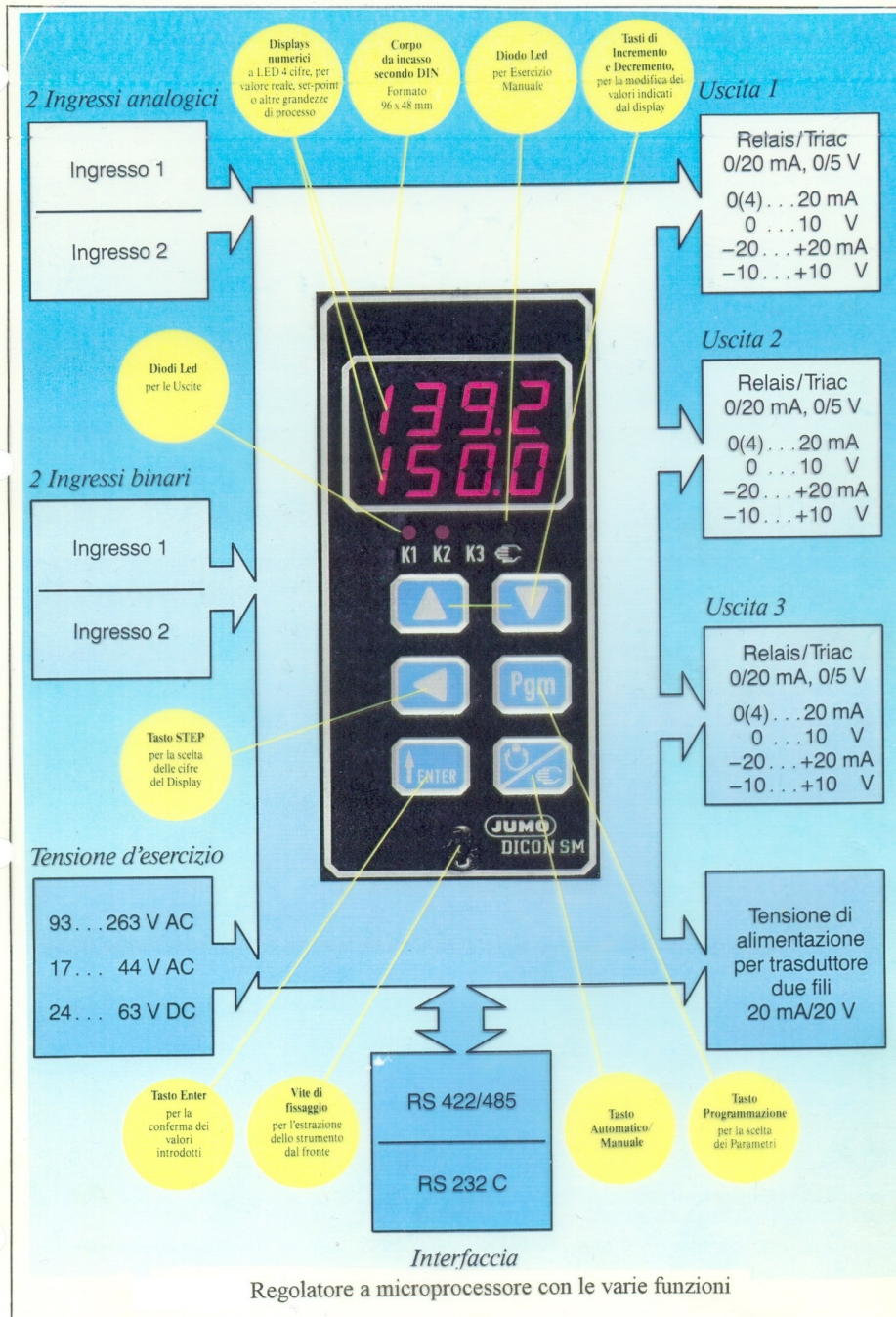
$$\int_{t=0}^{kT} e(\tau) d\tau \approx T \sum_{j=0}^{k-1} e_j$$

Approssimazione dell'integrale

$$u_k = u_{k-1} + k_P (e_k - e_{k-1}) + k_I T e_{k-1} + k_D \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T}$$

La realizzazione digitale dei controllori è accettabile solo se il periodo di campionamento T è molto inferiore alle costanti di tempo caratterizzanti il sistema (rif. minimo: il teorema del campionamento)

Realizzazione dei regolatori



- Realizzati in forma digitale
- Possibilità di collegamento su bus di campo
- Configurazione single-loop o in cascata
- Auto-tuning e/o self-tuning
- Funzionamento in automatico o manuale
- Configurabile via rete o terminale esterno RS-232
- Possibile configurazione in modalità Gain-Scheduling

La taratura dei regolatori

La taratura dei regolatori industriali può essere effettuata mediante tecniche di sintesi in frequenza standard. Tuttavia, in ambito industriale, sono per lo più utilizzate metodologie basate su prove in campo

Metodi ad anello chiuso: *prevedono di effettuare prove a ciclo chiuso con regolatore solo proporzionale, o a relè, in modo da instaurare comportamenti oscillatori permanenti.*

I parametri dell'oscillazione (periodo ed ampiezza) vengono utilizzati per definire i valori dei parametri del regolatore

Metodi ad anello aperto: *prevedono prove mediante ingressi a gradino sul solo processo da controllare, eventualmente comprensivo del sistema di misura.*

I parametri della risposta indiciale (guadagno, costante di tempo e tempo morto) vengono utilizzati per identificare il processo, e quindi parametri del regolatore

