

CONTROLLI AUTOMATICI

Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/ControlliAutomatici.html>

ANALISI DEI SISTEMI IN RETROAZIONE E FUNZIONI DI SENSITIVITA'

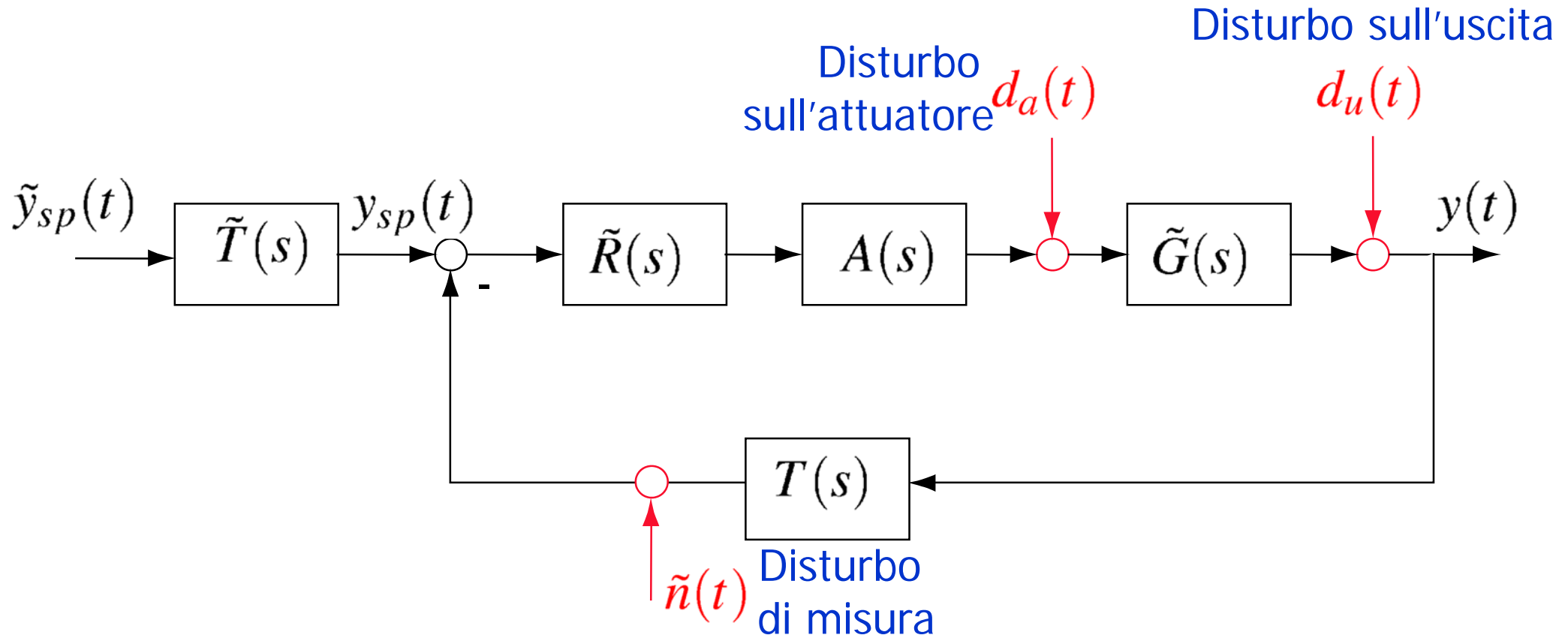
Ing. Luigi Biagiotti

e-mail: luigi.biagiotti@unimore.it

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti>

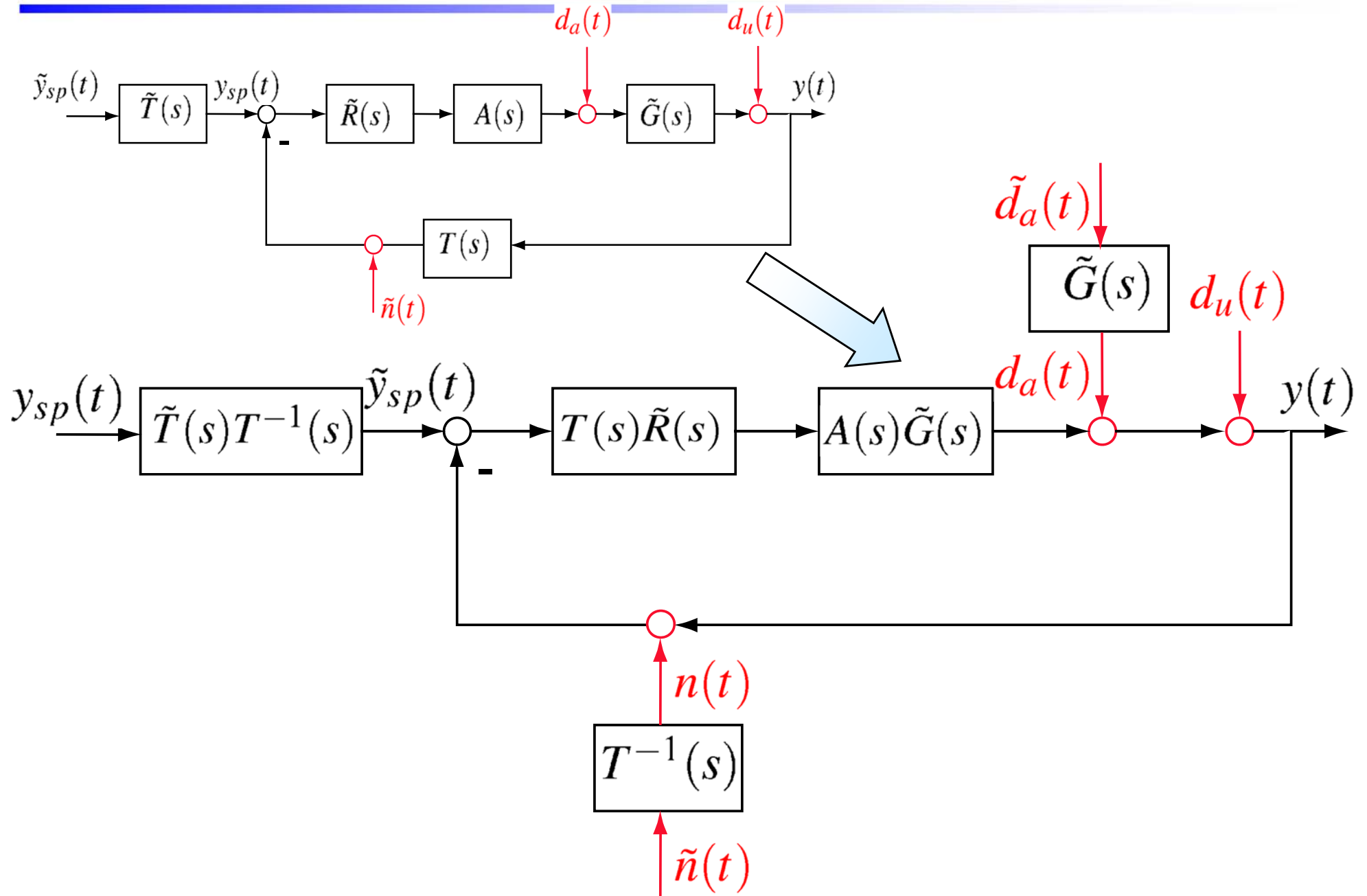
Schema di riferimento per il controllo in retroazione

