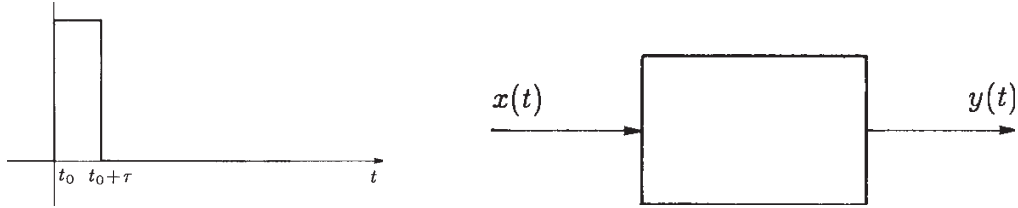
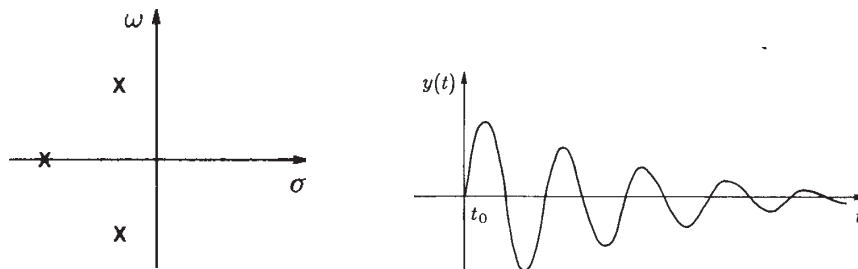


Stabilità e retroazione

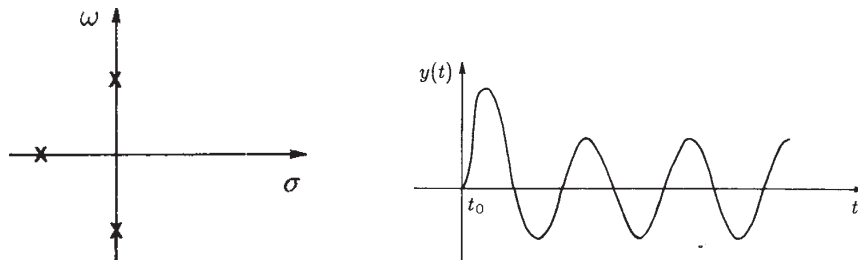
- Stabilità dei sistemi dinamici lineari:



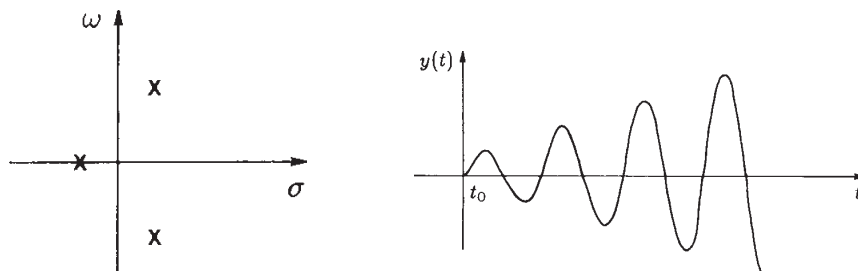
- Un sistema $G(s)$ è **asintoticamente stabile** se tutti i suoi poli sono a parte reale negativa.



- Un sistema $G(s)$ è **stabile** se tutti i suoi poli sono a parte reale negativa o nulla e se i poli a parte reale nulla sono semplici.

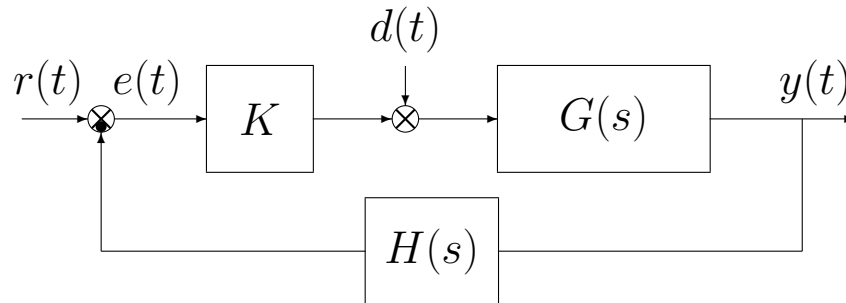


- Un sistema $G(s)$ è **instabile** se ha almeno un polo a parte reale positiva, oppure a parte reale nulla con grado di molteplicità ≥ 2 .