La taratura dei regolatori

Una scelta opportuna dei parametri del controllore PID permette di implementare una rete anticipatrice (Lead compensator)

$$C_{ant}(j\omega) = \frac{1 + j\tau_{ant}\omega}{1 + j\frac{\tau_{ant}}{m}\omega} \quad m > 1$$

$$C_{PD_{reale}}(s) = \frac{1 + \tau_D s}{1 + \frac{\tau_D}{N}s} \quad N \geq 10; k_P = 1; \tau_I = \infty$$

$$N = m$$
$$\tau_D = \tau_{ant}$$



Le due funzioni di trasferimento sono perfettamente uguali

La taratura dei regolatori

Una scelta opportuna dei parametri del controllore PID permette di implementare una approssimazione della rete attenuatrice (Lag compensator)

$$C_{att}(j\omega) = \frac{1 + j \frac{\tau_{att}}{m} \omega}{1 + j \tau_{att} \omega} \quad m > 1$$

$$C_{PI}(s) = k_P \frac{1 + \tau_I s}{\tau_I s} \quad \tau_D = 0$$

$$k_P = \frac{1}{m}$$

$$\tau_I = \frac{\tau_{att}}{m}$$



Le due funzioni di trasferimento coincidono per pulsazioni superiori a m/τ_I

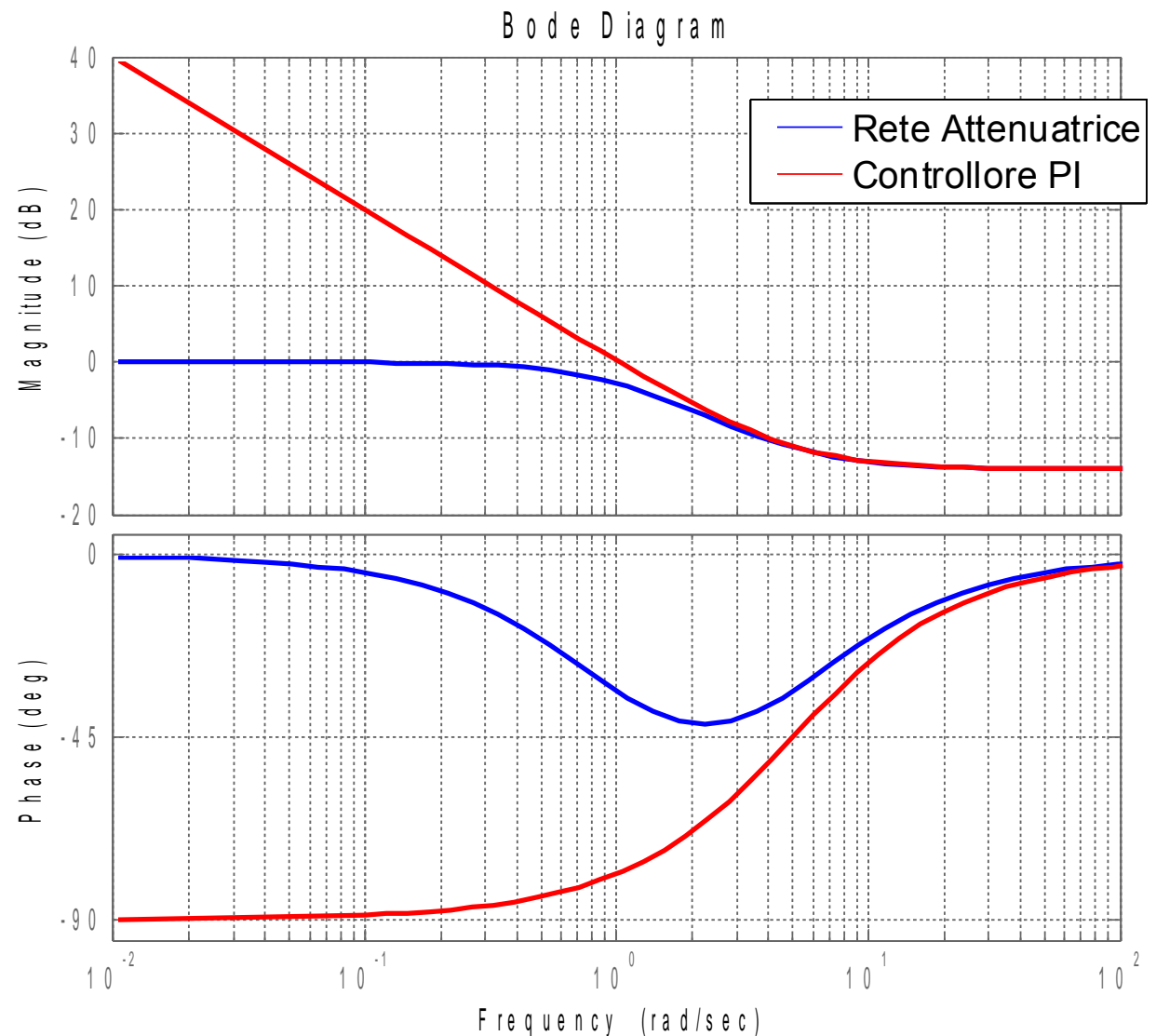
La taratura dei regolatori

Una scelta opportuna dei parametri del controllore PID permette di implementare una rete attenuatrice (Lag compensator)

$$C_{att}(j\omega) = \frac{1 + j \frac{\tau_{att}}{m} \omega}{1 + j \tau_{att} \omega}$$