- Come già visto lo schema a blocchi reale di un sistema di controllo in retroazione può essere rappresentato come

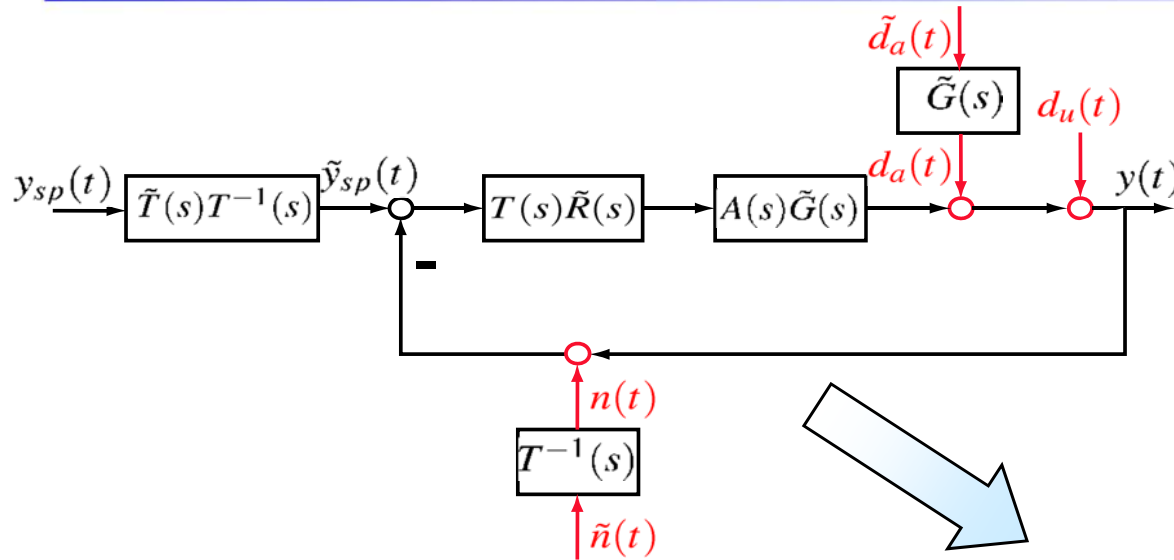


- Il segnale di riferimento $\tilde{y}_{sp}(t)$ viene filtrato da una replica della dinamica del sensore ($\tilde{T}(s) \approx T(s)$) per ottenere un riferimento “compatibile” con la dinamica dell'uscita retroazionata

Dallo schema a blocchi reale a quello ideale



Dallo schema a blocchi reale a quello ideale



Dinamica "equivalente" del regolatore:

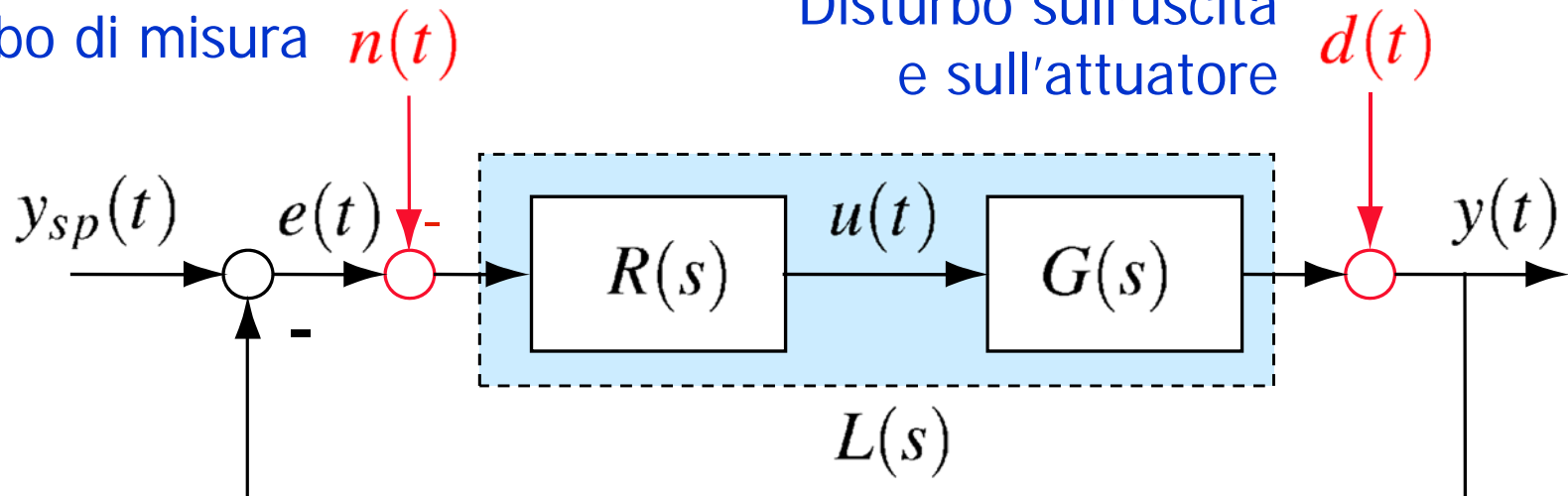
$$R(s) = T(s)\tilde{R}(s)$$

Dinamica "equivalente" dell'impianto:

