

Fig. 6.41 Schema per il progetto analitico nel caso di due ingressi.

determinazione di un parametro concorrano più dati di specifica, che normalmente sono espressi da ineguaglianze e consentono così una certa elasticità, si opererà la scelta più restrittiva.

## 6.9 I regolatori standard

Nel controllo di molti processi industriali, come quelli relativi a impianti chimici e petrolchimici, le caratteristiche dinamiche dei sistemi controllati possono variare entro ampi limiti (ad esempio, un controllo di portata ha in generale una risposta molto più pronta di un controllo di temperatura), mentre d'altra parte risulta economicamente conveniente unificare gli apparati di controllo. Le variabili manipolabili di questi sistemi sono in genere le posizioni di steli di valvole, che vengono variate con attuatori pneumatici o elettropneumatici, collegati ad apparati di controllo standard, ad amplificazione pneumatica od elettronica; tali apparati sono provvisti di opportune manopole di regolazione, agendo sulle quali si possono modificare i valori dei parametri che ne caratterizzano il comportamento, in modo da poterli facilmente adattare alla dinamica del sistema controllato ed ottenere così dal sistema complessivo in retroazione una risposta soddisfacente. In altre parole, si dispone di apparati di controllo standard, ma provvisti di dispositivi di correzione con parametri regolabili entro ampi limiti, così da poter essere adattati al particolare sistema di regolazione in cui vengono inseriti.

Se, con riferimento alla Fig. 6.42, si indica con  $G_c(s) = M(s)/E(s)$  la funzione di trasferimento del regolatore, si distinguono i seguenti tipi standard:

1. *Regolatore proporzionale (P):*

$$G_c(s) = K_p ;$$

2. *Regolatore integrale (I):*

$$G_c(s) = \frac{K_p}{T_i s} ;$$

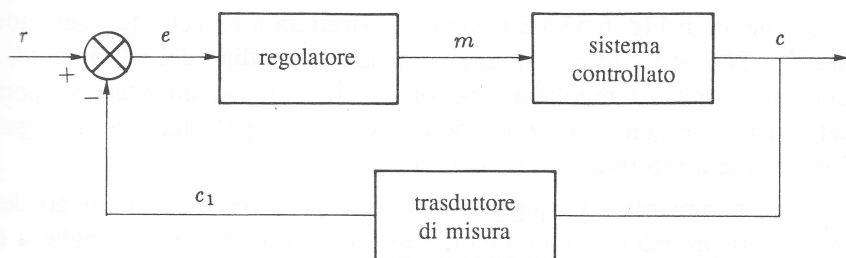


Fig. 6.42 Schema a blocchi di un controllo in retroazione.

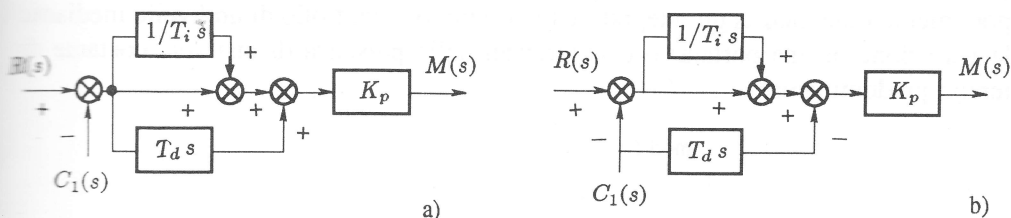


Fig. 6.43,a,b Schemi a blocchi di regolatori PID.

### 3. Regolatore proporzionale-integrale (PI):

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) ;$$

### 4. Regolatore proporzionale-derivativo (PD):

$$G_c(s) = K_p (1 + T_d s) ;$$

### 5. Regolatore proporzionale-integrale-derivativo (PID):

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

La costante  $K_p$  si dice *sensibilità proporzionale*,  $T_d$  *costante di tempo dell'azione derivativa*,  $T_i$  *costante di tempo dell'azione integrale*.

Spesso nella funzione di trasferimento del regolatore si include anche quella del trasduttore di misura  $K_t(s)$ , ottenendo per il complesso  $G'_c(s) = K_t(s) G_c(s)$ : poiché  $K_t(s)$  in genere è una costante, l'espressione di  $G'_c(s)$  si ottiene da quella di  $G_c(s)$  sostituendovi, in luogo della sensibilità proporzionale, la sensibilità proporzionale complessiva  $K'_p := K_t K_p$ .

L'inversa della sensibilità proporzionale complessiva si dice *banda proporzionale* e corrisponde all'escursione della variabile controllata necessaria per provocare una variazione unitaria della variabile manipolabile, in assenza di azione derivativa e integrale (non si definisce per i controlli esclusivamente integrali).