Il criterio di Routh

- Si faccia riferimento al seguente sistema dinamico retroazionato:



- La funzione di trasferimento $G_0(s)$ del sistema retroazionato è:

$$G_0(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K G(s)}{1 + K G(s)H(s)}$$

- Equazione caratteristica del sistema retroazionato

$$1 + K G(s)H(s) = 0$$

- La stabilità del sistema retroazionato è univocamente determinata dalla posizione sul piano complesso dei poli della funzione $G_0(s)$, cioè dagli zeri dell'equazione caratteristica.
- Per determinare se $G_0(s)$ è stabile o meno, in realtà non è necessario sapere la posizione esatta dei poli, è sufficiente sapere se essi si trovano o meno tutti a sinistra dell'asse immaginario.
- Il criterio di Routh permette di determinare se un sistema retroazionato è stabile senza dover calcolare esattamente la posizione delle radici stesse.
- Si ponga l'equazione caratteristica in forma polinomiale:

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

con $a_n > 0$ e $a_0 \neq 0$

- *Condizione necessaria affinché le radici dell'equazione caratteristica abbiano tutte parte reale negativa è che tutti i coefficienti siano positivi*

$$a_n > 0, \quad a_{n-1} > 0, \quad \dots, \quad a_1 > 0, \quad a_0 > 0$$

- Data l'equazione caratteristica

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

la **Tabella di Routh** si costruisce nel modo seguente:

$$\begin{array}{c|cccc}
 n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} \\
 n-1 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} \\
 n-2 & b_{n-2} & b_{n-4} & b_{n-6} & \dots \\
 n-3 & c_{n-3} & c_{n-5} & \dots &
 \end{array}$$

dove

$$b_{n-2} = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}, \quad b_{n-4} = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}, \quad \dots$$

$$c_{n-3} = \frac{b_{n-2}a_{n-3} - a_{n-1}b_{n-4}}{b_{n-2}}, \quad c_{n-5} = \frac{b_{n-2}a_{n-5} - a_{n-1}b_{n-6}}{b_{n-2}}, \quad \dots$$

- **Criterio di Routh:** ad ogni variazione di segno che presentano i termini della prima colonna della tabella di Routh corrisponde una radice a parte reale positiva, ad ogni permanenza una radice a parte reale negativa. (C.N.S.)
- Esempio:

$$s^3 - 4s^2 + s + 6 = 0 \quad \rightarrow \quad (s + 1)(s - 2)(s - 3) = 0$$

Tabella di Routh:

$$\begin{array}{c|cc}
 3 & 1 & 1 \ 0 \\
 2 & -4 & 6 \ 0 \\
 1 & \frac{-4-6}{-4} = 2.5 & 0 \\
 0 & \frac{2.5 \cdot 6}{2.5} = 6 &
 \end{array}$$

Vi sono due variazioni di segno per cui l'equazione ha due radici a parte reale positiva.

- Esempio:

$$2s^4 + s^3 + 3s^2 + 5s + 10 = 0$$

Tabella di Routh:

4	2	3	10	
3	1	5	0	
2	-7	10		
1	$\frac{45}{7}$	0		2 variazioni →
0	10			→ 2 radici a parte reale positiva

- Il criterio di Routh rimane valido anche se si moltiplica **tutti** i termini di una stessa riga per un coefficiente **positivo**

$$4s^4 + 3s^3 + 5s^2 + 2s + 1 = 0$$

Tabella di Routh:

4	4	5	1	
3	3	2	0	
2	7	3		← non si è diviso per 3
1	5	0		← non si è diviso per 7
0	3			

Tutte le radici sono a parte reale negativa.

- Casi Particolari: a) Se il primo termine di una riga è nullo:

$$s^3 + 3s - 2 = 0$$

Tabella di Routh:

3	1	3		3	1	3	
2	ϵ	-2		2	- ϵ	-2	
1	2		$(3\epsilon + 2)_{\epsilon \rightarrow 0}$	1	-2		$(\frac{-3\epsilon + 2}{-\epsilon})_{\epsilon \rightarrow 0}$
0	-2			0	-2		

Lo zero viene sostituito con una quantità ϵ positiva (o negativa) che poi si fa tendere a zero.