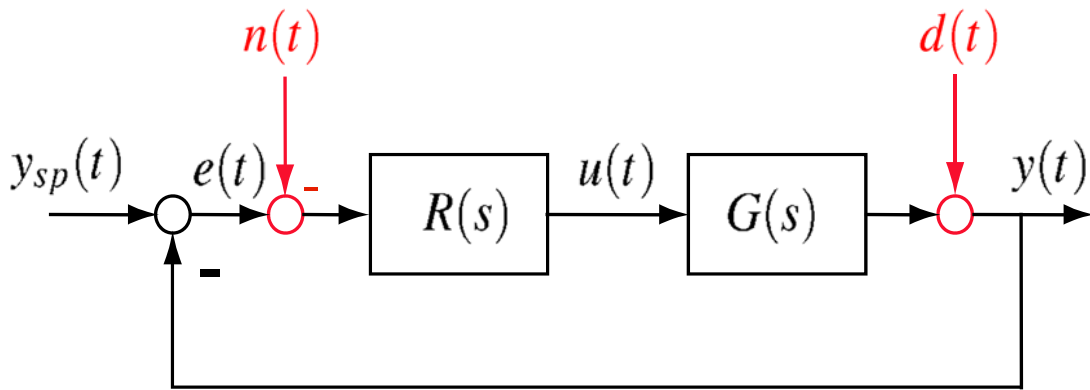
$$G(s) = A(s)\tilde{G}(s)$$

Disturbo di misura $n(t)$

Disturbo sull'uscita e sull'attuatore $d(t)$



Ingressi e uscite di interesse



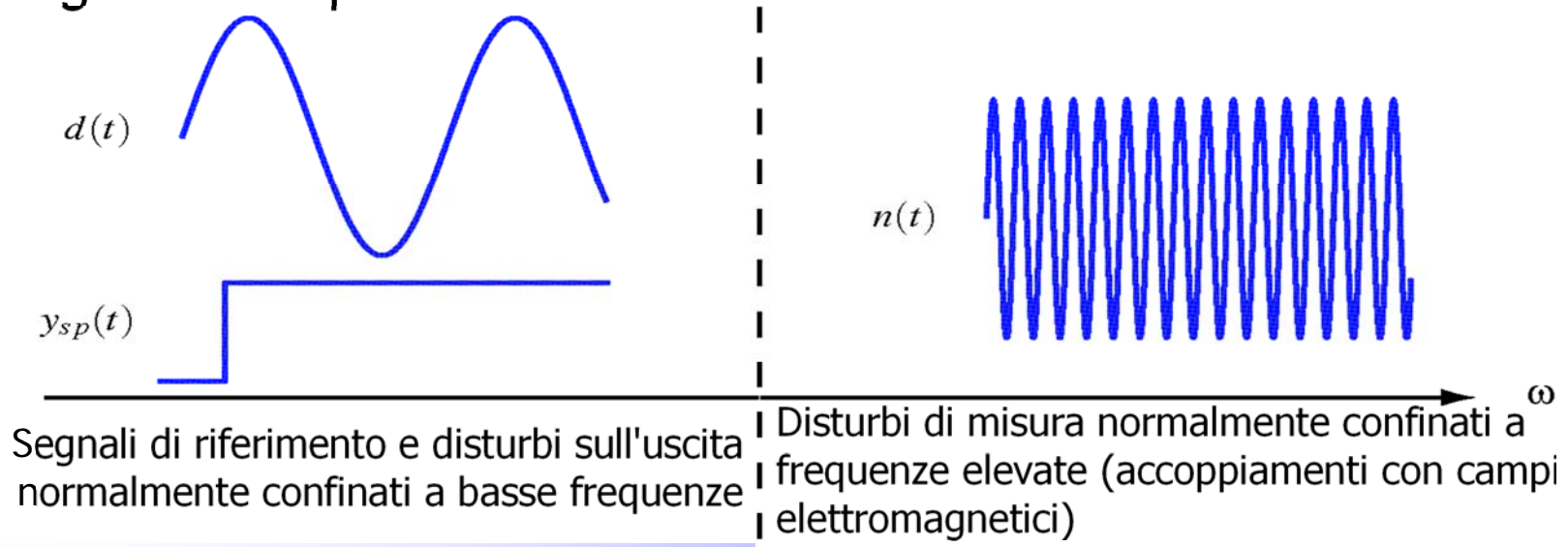
Uscite di interesse:

{	$e(t)$	→	Errore di inseguimento
{	$y(t)$	→	Uscita controllata
{	$u(t)$	→	Azione di controllo

Ingressi significativi:

{	$y_{sp}(t)$	→	Riferimento (set point)
{	$d(t)$	→	Disturbo su uscita e attuatore
{	$n(t)$	→	Disturbo di misura

- Nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche le bande spettrali del segnale di riferimento e del disturbo sull'uscita sono disgiunte da quella del disturbo di misura



Funzioni di sensitività

- Le funzioni di sensitività rappresentano le funzioni di trasferimento tra gli ingressi significativi e le uscite di interesse:
 - **Funzione di sensitività**

$$S(s) = \frac{1}{1 + R(s)G(s)} = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{E(s)}{Y_{sp}(s)} = -\frac{E(s)}{D(s)}$$

- **Funzione di sensitività complementare**

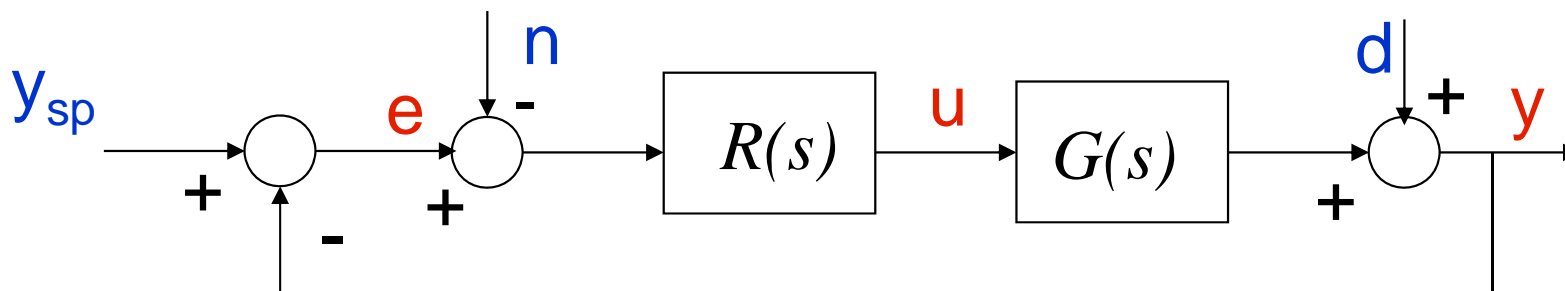
$$F(s) = \frac{R(s)G(s)}{1 + R(s)G(s)} = \frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = -\frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{E(s)}{N(s)}$$

- **Funzione di sensitività del controllo**

$$Q(s) = \frac{R(s)}{1 + R(s)G(s)} = \frac{U(s)}{Y_{sp}(s)} = -\frac{U(s)}{D(s)} = -\frac{U(s)}{N(s)}$$

Funzioni di sensitività

- Schema di riferimento



Matrice delle funzioni di trasferimento
tra le diverse **uscite** di interesse
e gli **ingressi**

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

$$F(s) = \frac{R(s)G(s)}{1 + R(s)G(s)}$$

$$Q(s) = \frac{R(s)}{1 + R(s)G(s)}$$

$$\begin{bmatrix} Y(s) \\ U(s) \\ E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(s) & S(s) & -F(s) \\ Q(s) & -Q(s) & -Q(s) \\ S(s) & -S(s) & F(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{sp}(s) \\ D(s) \\ N(s) \end{bmatrix}$$

Funzioni di sensitività

- Le funzioni $S(s)$ e $F(s)$ dipendono congiuntamente da $R(s)$ e $G(s)$ (funzione di anello) mentre nella funzione di sensitività del controllo $Q(s)$ la fdt del regolatore $R(s)$ entra singolarmente
- Il denominatore (e in particolare i poli) di tutte le funzioni di sensitività è lo stesso. **La stabilità del sistema in retroazione è indipendente dal particolare ingresso**
- Strutturalmente si ha che $S(s)+F(s)=1$. In pratica questo significa che **non è possibile imporre, attraverso il progetto del regolatore, specifiche arbitrarie.**
- **Esempio 1.**
 - Cancellazione del disturbo d sull'uscita y $\implies S(s) = 0$
 \Updownarrow **No!**
 - Cancellazione del disturbo n sull'uscita y $\implies F(s) = 0$
- **Esempio 2.**
 - Inseguimento del riferimento y_{sp} con y $\implies F(s) = 1$
 \Updownarrow **No!**
 - Cancellazione del disturbo n sull'uscita y $\implies F(s) = 0$

Studio del sistema in retroazione

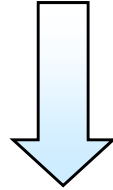
- **Obiettivo:** dedurre conclusioni sulle proprietà statiche e dinamiche del sistema in retroazione dallo studio della funzione ad anello aperto
 $L(s)=R(s)G(s)$

Studio delle funzioni di sensitività in relazione a $L(s)$

- **Metodo:** Individuare proprietà che la $L(s)$ deve avere in modo che le funzioni di sensitività del sistema chiuso in retroazione abbiano certe caratteristiche (**sintesi del regolatore**)
- **Approccio simile all'uso dei criteri di Nyquist e Bode per lo studio della stabilità dei sistemi chiusi in retroazione**