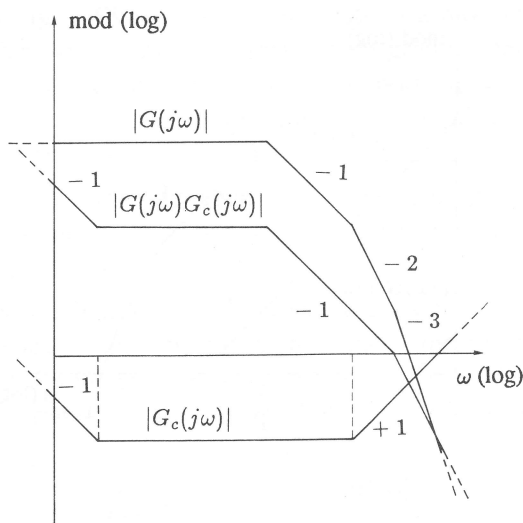


Fig. 6.47 Effetto di un regolatore PID.

Il regolatore a triplice azione è pertanto il più generale: scegliendo opportunamente i valori dei tre parametri che ne caratterizzano il comportamento dinamico si possono infatti ottenere, come casi particolari, le azioni di tutti i tipi di regolatori precedentemente presi in esame.

#### - Taratura dei regolatori standard

Lo studio dell'intervento sul diagramma di Bode dei regolatori passati in rassegna è utile per avere indicazioni di massima sulla scelta di un particolare tipo di azione, in relazione alle caratteristiche dinamiche del sistema controllato. I processi chimici e petrolchimici sono caratterizzati però da modelli fortemente nonlineari, per cui la scelta dei parametri dei regolatori si effettua in molti casi con metodi semiempirici.

Fra questi, di largo impiego è il *metodo di Ziegler-Nichols*<sup>1</sup>, che fornisce i valori dei parametri del regolatore, che si suppone collegato al processo come è indicato in Fig. 6.48, in funzione di alcuni parametri della risposta al gradino del sistema controllato. Questa molto spesso è aperiodica, del tipo rappresentato in Fig. 6.49, e può considerarsi approssimata dalla risposta corrispondente alla funzione di trasferimento

$$\frac{K e^{-t_0 s}}{1 + T s}, \quad (6.51)$$

in cui i valori dei parametri si ricavano come è indicato in Fig. 6.49, mandando la tangente alla curva di risposta al gradino nel punto di flesso. Con riferimento a tale costruzione, si definiscono i seguenti parametri caratteristici:

- $t_0$ : tempo di ritardo;
- $T$ : costante di tempo;

<sup>1</sup> Ziegler, J.G. e Nichols, N.B., "Optimum settings for automatic controllers", *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942. In relazione alla taratura e all'autosintonia dei regolatori PID si consiglia il volume specifico di Åström e Hägglung, opera citata in bibliografia.

- $R := t_0/T = N t_0/C_0$ : rapporto di ritardo;
- $N := C_0/T$ : velocità di risposta;
- $K := C_0/M_0$ : guadagno statico ( $M_0$  è l'ampiezza del gradino applicato).

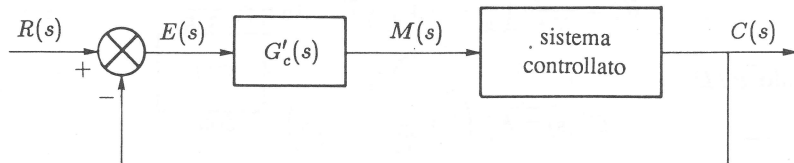


Fig. 6.48 Disposizione cui ci si riferisce per il metodo di Ziegler-Nichols.

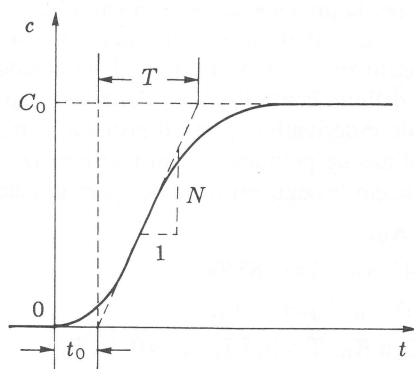


Fig. 6.49 Risposta al gradino del sistema controllato.