- Casi Particolari: b) Tutti i termini di una riga sono nulli.

Una situazione di questo tipo può accadere solamente in una riga dispari, per esempio la $(2m - 1)$ -esima riga:

$$\begin{array}{c|cccc} \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 2m & b_{2m} & b_{2m-2} & \dots & b_0 \\ 2m-1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{array}$$

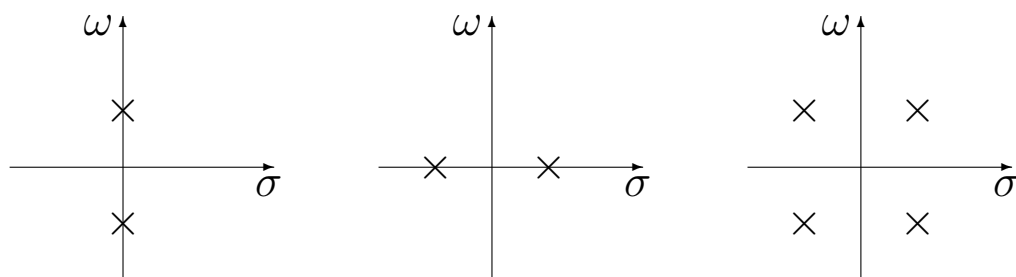
Le variazioni e le permanenze della tabella fino alla riga $2m$ determinano univocamente le prime $n - 2m$ radici dell'equazione data.

Le altre $2m$ radici dell'equazione si determinano come soluzioni della seguente equazione ausiliaria:

$$b_{2m}s^{2m} + b_{2m-2}s^{2m-2} + \dots + b_2s^2 + b_0 = 0$$

Ponendo $z = s^2$ si ottiene una equazione di grado m .

- Le soluzioni dell'equazione ausiliaria sono un sottoinsieme delle soluzioni dell'equazione caratteristica di partenza.
- Le $2m$ radici dell'equazione ausiliaria sono sempre simmetriche rispetto all'origine del piano complesso:



Quindi ad ogni radice a parte reale positiva corrisponde una radice a parte reale negativa.

- Se l'equazione caratteristica è di ordine > 4 , l'equazione ausiliaria non è direttamente risolubile per cui si deriva l'equazione ausiliaria, i coefficienti del polinomio ottenuto si sostituiscono alla riga tutta nulla e si procede nella costruzione della tabella di Routh.

- Esempio:

$$s^4 + s^3 - 3s^2 - s + 2 = 0$$

Tabella di Routh:

$$\begin{array}{c|ccc} 4 & 1 & -3 & 2 \\ 3 & 1 & -1 & 0 \\ 2 & -2 & 2 & \\ 1 & 0 & 0 & \end{array}$$

Le prime due radici: 1 a parte reale negativa (permanenza) e 1 a parte reale positiva (variazione). L'equazione ausiliaria è

$$-2s^2 + 2 = 0 \quad \rightarrow \quad s_1 = 1, \quad s_2 = -1$$

Derivando è possibile proseguire nella costruzione della tabella:

$$\begin{array}{c|cc} 2 & -2 & 2 \\ \hline 1 & -4 & 0 \\ 0 & 2 & \end{array}$$

Una permanenza e una variazione di segno \rightarrow una radice a parte reale negativa e una a parte reale positiva.

- Esempio:

$$s^6 + s^5 - 2s^4 - 3s^3 - 7s^2 - 4s - 4 = 0$$

Tabella di Routh:

$$\begin{array}{c|cccc} 6 & 1 & -2 & -7 & -4 \\ 5 & 1 & -3 & -4 & \\ 4 & 1 & -3 & -4 & \\ \hline 3 & 0 & 0 & 0 & \end{array}$$

Equazione ausiliaria:

$$s^4 - 3s^2 - 4 = 0 \quad \rightarrow \quad s^2 = \frac{3 \pm \sqrt{9 + 16}}{2} = \begin{cases} 4 \\ -1 \end{cases} \quad \rightarrow \quad s = \begin{cases} 2 \\ -2 \\ j \\ -j \end{cases}$$