Stabilità e sistemi in retroazione

- **Obiettivo:** dedurre conclusioni sulla stabilità robusta del sistema in retroazione dallo studio nel dominio della frequenza della funzione ad anello $L(s) = R(s)G(s)$



Criterio di Bode
(caso particolare del criterio di Nyquist)

Importanza del risultato:

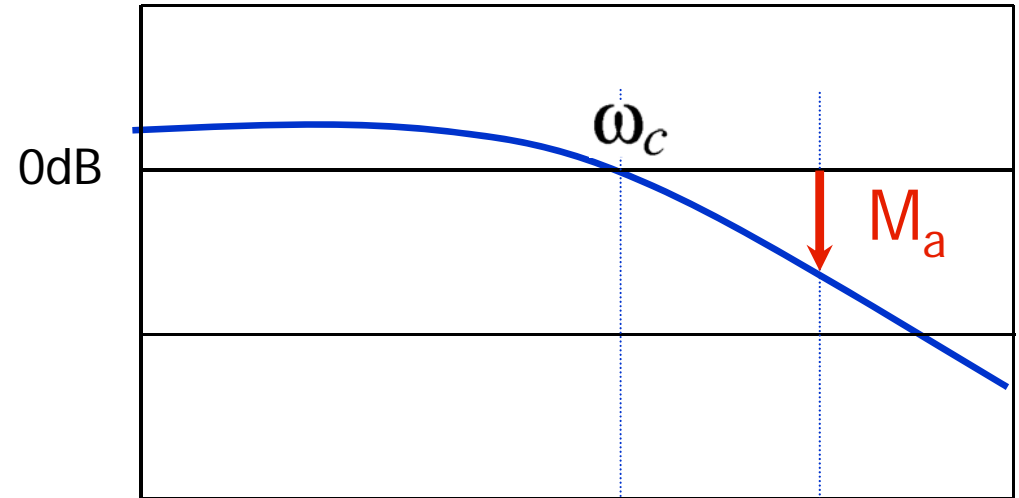
1. Dalla lettura di un solo punto del diagramma di Bode di $L(s)$ si deduce la stabilità o meno del sistema chiuso in retroazione $F(s)$.
2. Possibilità di ottenere misure sulla robustezza della stabilità del sistema in retro a fronte di incertezze sul diagramma dei moduli e delle fasi di $L(s)$.

Margini di stabilità

Margine di ampiezza

$M_a := -|L(j\omega_f)|_{db}$ dove

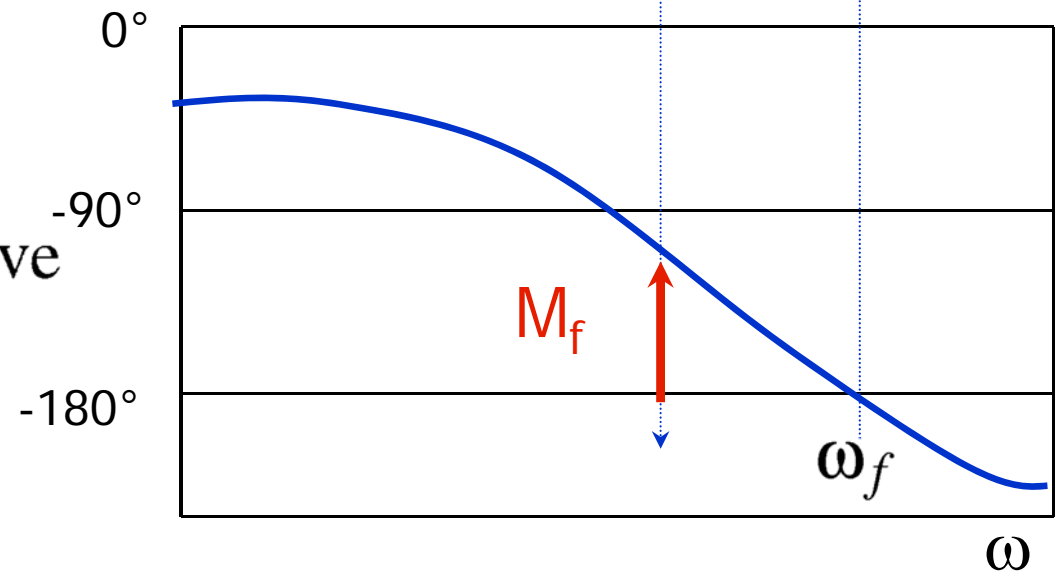
$\omega_f : \arg(L(j\omega_f)) = -180^\circ$



Margine di fase

$M_f := 180^\circ - |\arg(L(j\omega_c))|$ dove

$\omega_c : |L(j\omega_c)|_{db} = 0$



Stabilità: Criterio di Bode

- **Ipotesi**

- $L(s)$ non ha poli a parte reale positiva
 - il criterio vale solo per sistemi stabili
- Il diagramma di Bode del modulo di $L(j\omega)$ attraversa una sola volta l'asse a 0dB
- $L(s)$ ha guadagno statico > 0 ($L(0) > 0$)

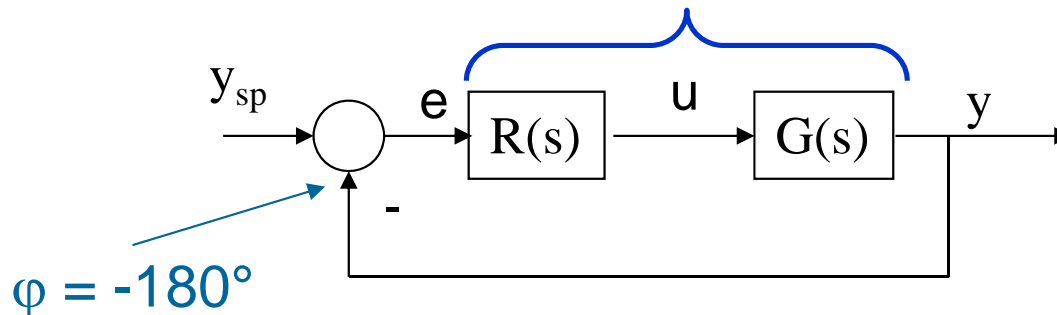
- **Tesi**

- **condizione necessaria e sufficiente per l'asintotica stabilità del sistema in retroazione è che il Margine di Fase di $L(s)$ sia > 0**