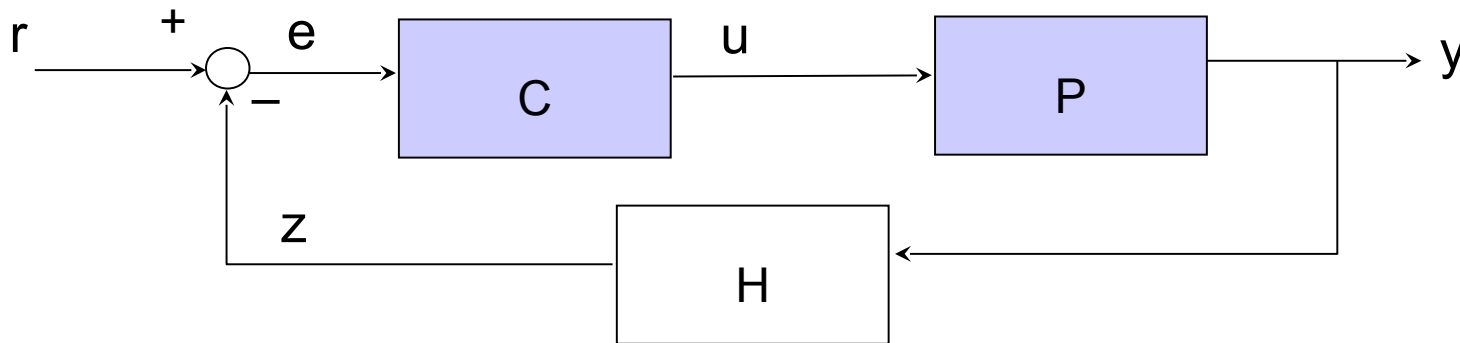
$$C_{PI}(s) = k_p \frac{1 + \tau_I s}{\tau_I s}$$

La presenza del polo nell'origine può destabilizzare il sistema a ciclo chiuso



Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso

I metodi a ciclo chiuso sono utilizzati dai programmi di auto e self-tuning dei regolatori industriali commerciali.



Sono basati sulla ricerca di punti caratteristici del funzionamento a ciclo chiuso.

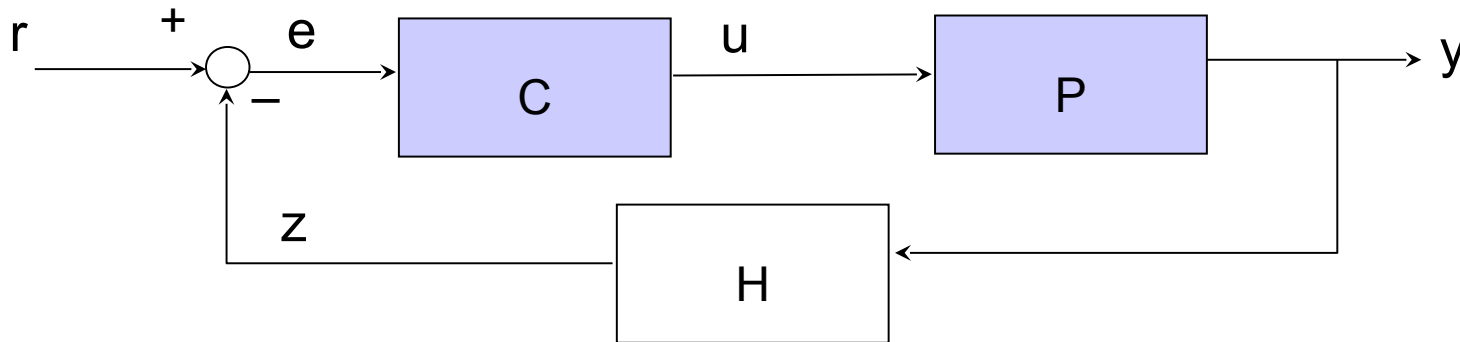
Il metodo di Ziegler e Nichols



Periodo e guadagno critico (T_{cr} e K_{cr})

Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso

Ziegler e Nichols a ciclo chiuso: Procedura concettuale



- Annullare l'azione integrale e derivativa del controllore ($\tau_I = \infty$; $\tau_D = 0$)
- Provocare il transitorio del sistema modificando leggermente il segnale di riferimento
- Aumentare il guadagno del controllore fino a raggiungere la condizione di oscillazione permanente ($K_P = K_{cr}$)
- Valutare il periodo critico T_{cr}

Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso

Ziegler e Nichols a ciclo chiuso: Procedura concettuale

I parametri del controllore vengono tarati secondo la seguente tabella, in funzione della tipologia di controllore (azioni) scelta.

	K_P	τ_I	τ_D
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$0.8 T_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 T_{cr}$	$0.125 T_{cr}$

Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso

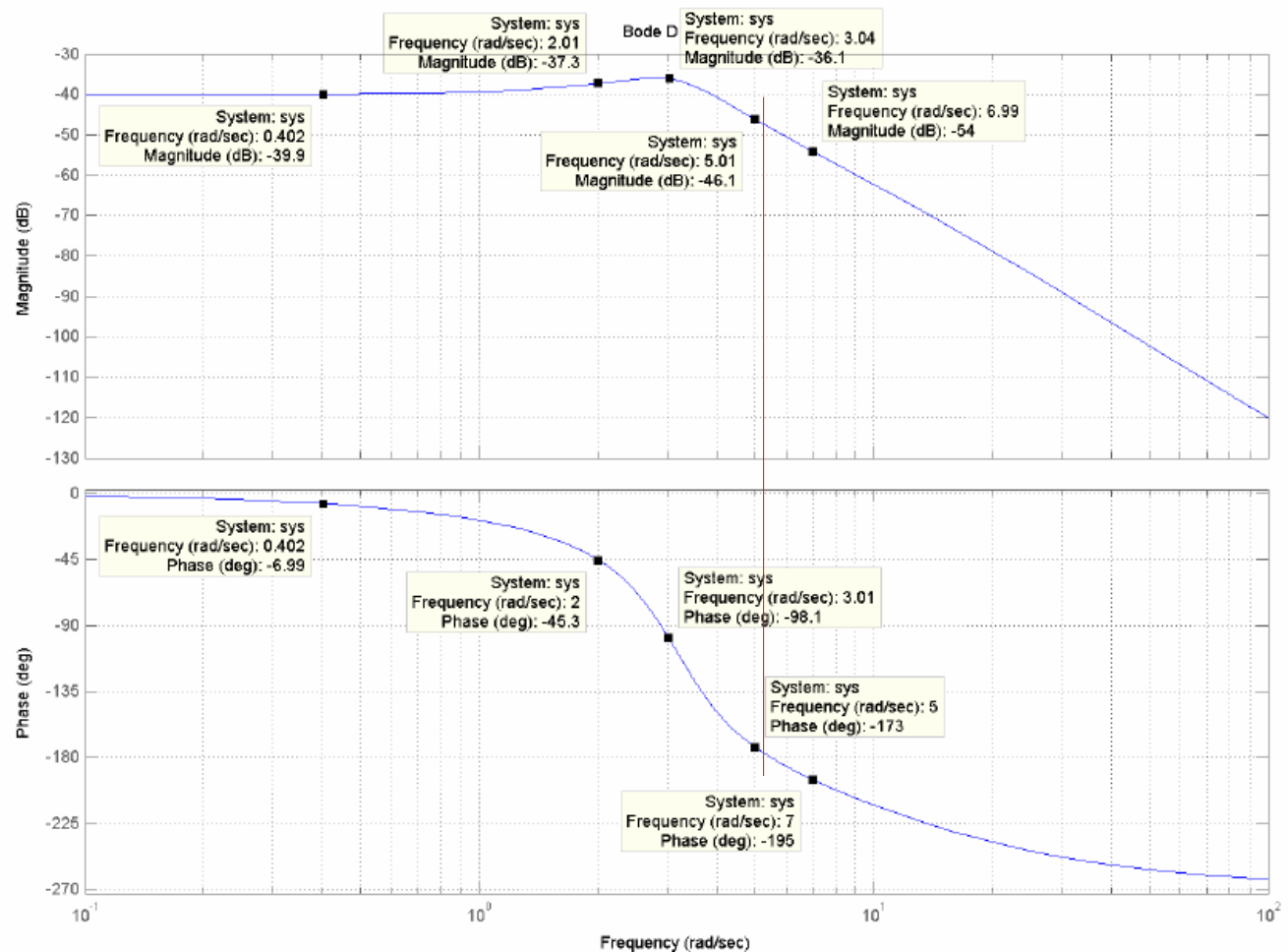
Ziegler e Nichols a ciclo chiuso: Procedura reale

Il periodo ed il guadagno critici (T_{cr} e K_{cr}) non vengono valutati mandando il sistema al limite di stabilità

Sulla base della risposta armonica a ciclo aperto del sistema senza il controllore

$$K_{cr} = m_g$$

$$T_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_{cr}}$$



Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso

Ziegler e Nichols a ciclo chiuso: Procedura reale

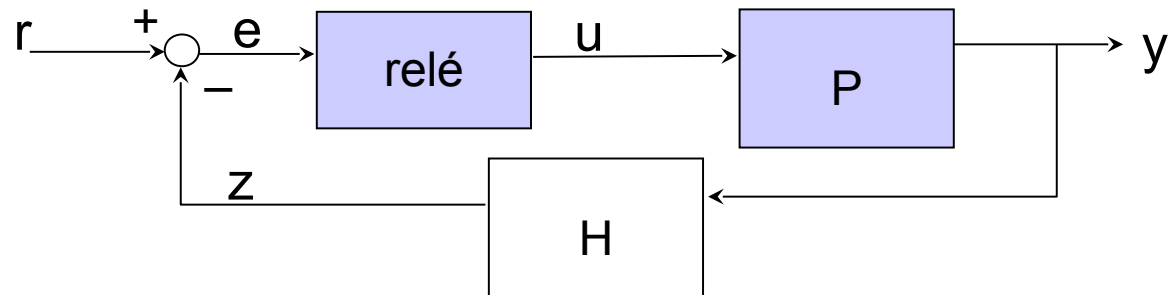
Il periodo ed il guadagno critici (T_{cr} e K_{cr}) non vengono valutati mandando il sistema al limite di stabilità