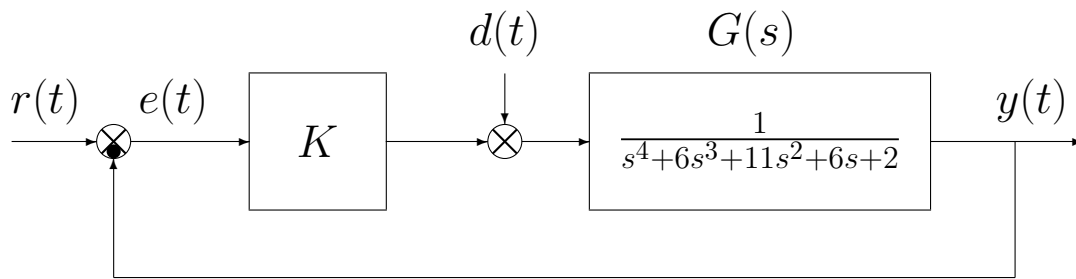
- Allo stesso risultato si giunge derivando l'equazione caratteristica:

$$\begin{array}{r|rrrr} 4 & 1 & -3 & -4 & \\ \hline 3 & 4 & -6 & & \\ 2 & -6 & -16 & & \\ 1 & -100 & 0 & & \\ 0 & -16 & & & \end{array}$$

Avvertenza: dopo aver derivato l'equazione ausiliaria, le permanenze che non sono "bilanciate" da un uguale numero di variazioni debbono essere interpretate come radici appartenenti all'asse immaginario (per la simmetria delle radici dell'equazione ausiliaria).

- Il criterio di Routh, essendo un criterio necessario e sufficiente, è molto utile per determinare le condizioni di stabilità al variare di un parametro qualsiasi presente all'interno dell'equazione caratteristica.

- Esempio:



- Il criterio di Routh può essere utilizzato anche per verificare la stabilità del sistema $G(s)$:

$$G(s) = \frac{1}{s^4 + 6s^3 + 11s^2 + 6s + 2}$$

In questo caso si applica il criterio di Routh al denominatore della funzione $G(s)$. La tabella di Routh é:

$$\begin{array}{c|ccc} 4 & 1 & 11 & 2 \\ 3 & 6 & 6 & 0 \\ 2 & 10 & 2 & \\ 1 & 48 & 0 & \\ 0 & 2 & & \end{array}$$

Dal criterio di Routh si ha che la funzione $G(s)$ é asintoticamente stabile.

- Funzione di trasferimento del sistema retroazionato:

$$G_0(s) = \frac{K G(s)}{1 + K G(s)} = \frac{K}{s^4 + 6s^3 + 11s^2 + 6s + K + 2}$$

In questo caso l'equazione caratteristica é funzione del parametro K :

$$s^4 + 6s^3 + 11s^2 + 6s + K + 2 = 0$$

Tabella di Routh:

$$\begin{array}{c|ccc} 4 & 1 & 11 & K + 2 \\ 3 & 6 & 6 & 0 \\ 2 & 10 & K + 2 & \\ 1 & 48 - 6K & 0 & \\ 0 & K + 2 & & \end{array}$$

Condizioni per la stabilità asintotica:

$$48 - 6K > 0, \quad K + 2 > 0$$

Il sistema, quindi, risulta asintoticamente stabile per i seguenti valori di K :

$$-2 < K < 8$$

- Per i valori limite si ha stabilità semplice: per $K = -2$ un polo è nell'origine; per $K = 8$ il sistema ha due poli complessi coniugati sull'asse immaginario in corrispondenza della seguente pulsazione:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{K^* + 2}{10}} = 1$$

- La pulsazione ω^* di attraversamento dell'asse immaginario può essere determinata scrivendo la seguente "equazione ausiliaria":