Posto  $G'_c(s) = M(s)/E(s)$ , i valori dei parametri consigliati da Ziegler e Nichols, modificati da Cohen e Coon<sup>2</sup>, sono:

1. Controllo  $P$ :

$$G'_c(s) = K'_p, \quad \text{con} \quad K'_p = \frac{M_0}{N t_0} \left( 1 + \frac{R}{3} \right);$$

2. Controllo  $I$ :

$$G'_c(s) = \frac{K'_p}{T_i s}, \quad \text{con} \quad \frac{K'_p}{T_i} = \frac{4 M_0}{N t_0^2} \frac{R^2}{1 + 5 R};$$

3. Controllo  $PI$ :

$$G'_c(s) = K'_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad \text{con}$$

$$K'_p = \frac{M_0}{N t_0} \left( \frac{9}{10} + \frac{R}{12} \right), \quad T_i = t_0 \frac{30 + 3 R}{9 + 20 R};$$

<sup>2</sup> Vedi Cohen, G.H. e Coon, G.A., "Theoretical considerations of retarded control", *Trans. ASME*, vol. 75, pp. 827-834, 1953, ed Eckman, D.P., opera citata in bibliografia. La scelta dei parametri viene operata in modo da avere un transitorio ritenuto di buona qualità in base alla pratica di esercizio; ad esempio, per il controllo PD, il criterio seguito è quello di ottenere il minimo errore statico compatibile con il rapporto di 4 ad 1 fra le successive sovraelongazioni nelle oscillazioni dell'errore.

4. Controllo *PD*:

$$G'_c(s) = K'_p (1 + T_d s), \quad \text{con}$$

$$K'_p = \frac{M_0}{N t_0} \left( \frac{5}{4} + \frac{R}{6} \right), \quad T_d = t_0 \frac{6 - 2R}{22 + 3R};$$

5. Controllo *PID*:

$$G'_c(s) = K'_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad \text{con}$$

$$K'_p = \frac{M_0}{N t_0} \left( \frac{4}{3} + \frac{R}{4} \right), \quad T_i = t_0 \frac{32 + 6R}{13 + 8R}, \quad T_d = t_0 \frac{4}{11 + 2R}.$$

Un metodo alternativo per la predisposizione dei valori dei parametri che caratterizzano le varie azioni di regolazione, in modo da ottenere una risposta soddisfacente da parte del sistema in retroazione, è basato sulla determinazione della cosiddetta “banda proporzionale di pendolazione”: questa è definita come il valore della banda proporzionale  $1/K_0$  che, in assenza delle azioni integrale e derivativa, porta il sistema di regolazione in condizione di stabilità limite, cioè in oscillazione permanente. In tale condizione si determina il periodo di oscillazione  $T_0$  e si applicano le seguenti formule, pure dovute a Ziegler e Nichols:

1. Controllo *P*:  $K'_p = 0,5 K_0$ ;
2. Controllo *PI*:  $K'_p = 0,45 K_0$ ,  $T_i = 0,85 T_0$ ;
3. Controllo *PD*:  $K'_p = 0,5 K_0$ ,  $T_d = 0,2 T_0$ ;
4. Controllo *PID*:  $K'_p = 0,6 K_0$ ,  $T_i = 0,5 T_0$ ,  $T_d = 0,12 T_0$ .

I regolatori *PID* commerciali più recenti, realizzati con tecnologia digitale, sono dotati di particolari accorgimenti e dispositivi, che ne migliorano il comportamento e ne rendono più agevole l'impiego. Fra questi sono degni di nota gli accorgimenti che evitano il cosiddetto “caricamento dell'integratore” (*integrator windup*), cioè che, durante transitori che comportino la saturazione dell'attuatore, quindi un comportamento anomalo dell'anello di retroazione, l'uscita dell'integratore assuma valori ben al di sopra di quello corrispondente alla saturazione, rendendo molto più lento e insicuro il ripristino delle condizioni normali di regolazione. L'accorgimento più semplice consiste nel disconnettere l'integratore quando la sua uscita raggiunge uno dei due livelli di saturazione, massimo o minimo, e l'ingresso risulta rispettivamente positivo o negativo.

### - Cenni ai metodi di autosintonia

Un'altra possibilità è l'“autosintonia” (*self-tuning*), cioè l'aggiustamento automatico dei parametri, che viene operato a comando, premendo un apposito bottone sul pannello di comando del regolatore. Durante la fase di autosintonia, che deve essere eseguita a partire da una condizione di regime stazionario, il regolatore esegue sull'impianto esperimenti che ne identificano alcune caratteristiche dinamiche, in funzione delle quali i parametri del regolatore vengono automaticamente aggiustati. Ad esempio, entrambi i metodi di Ziegler e Nichols precedentemente presentati, quello basato sulla rilevazione dei parametri della risposta al gradino e quello basato sulla determinazione del guadagno limite e della corrispondente frequenza di pendolazione, possono essere facilmente automatizzati.

Di particolare interesse è la realizzazione del secondo metodo, che può essere anche generalizzato, con la rilevazione di più valori della funzione di risposta armonica del sistema