Stabilità e Diagrammi di Bode

- Margine di fase e stabilità
 - **margin di fase**
 - proprietà del sistema in catena aperta
 - lo smorzamento della risposta del sistema chiuso in retroazione unitaria dipende dal margine di fase
 - **se esiste almeno una frequenza ω_0 alla quale**
 - la fase è -180°
 - il guadagno è maggiore di uno
 - **il sistema chiuso in retroazione unitaria è instabile.**

$$\text{Se } |L(j\omega_0)| > 1 \text{ e } \arg(L(j\omega_0)) = -\pi$$



Stabilità robusta

Margine di ampiezza

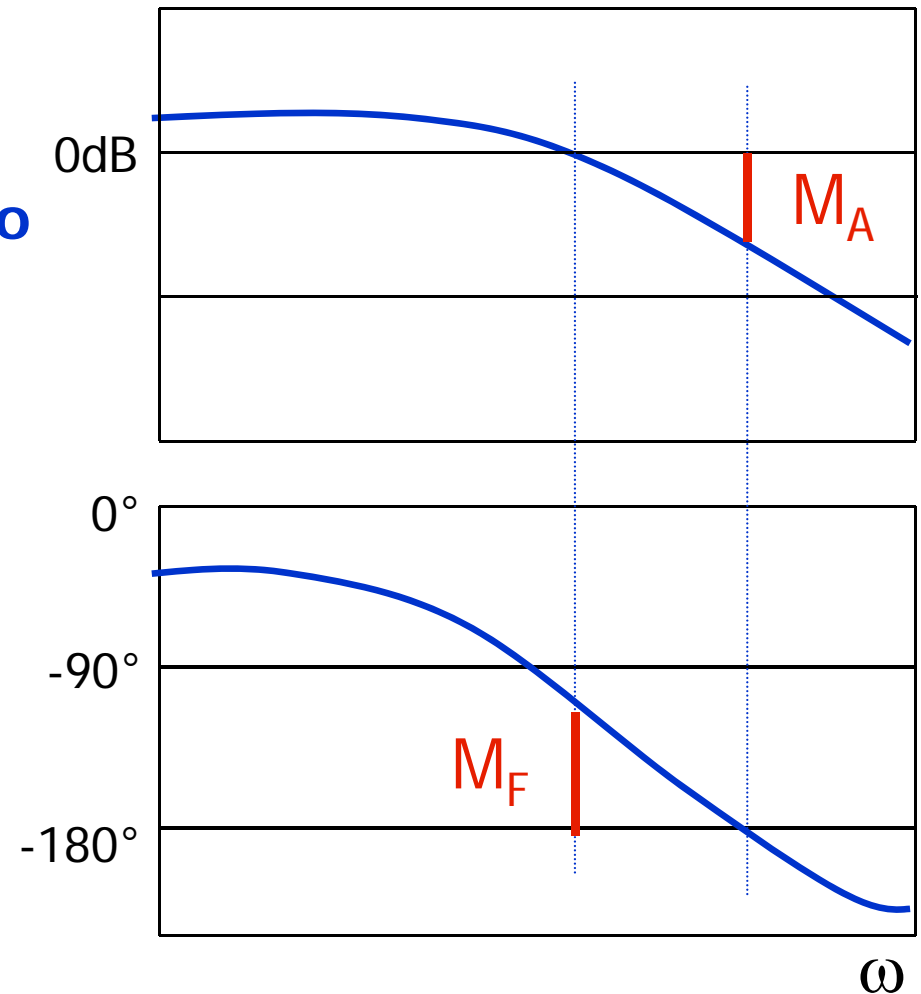
Misura di **robustezza della stabilità rispetto ad incertezze sul guadagno di anello.**

Rappresenta la massima variazione del guadagno di anello che non pregiudica la stabilità

Margine di fase

Misura di **robustezza della stabilità rispetto ad incertezze sulla fase della funzione d'anello.**

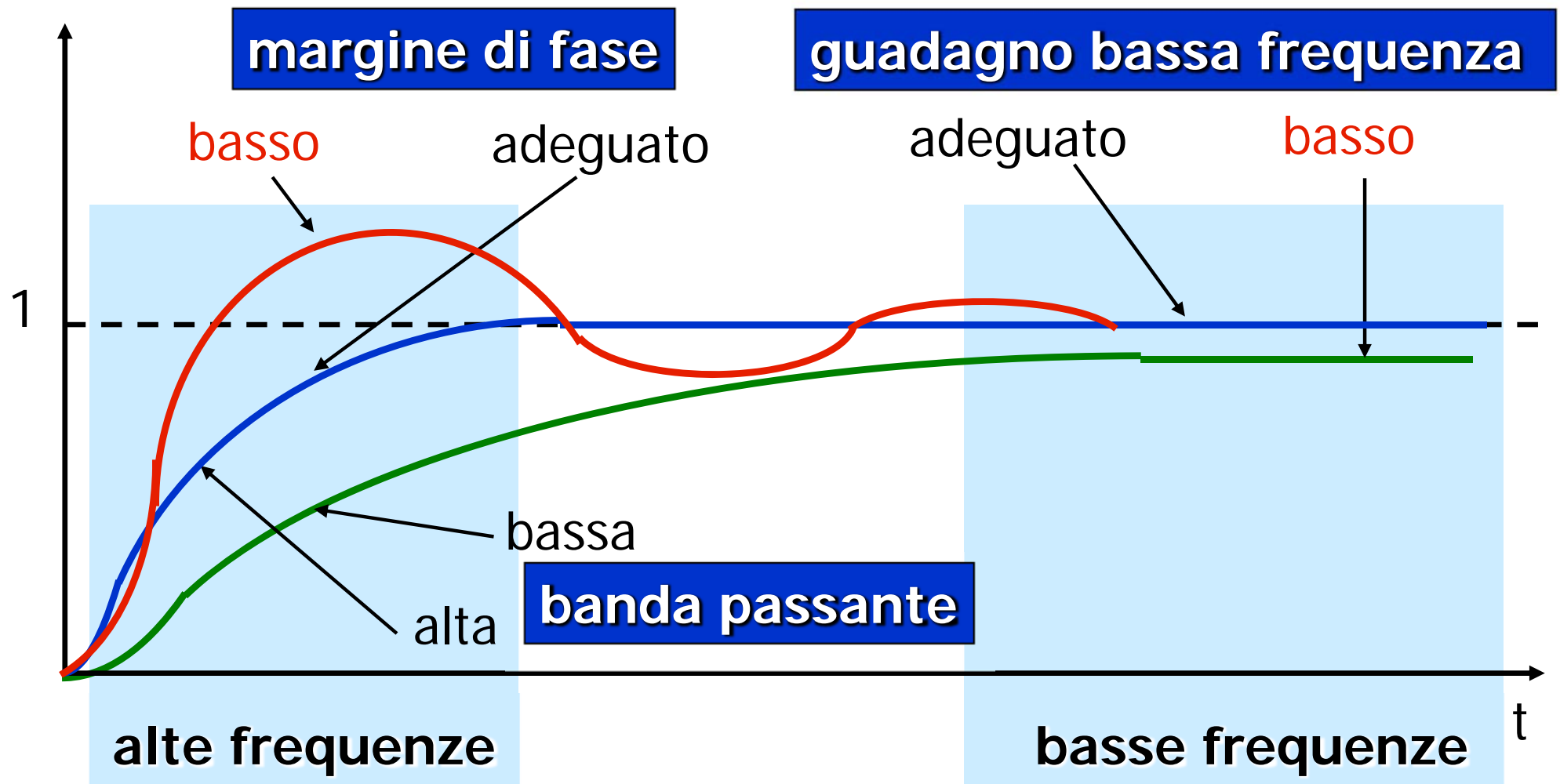
Rappresenta la massima variazione di fase nell'anello che non pregiudica la stabilità



vanno considerati entrambi

Relazioni tra rappresentazioni diverse

- Caratterizzazione frequenziale della risposta di sistemi in retroazione



Funzione di sensitività complementare

$$F(s) = \frac{R(s)G(s)}{1 + R(s)G(s)} = \frac{L(s)}{1 + L(s)}$$

$$\begin{bmatrix} Y(s) \\ U(s) \\ E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(s) & S(s) & -F(s) \\ Q(s) & -Q(s) & -Q(s) \\ S(s) & -S(s) & F(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{sp}(s) \\ D(s) \\ N(s) \end{bmatrix}$$