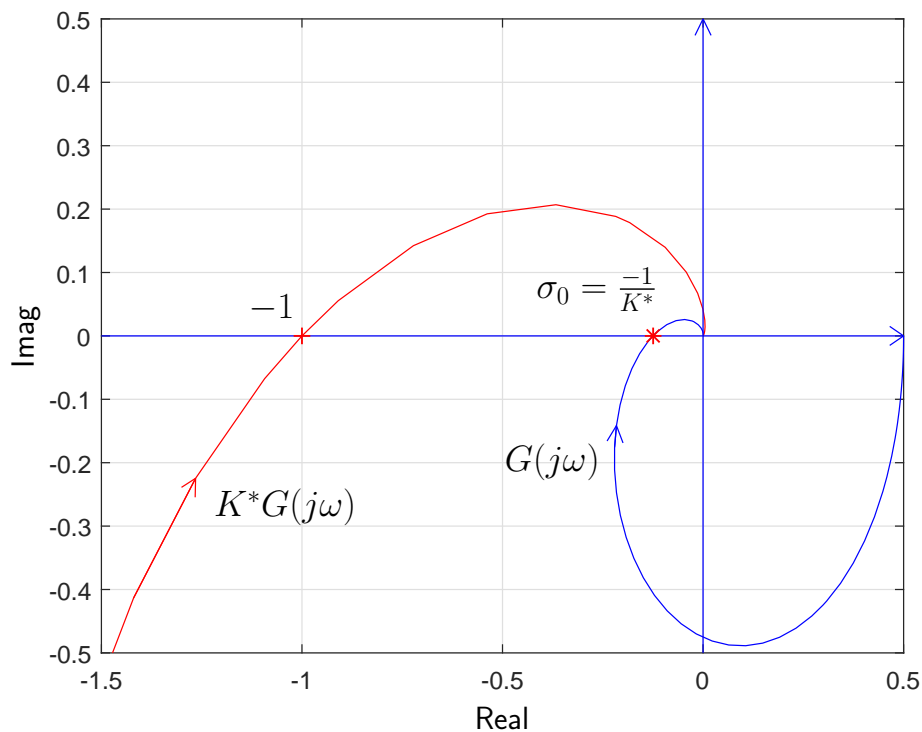
$$a_2 s^2 + a_0 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 10 s^2 + K^* + 2 = 0$$

sostituendo $s = j\omega^*$, e poi risolvendo l'equazione ausiliaria rispetto ad ω^* :

$$s = \pm j \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \quad \Rightarrow \quad \omega^* = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \quad \Leftrightarrow \quad \omega^* = \sqrt{\frac{K^* + 2}{10}} = 1.$$

- Questo metodo può essere applicato solo se la riga 1 della tabella di Routh si annulla per $K = K^*$.

- Molto spesso il criterio di Routh puó essere utilizzato anche per determinare il punto σ_0 dove il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ interseca il semiasse reale negativo.
- Per il sistema considerato il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ ha la seguente forma:



- Dopo aver calcolato K^* utilizzando il criterio di Routh, il punto σ_0 dove il diagramma di Nyquist interseca il semiasse reale negativo si determina nel seguente modo:

$$\sigma_0 = -\frac{1}{K^*}$$

- Il corrispondente valore della pulsazione ω^* é:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{K^* + 2}{10}} = 1.$$

Il criterio di Routh è lo strumento più semplice ed efficace per calcolare "esattamente" le condizioni di stabilità di un sistema retroazionato al variare dei parametri del sistema stesso. È bene ricordare che:

- Il criterio di Routh è *un criterio necessario e sufficiente* per cui i risultati da esso forniti sono "esatti".
- L'analisi di stabilità può essere fatta rispetto ad un parametro qualsiasi del sistema e non solo al variare del guadagno K . È possibile eseguire l'analisi di stabilità anche al variare di più parametri contemporaneamente.
- Nella costruzione della tabella di Routh è possibile moltiplicare tutti gli elementi di una riga per lo stesso valore "positivo" senza modificare i risultati dell'analisi di stabilità.
- Se nella costruzione della tabella si ottiene una riga tutta nulla (può accadere solo per una riga dispari), gli zeri dell'equazione ausiliaria che si ottiene dalla riga precedente (riga pari) sono un sottoinsieme degli zeri dell'equazione caratteristica di partenza. Le soluzioni dell'equazione ausiliaria sono simmetriche rispetto all'origine cioè sono simmetriche sia rispetto all'asse reale che all'asse immaginario.
- L'utilizzo del criterio di Routh permette di determinare anche le pulsazioni ω delle oscillazioni periodiche che si instaurano nel sistema retroazionato in corrispondenza dei valori limite dei parametri per quanto riguarda la stabilità.