Sulla base della risposta con controllore a relè: metodo della Funzione descrittiva (Aström)

$$u = M \operatorname{sign}(e)$$

$$K_{cr} = \frac{4 M}{E_{max} \pi}$$

$$T_{cr} = \frac{2 \pi}{\omega_{cr}}$$



Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso

Ziegler e Nichols a ciclo chiuso: Procedura reale

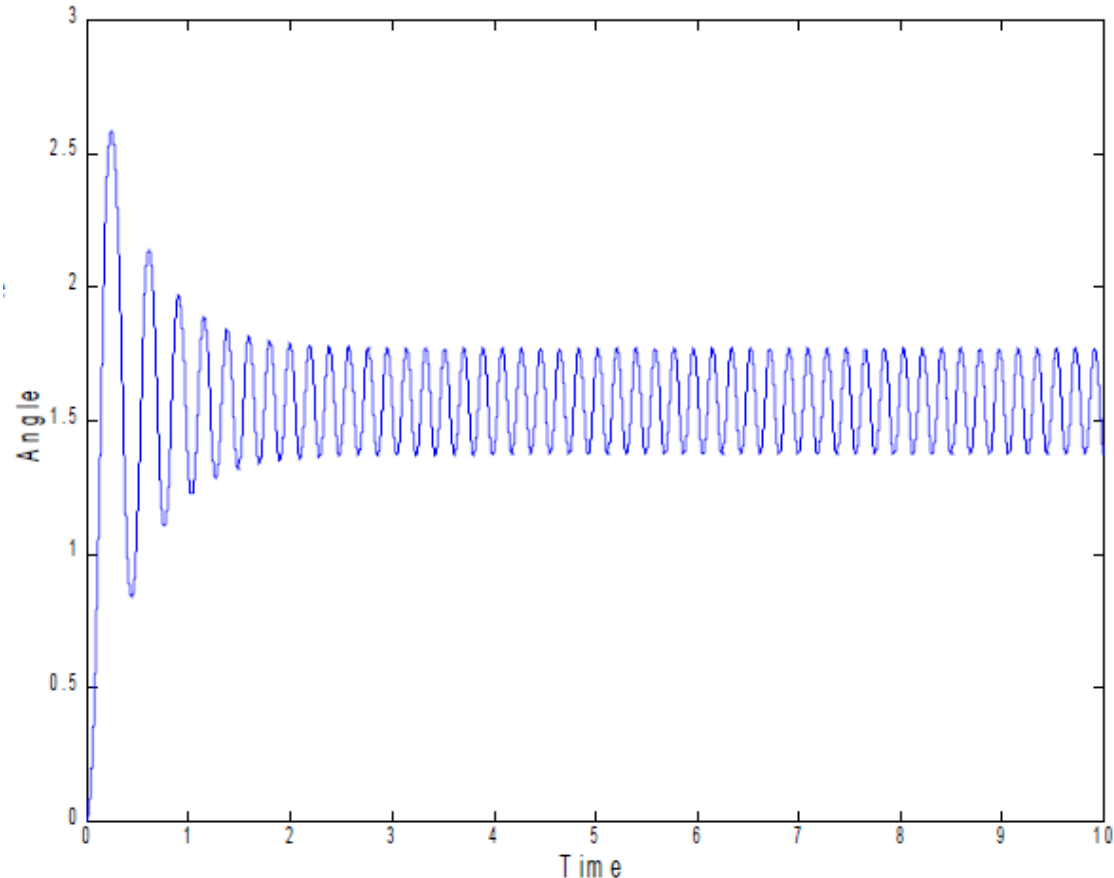
Il periodo ed il guadagno critici (T_{cr} e K_{cr}) non vengono valutati mandando il sistema al limite di stabilità

Sulla base della risposta con controllore a relè: metodo della Funzione descrittiva (Aström)

$$u = M \operatorname{sign}(e)$$

$$K_{cr} = \frac{4 M}{E_{max} \pi}$$

$$T_{cr} = \frac{2 \pi}{\omega_{cr}}$$



Metodo Ziegler-Nichols a ciclo chiuso

Ziegler e Nichols a ciclo chiuso: Procedura reale

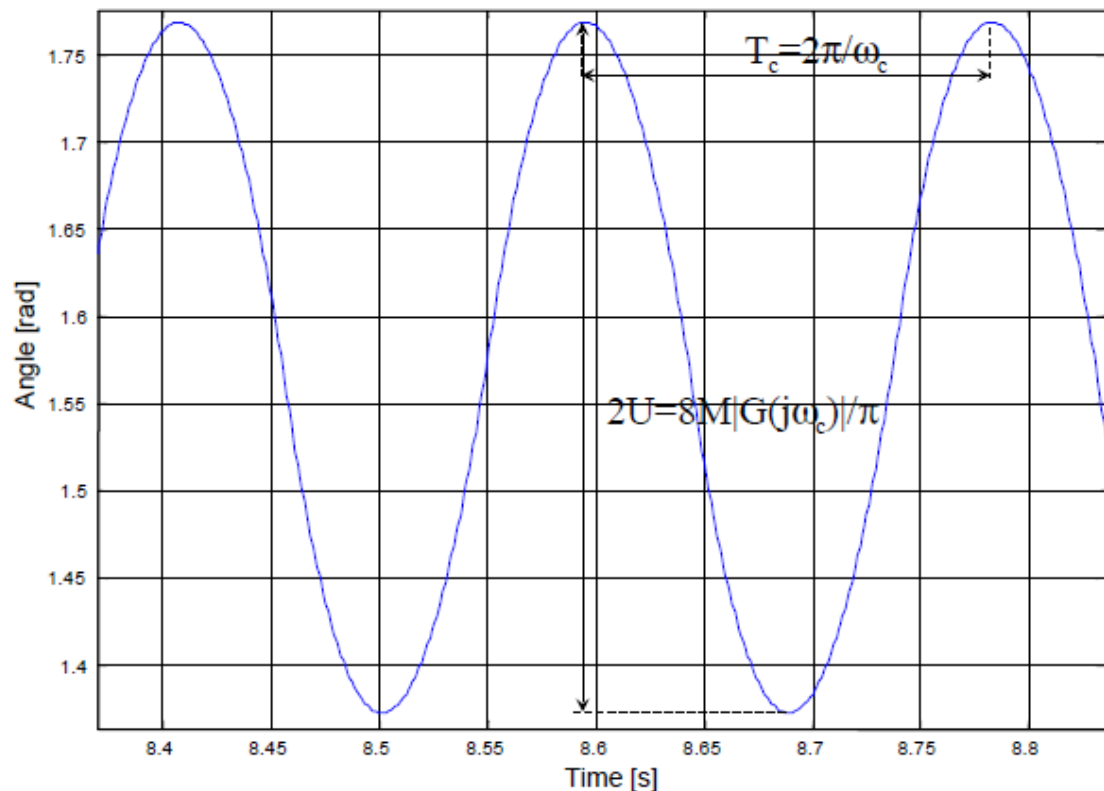
Il periodo ed il guadagno critici (T_{cr} e K_{cr}) non vengono valutati mandando il sistema al limite di stabilità