- **Obiettivi contrastanti**

Dinamica tra disturbo di misura ed errore di inseguimento/uscita



$F(s)$ idealmente uguale a 0 per compensare in modo esatto il disturbo di misura

Dinamica tra riferimento e uscita



$F(s)$ idealmente uguale a 1 per avere replica esatta del segnale di riferimento sull'uscita

Funzione di sensitività complementare - analisi poli/zeri

$$L(s) = \frac{N_L(s)}{D_L(s)} \quad \Rightarrow \quad F(s) = \frac{N_L(s)}{N_L(s) + D_L(s)}$$

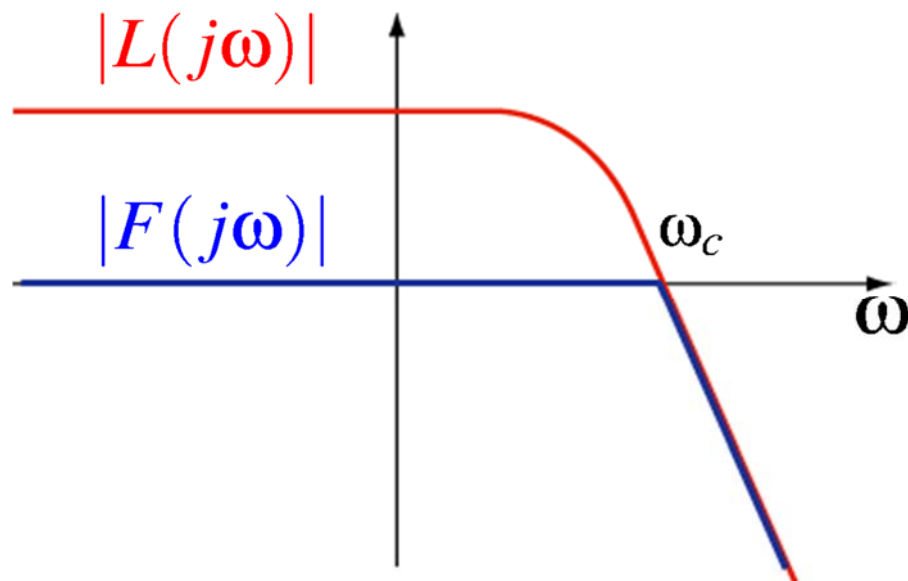
- Gli zeri di $F(s)$ coincidono con gli zeri di $L(s)$
- I poli di $F(s)$ dipendono in maniera complessa dai poli e dagli zeri di $L(s)$ (vedi luogo delle radici)

Non si possono assegnare arbitrariamente gli zeri di $F(s)$ attraverso il progetto del regolatore. Infatti gli zeri della funzione di trasferimento tra riferimento e uscita sono l'unione di quelli del sistema (fissati) e quelli del regolatore (assegnabili)

Funzione di sensitività complementare - analisi in frequenza

$$F(j\omega) = \frac{R(j\omega)G(j\omega)}{1 + R(j\omega)G(j\omega)} = \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)}$$

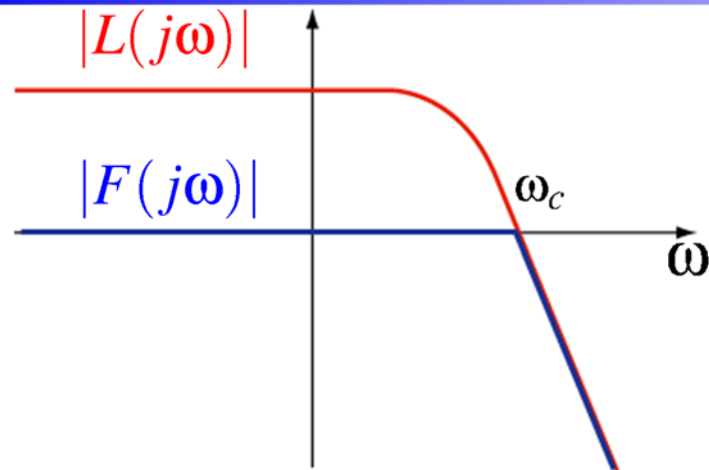
- Si assumerà che la funzione di risposta armonica di anello $L(j\omega)$ abbia le caratteristiche di un passa basso:
 - $|L(j\omega)| \gg 1$ a basse frequenze
 - $|L(j\omega)| \ll 1$ a frequenze elevate



Andamento approssimato di $|F(j\omega)|$

$$|F(j\omega)| = \frac{|L(j\omega)|}{|1 + L(j\omega)|} \approx \begin{cases} 1 & \omega < \omega_c \\ |L(j\omega)| & \omega > \omega_c \end{cases}$$

Funzione di sensitività complementare - analisi in frequenza



$$|F(j\omega)| = \frac{|L(j\omega)|}{|1 + L(j\omega)|} \approx \begin{cases} 1 & \omega < \omega_c \\ |L(j\omega)| & \omega > \omega_c \end{cases}$$

- L'andamento approssimato di $F(j\omega)$ mette in evidenza che
 - Il sistema in retroazione
 - **approssima un filtro passa basso a guadagno unitario**
 - il suo comportamento si mantiene anche se il sistema in catena aperta cambia le sue caratteristiche
 - **possiede quindi poli dominanti nell'intorno di ω_c**
 - **il numero dipende dalla pendenza della $L(j\omega)$ in $\omega = \omega_c$**
 - se la pendenza è -1 avremo un solo polo dominante reale
 - se la pendenza è -2 avremo una coppia di poli dominanti
- In quest'ultimo caso lo smorzamento dipende dal margine di fase

Funzione di sensitività complementare - analisi in frequenza

- La relazione (approssimata) tra il margine di fase di $L(j\omega)$ e lo smorzamento dei poli dominanti di $F(j\omega)$ può essere ricavata con semplici passaggi sfruttando il fatto che $|L(j\omega_c)| = 1$ e $\arg(L(j\omega_c)) = \varphi_c$

$$|F(j\omega_c)| = \frac{|L(j\omega_c)|}{|1 + L(j\omega_c)|} = \frac{1}{|1 + e^{j\varphi_c}|} = \frac{1}{|1 + \cos(\varphi_c) + j \sin(\varphi_c)|}$$

$$|F(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{(1 + \cos(\varphi_c))^2 + \sin^2(\varphi_c)}} = \frac{1}{\sqrt{2 + 2\cos(\varphi_c)}}$$

$$\Downarrow M_f = 180^\circ - |\varphi_c|$$

$$|F(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2(1 - \cos(M_f))}} = \frac{1}{\sqrt{4 \sin^2(M_f/2)}} = \frac{1}{2 \sin(M_f/2)}$$

- Dall'ipotesi che $F(j\omega)$ abbia una coppia di poli c.c. con pulsazione naturale $\omega_n = \omega_c$ e coefficiente di smorzamento δ segue che

$$|F(j\omega_n)| = |F(j\omega_c)| = \frac{1}{2\delta} \Rightarrow \delta = \sin(M_f/2) \approx \frac{M_f}{2}$$

Funzione di sensitività complementare - analisi in frequenza

- Smorzamento del sistema in retroazione e margine di fase

$$\delta \approx \frac{M_f}{2} \frac{\pi}{180^\circ} \approx \frac{M_f}{100} \text{ con } M_f \text{ espresso in gradi}$$