Analisi di stabilità di alcuni semplici sistemi

- 1) Un sistema che si incontra molto frequentemente nello studio dei sistemi dinamici è il seguente:

$$G_1(s) = \frac{\alpha}{s(s+a)(s+b)}$$

L'equazione caratteristica del corrispondente sistema retroazionato è:

$$1 + K G(s) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad s^3 + (a+b)s^2 + ab s + \alpha K = 0.$$

Dalla tabella di Routh

$$\begin{array}{c|cc} 3 & 1 & ab \\ 2 & a+b & \alpha K \\ 1 & (a+b)ab - \alpha K & \\ 0 & \alpha K & \end{array}$$

si determina immediatamente che il sistema retroazionato è stabile per $0 < K < K^*$. Il valore limite K^* e la corrispondente pulsazione ω^* sono i seguenti:

$$K^* = \frac{(a+b)ab}{\alpha}, \quad \omega^* = \sqrt{ab}.$$

In questo caso il valore limite K^* coincide con il margine di ampiezza $M_\alpha = K^*$ del sistema.

- 2) Per il sistema

$$G_2(s) = \frac{(s+c)}{s(s+a)(s+b)}$$

si ha invece l'equazione caratteristica

$$s^3 + (a+b)s^2 + (ab+K)s + Kc = 0$$

da cui si ricava la tabella di Routh

$$\begin{array}{c|cc} 3 & 1 & ab+K \\ 2 & a+b & Kc \\ 1 & (a+b)(ab+K) - Kc & \\ 0 & Kc & \end{array}$$

In questo caso, il sistema retroazionato è stabile per $0 < K < K^*$ se $c > a+b$, e per $K > 0$ se $c < a+b$. I valori di K^* ed ω^* corrispondenti alla stabilità critica sono:

$$K^* = \frac{(a+b)ab}{c-a-b}, \quad \omega^* = \sqrt{\frac{abc}{c-a-b}}$$

Calcolo della pulsazione limite ω^*

- Sia data un'equazione caratteristica del terzo ordine

$$a_3(K)s^3 + a_2(K)s^2 + a_1(K)s + a_0(K) = 0$$

dove i coefficienti $a_i(K)$ ($i = 0, \dots, 3$) sono funzioni di un parametro variabile K . La pulsazione ω^* corrispondente al valore limite K^* è:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{a_0(K^*)}{a_2(K^*)}} = \sqrt{\frac{a_1(K^*)}{a_3(K^*)}} \quad (1)$$

Infatti, nel caso di equazione caratteristica del terzo ordine, la tabella di Routh è

$$\begin{array}{c|ccc} 3 & a_3(K) & & a_1(K) \\ 2 & a_2(K) & & a_0(K) \\ 1 & a_2(K)a_1(K) - a_0(K)a_3(K) & & \\ 0 & a_0(K) & & \end{array}$$

In corrispondenza del valore limite K^* il coefficiente della riga 1 si annulla, per cui si ha

$$a_2(K^*)a_1(K^*) - a_0(K^*)a_3(K^*) = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{a_0(K^*)}{a_2(K^*)} = \frac{a_1(K^*)}{a_3(K^*)} \quad (2)$$

La pulsazione ω^* si determina utilizzando l'equazione ausiliaria (riga 2):

$$a_2(K^*)s^2 + a_0(K^*) = 0 \quad \rightarrow \quad \omega^* = \sqrt{\frac{a_0(K^*)}{a_2(K^*)}} \quad (3)$$

La relazione fornita si ottiene combinando tra loro le relazioni (2) e (3).

- Nel caso invece in cui l'equazione caratteristica sia del quarto ordine:

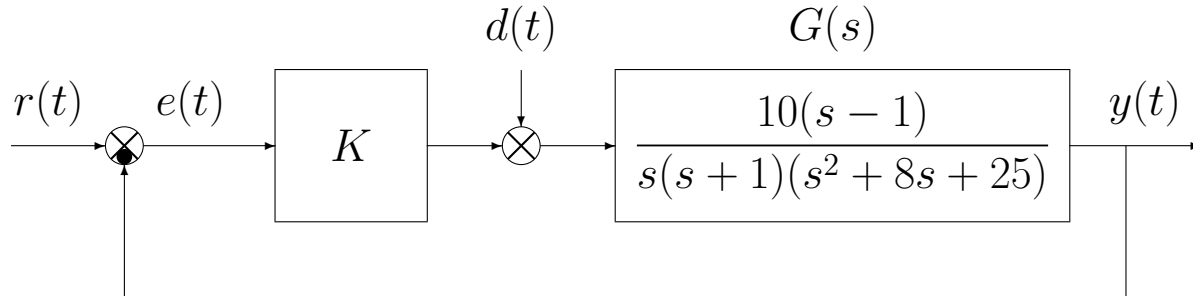
$$a_4(K)s^4 + a_3(K)s^3 + a_2(K)s^2 + a_1(K)s + a_0(K) = 0$$

la pulsazione ω^* si determina utilizzando la seguente formula:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{a_1(K^*)}{a_3(K^*)}}$$