Sulla base della risposta con controllore a relè: metodo della Funzione descrittiva (Aström)

$$u = M \operatorname{sign}(e)$$

$$K_{cr} = \frac{4 M}{E_{max} \pi}$$

$$T_{cr} = \frac{2 \pi}{\omega_{cr}}$$

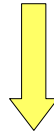


Metodo Ziegler-Nichols a ciclo aperto

I metodi ad anello aperto sono molto utilizzati nell'industria di processo.

Il processo viene approssimato mediante modelli semplici in funzione dell'andamento della risposta al gradino.

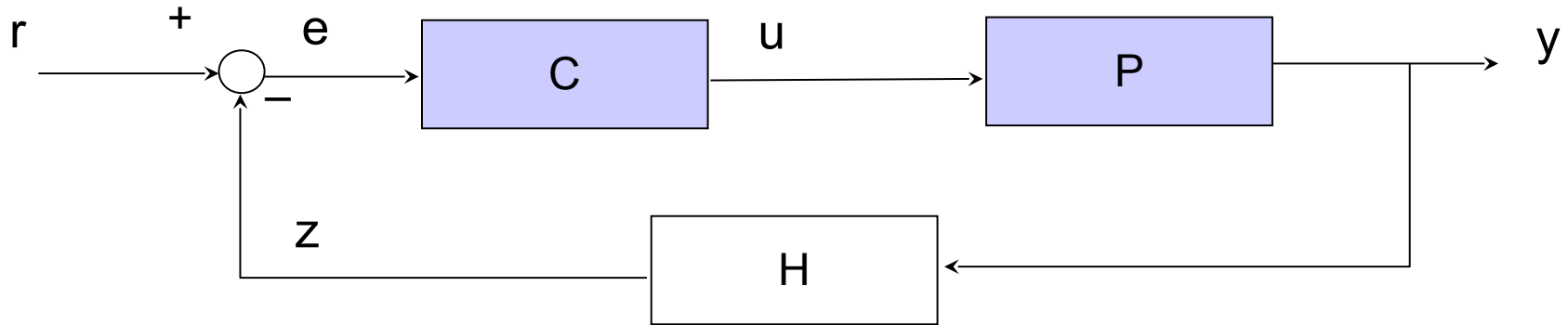
Metodo di Ziegler e Nichols



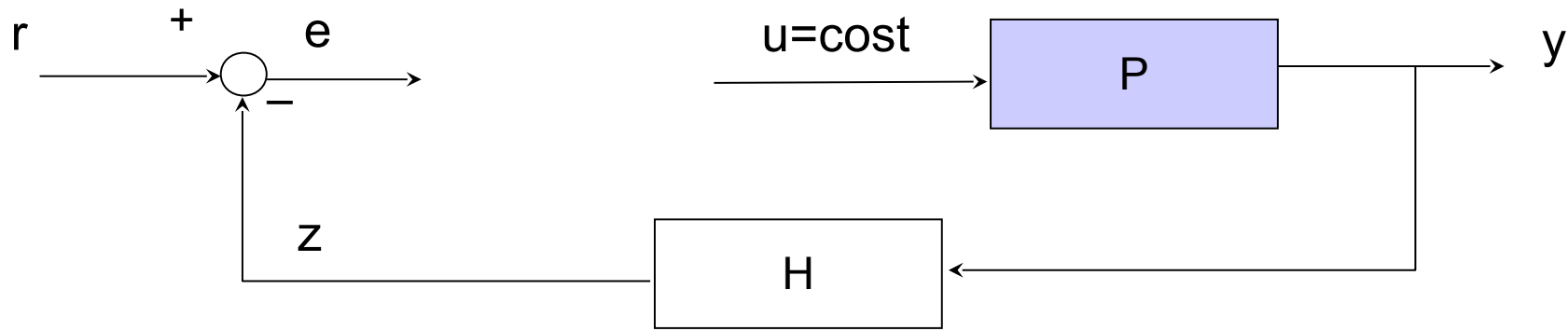
sistema del primo ordine più un ritardo finito

$$y(t)|_{r=\text{gradino}} \cong \begin{cases} K \left(1 - e^{-\frac{t-T_m}{\tau}} \right) & t \geq T_m \\ 0 & t < T_m \end{cases}$$