Regola empirica:

Se il margine di fase (sistema in catena aperta) è < di 75° il sistema in retroazione avrà poli complessi coniugati

- L'analisi della funzione di sensitività complementare ci consente di mettere in relazione proprietà della funzione di trasferimento di anello (margine di fase e pulsazione di attraversamento) con la pulsazione naturale e lo smorzamento dei poli dominanti del sistema in retroazione

Abbiamo stabilito un importantissimo legame tra

Analisi in catena aperta



Proprietà del sistema in retroazione

Funzione di sensitività complementare - analisi in frequenza

- Esempio: $L(s) = \frac{20}{(1 + 10s)(1 + 2s)(1 + 0.2s)}$

caratterizzata dai seguenti margini $M_a = 3.3660$, $\omega_f = 1.7464$

$$M_f = 23.9670,$$

$$\omega_c = 0.9276$$

La funzione di sensitività complementare risulta:

$$F(s) = \frac{5}{(s + 5.208)(s^2 + 0.3921s + 1.008)}$$

caratterizzata da 3 poli con pulsazione naturale e coefficiente di smorzamento

$$\omega_{n_1} = 1.0040$$

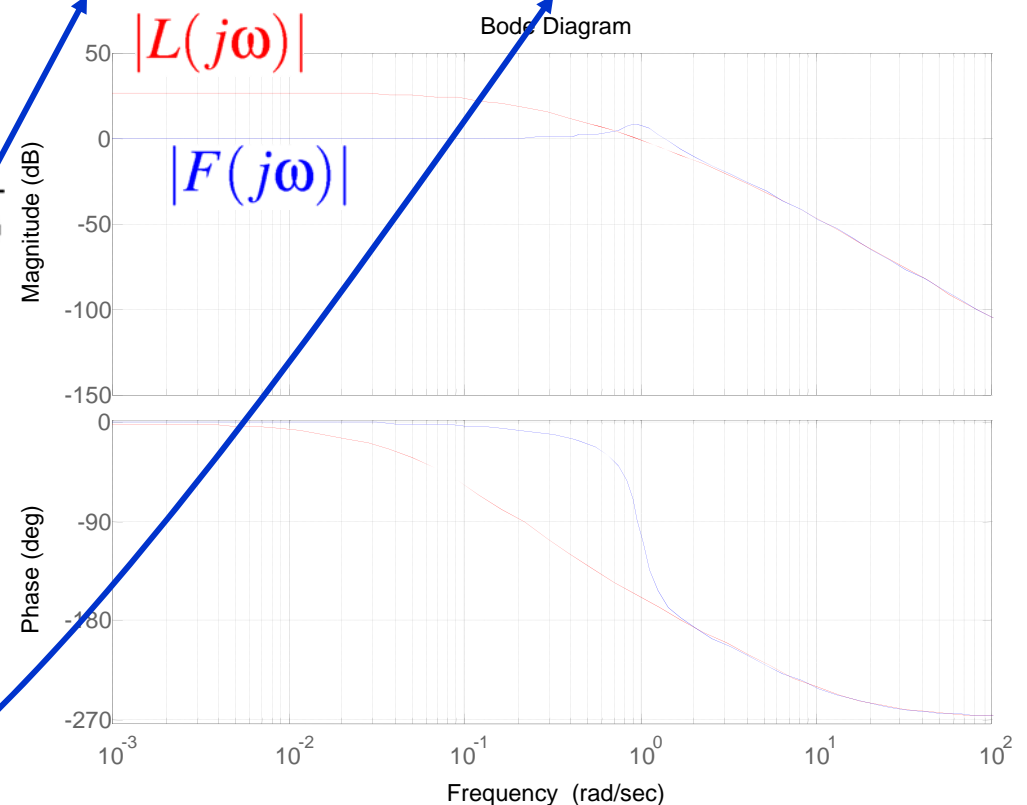
$$\delta_{n_1} = 0.1953$$

$$\omega_{n_2} = 1.0040$$

$$\delta_{n_2} = 0.1953$$

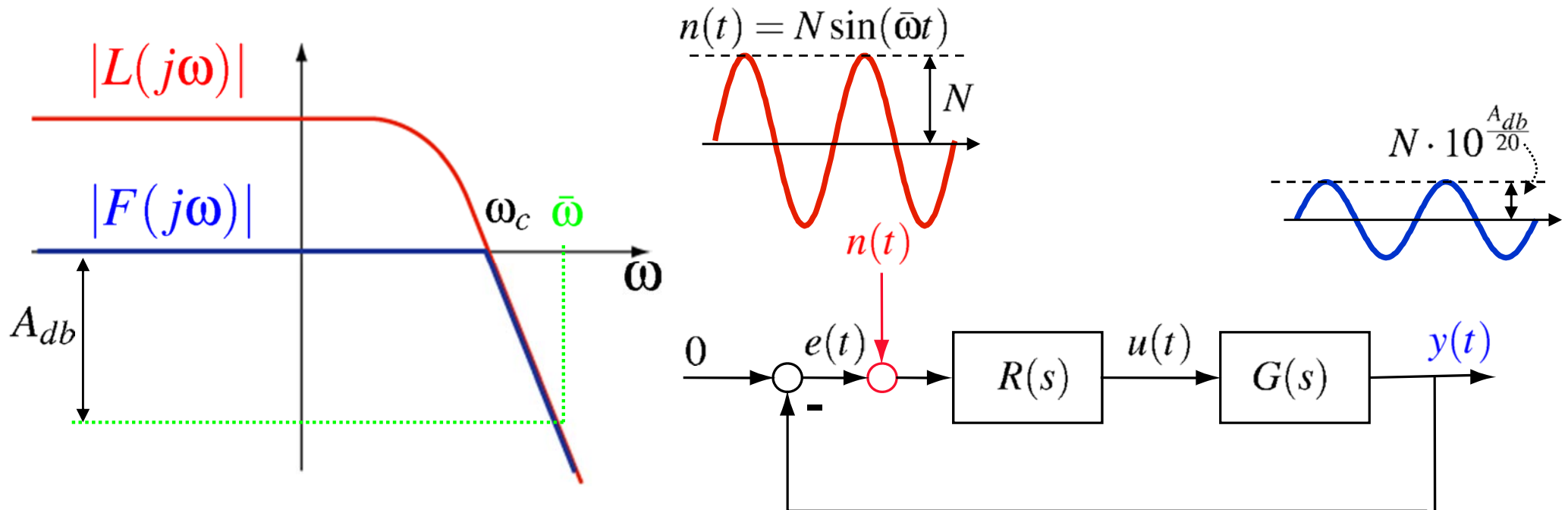
$$\omega_{n_3} = 5.2079$$

$$\delta_{n_3} = 1.0000$$



Funzione di sensitività complementare - analisi in frequenza

- Dall'andamento approssimato di $F(j\omega)$ si ricava che
 - Segnali di riferimento y_{sp} (e disturbi n) a frequenze sotto la pulsazione ω_c (pulsazione di attraversamento di $|L(j\omega)|$) vengono fedelmente riprodotti in uscita a regime
 - Disturbi di misura n (e riferimenti y_{sp}) a frequenze sopra la pulsazione ω_c vengono fortemente attenuati in uscita