Esempio

Determinare per quali valori di K il seguente sistema retroazionato



è asintoticamente stabile. L'equazione caratteristica del sistema è

$$1 + K G(s) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 1 + \frac{10K(s-1)}{s(s+1)(s^2+8s+25)} = 0$$

cioè

$$s^4 + 9s^3 + 33s^2 + (25 + 10K)s - 10K = 0$$

La corrispondente tabella di Routh è la seguente

$$\begin{array}{c|ccc}
 4 & 1 & 33 & -10K \\
 3 & 9 & 25 + 10K & \\
 2 & 272 - 10K & -90K & \\
 1 & (272 - 10K)(25 + 10K) + 810K & & \\
 0 & -90K & &
 \end{array} \quad (4)$$

Si noti che essendo richiesto solamente lo studio degli intervalli di stabilità al variare di K , nella costruzione della tabella vi può evitare di dividere gli elementi di una riga per il primo coefficiente della riga precedente in quanto tale elemento dovrà necessariamente essere positivo affinché il sistema retroazionato sia stabile. Per esempio, nella costruzione della tabella (4) la riga 2 non è stata divisa per 9 e la riga 1 non è stata divisa per $272 - 10K$.

In questo caso il sistema retroazionato è asintoticamente stabile se tutti gli elementi della prima colonna sono positivi, cioè se gli ultimi tre elementi della prima colonna sono positivi:

$$2) \quad 272 - 10K > 0 \quad 1) \quad 340 + 164K - 5K^2 > 0 \quad 0) \quad -90K > 0$$

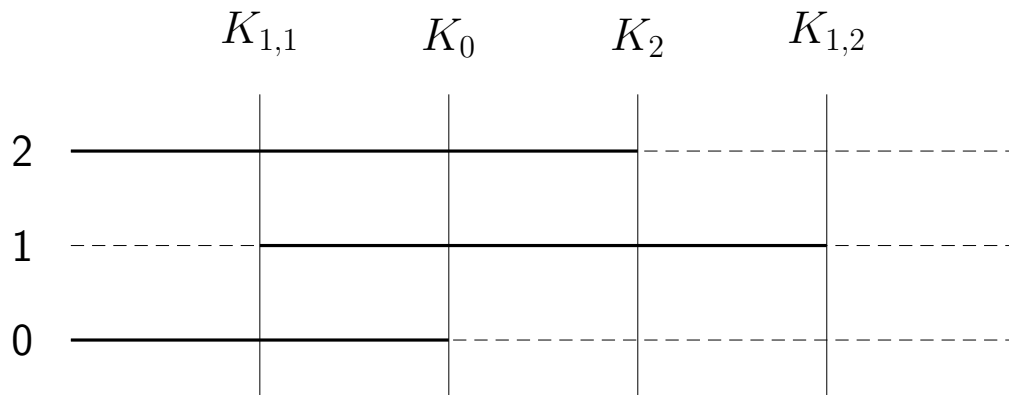
Questi tre elementi si annullano per i seguenti valori di K :

$$2) \quad K_2 = 27.2, \quad 1) \quad K_{1,*} = \begin{cases} K_{1,1} = \frac{164 - \sqrt{33696}}{10} = -1.956 \\ K_{1,2} = \frac{164 + \sqrt{33696}}{10} = 34.7565 \end{cases} \quad 0) \quad K_0 = 0$$

Si ha quindi stabilità asintotica se valgono le seguenti tre disequazioni:

$$2) \quad K < K_2 \quad 1) \quad K_{1,1} < K < K_{1,2} \quad 0) \quad K < K_0$$

La rappresentazione grafica di queste tre disequazioni è la seguente:



Da tale figura risulta chiaro che l'unico intervallo di stabilità al variare di K è:

$$K_{1,1} < K < K_0 \quad \Leftrightarrow \quad -1.956 < K < 0$$

La pulsazione ω^* corrispondente al valore limite $K_{1,1}$ è:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{a_1(K_{1,1})}{a_3}} = \sqrt{\frac{25 + 10K_{1,1}}{9}} = 0.7771.$$