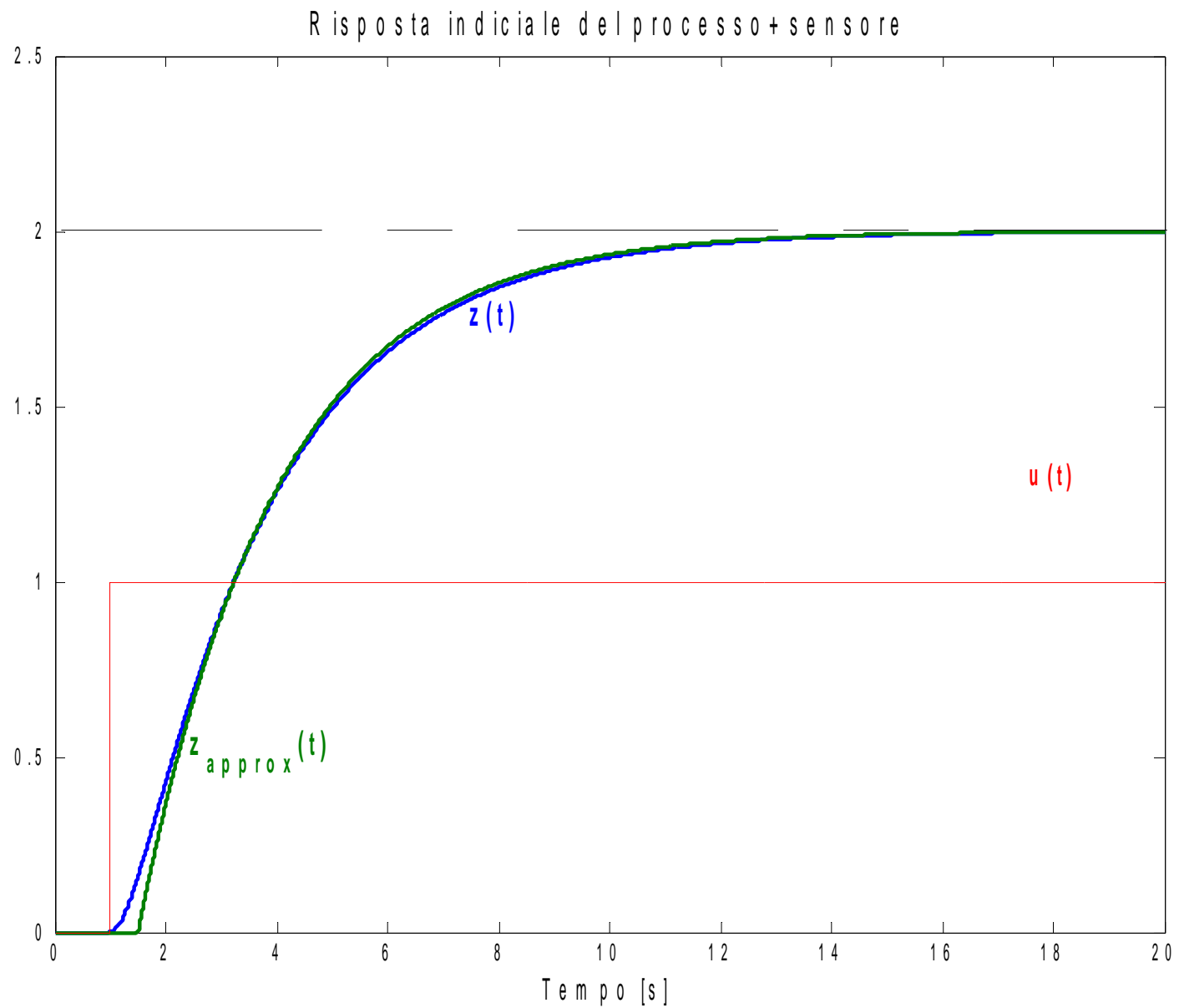
Metodo Ziegler-Nichols a ciclo aperto



Si pone il controllore in manuale, si applica un segnale di controllo costante, u , e si legge la misura dell'uscita, z .



Metodo Ziegler-Nichols a ciclo aperto



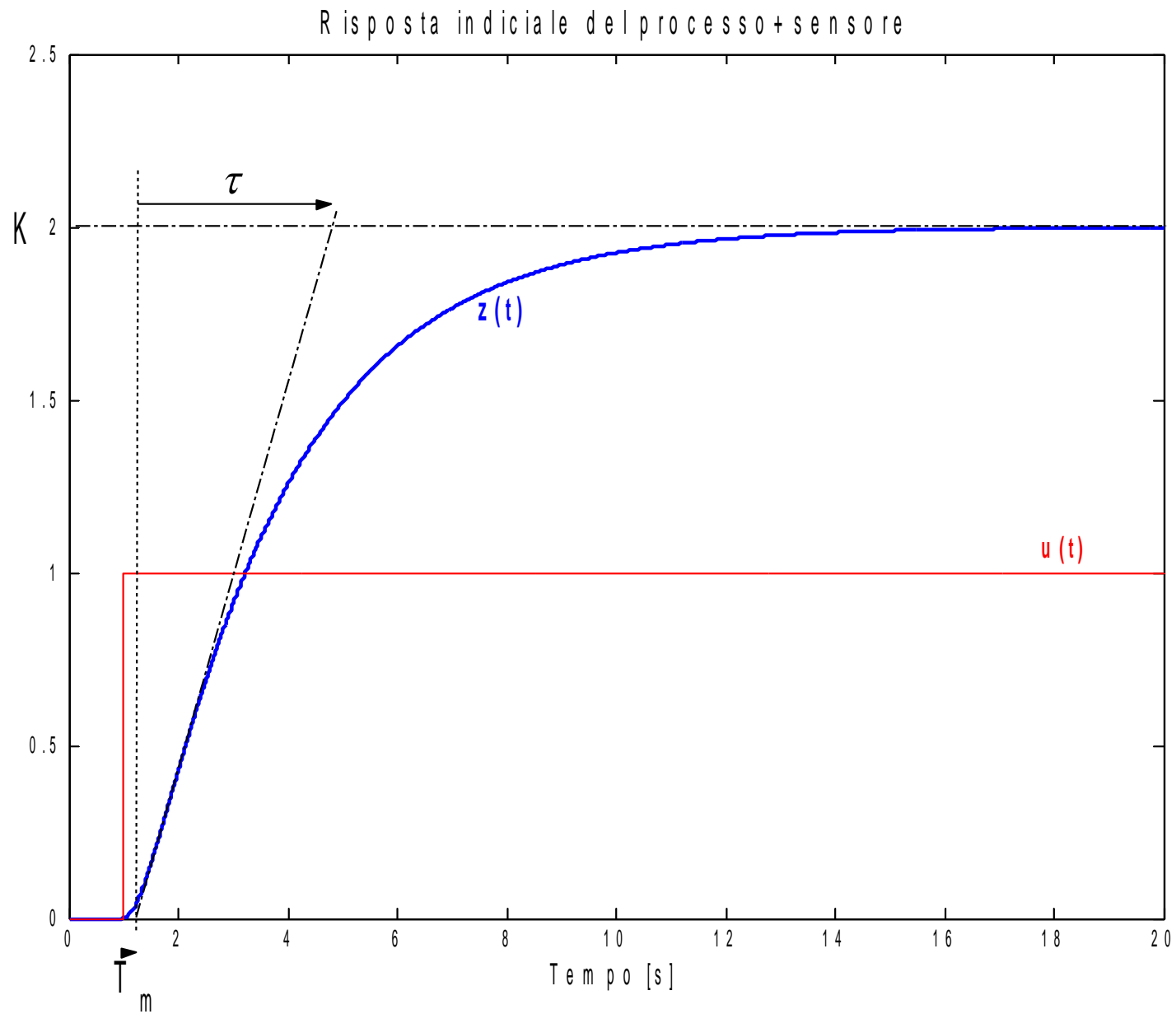
Metodo Ziegler-Nichols a ciclo aperto

Procedura di identificazione

1. Si effettua la prova di risposta al gradino
2. Si individua il valore di regime dell'uscita
3. Si traccia una retta tangente alla risposta nel suo punto di flesso
4. Si valuta l'intersezione di tale retta con l'asse delle ascisse. Tale punto individua il tempo morto T_m
5. Si valuta l'intersezione di tale retta con la retta parallela all'asse dei tempi indicante il valore di regime. Tale punto individua un intervallo di tempo che è somma del tempo morto T_m e della costante di tempo τ

L'ingresso a gradino può essere applicato come variazione a gradino a partire da una qualunque condizione di regime stazionario

Metodo Ziegler-Nichols a ciclo aperto



Metodo Ziegler-Nichols a ciclo aperto

Tabella di taratura di Ziegler & Nichols

	k_P	τ_I	τ_D
P	$\frac{K}{\tau T_m}$	∞	0
PI	$\frac{0.9K}{\tau T_m}$	$3T_m$	0
PID	$\frac{1.2K}{\tau T_m}$	$2T_m$	$0.5T_m$

Condizioni di applicabilità

- **Taratura di Ziegler & Nichols a ciclo chiuso:** sistemi a stabilità regolare con differenza poli-zeri non inferiore a 3
- **Taratura di Ziegler & Nichols a ciclo aperto:** sistemi asintoticamente stabili con risposta indiciale monotona crescente

Le tarature di Ziegler & Nichols impongono valori di smorzamento a ciclo chiuso abbastanza bassi ($\xi \cong 0.2$) e quindi risposte con sovraelongazioni elevate ed oscillazioni.

- incrementare il valore di τ_I
- incrementare il valore di τ_D
- ridurre il valore di k_p
- utilizzare altre tabelle di taratura

Tutte le tabelle di taratura sono sviluppate sotto specifiche ipotesi, ed è quindi necessario verificarne le condizioni di applicabilità

Condizioni di applicabilità

La taratura di Ziegler & Nichols a ciclo aperto

	Note sulle regole di taratura	Tipo di regolatore
$T_m/\tau > 1$	Risultati scadenti	I per regolazione blanda. Essenziale predittore di Smith
$0.6 < T_m/\tau < 1$ $1.5 < K_1 < 2.25$	Risultati scadenti, migliorabili con peso sul set-point	I o PI. Predittore di Smith o controllo in cascata
$0.16 < T_m/\tau < 0.6$ $2 < K_1 < 20$	Buoni risultati. Sovralongazione riducibile con peso sul set-point	PI o PID (se basso rumore di misura)
$T_m/\tau < 0.15$	Buoni risultati. Sovralongazione riducibile con peso sul set-point	PI o PID (se basso rumore di misura)

$$K_1 = \frac{\text{gain}\{PH\}}{|PH|_{\omega=\omega_c}}$$

- ✓ Sono state presentate alcune realizzazioni industriali dei regolatori PID
- ✓ Sono state discusse le analogie tra regolatori PID e le reti compensatrici attenuatrice e anticipatrice
- ✓ Sono stati presentati i metodi di taratura di Ziegler e Nichols sia ad anello aperto che chiuso
- ✓ Sono state evidenziate alcune delle condizioni di applicabilità dei metodi di taratura presentati