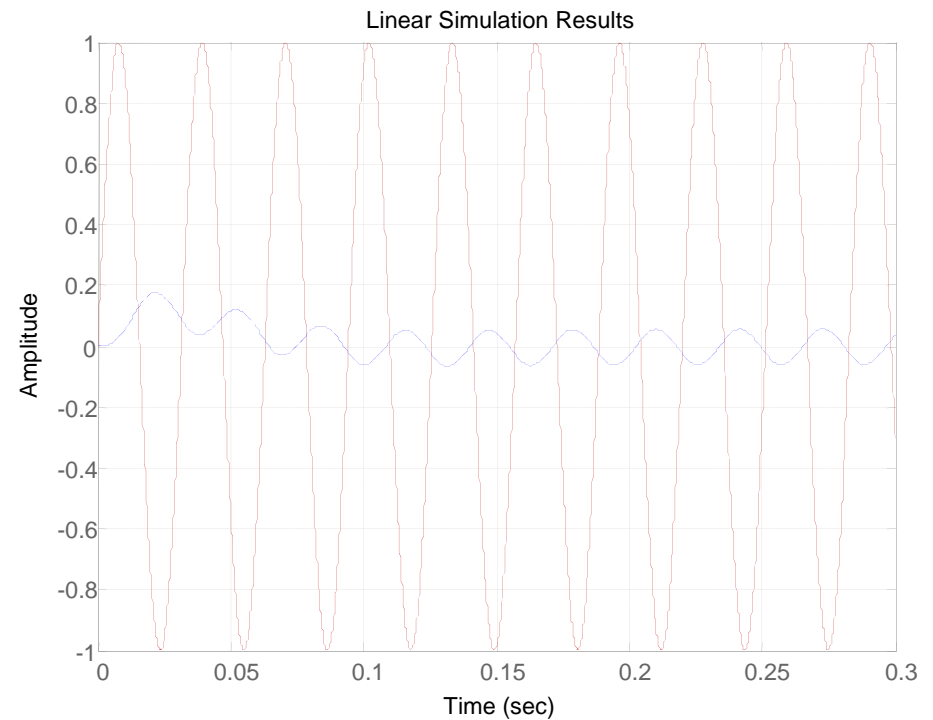
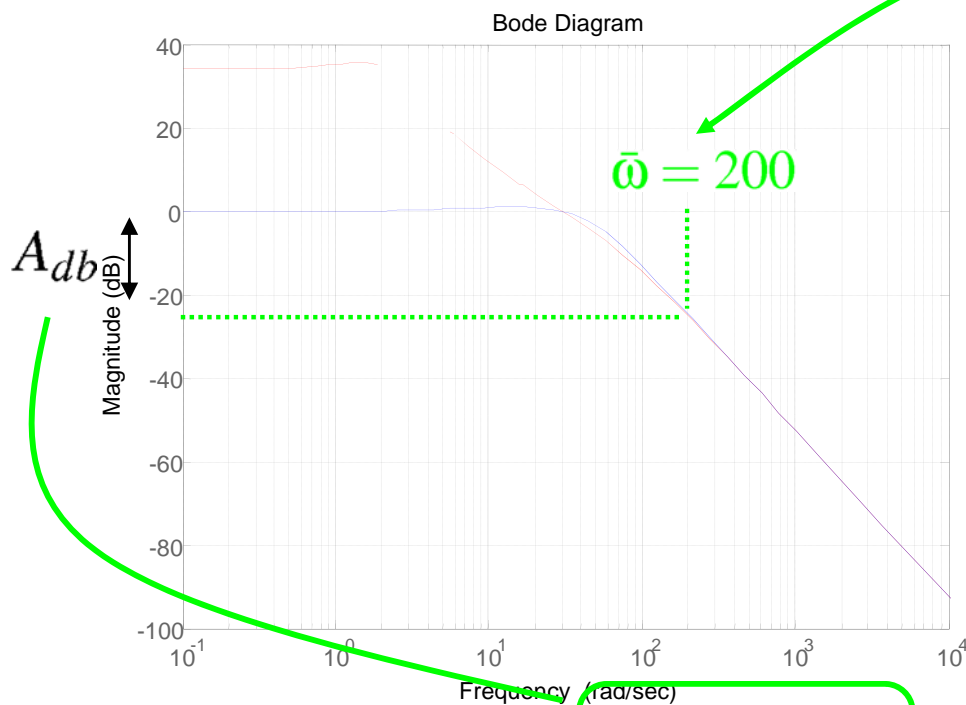
Funzione di sensitività complementare - analisi in frequenza

- Esempio

$$R(s) = \frac{0.1578s + 1}{0.0134s + 1} \quad G(s) = \frac{200}{s^2 + 2s + 4}$$

$$L(s) = \frac{200(0.1578s + 1)}{(0.0134s + 1)(s^2 + 2s + 4)}$$

$$n(t) = \sin(200t)$$



$$|L(j\bar{\omega})| = |L(j200)| = -25.1619\text{db} = 0.0552$$

$$|F(j\bar{\omega})| = |F(j200)| = -24.6985\text{db} = 0.0582$$

$$y(t) = 0.0582 \sin(200t + \arg\{F(j\omega)\})$$

Funzione di sensitività

$$S(s) = \frac{1}{1 + R(s)G(s)} = \frac{1}{1 + L(s)} \quad \begin{bmatrix} Y(s) \\ U(s) \\ E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(s) & S(s) & -F(s) \\ Q(s) & -Q(s) & -Q(s) \\ S(s) & -S(s) & F(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{sp}(s) \\ D(s) \\ N(s) \end{bmatrix}$$

- La funzione di sensitività rappresenta:
 - La dinamica tra set-point e errore di inseguimento
 - La dinamica tra disturbo sull'uscita ed errore di inseguimento/uscita
- **Obiettivo:** tenere $S(s)$ prossima a zero (errore di inseguimento basso)

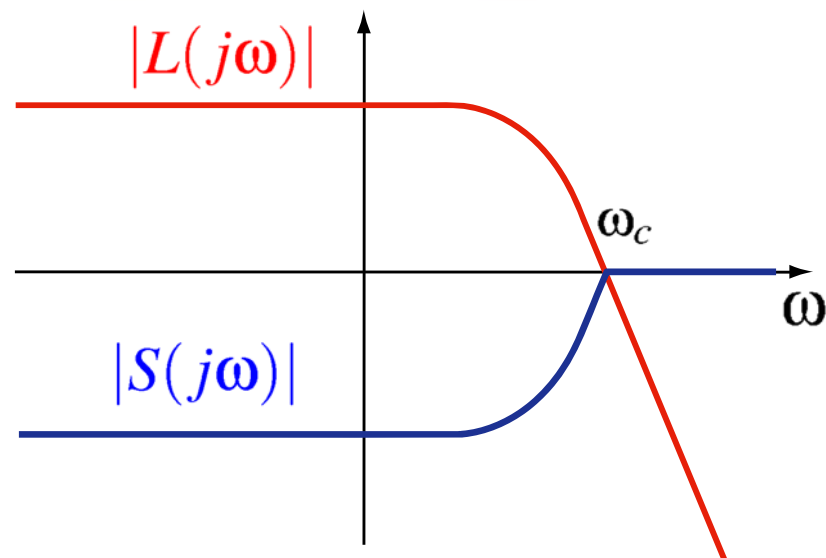
Problema:

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

- Al fine di attenuare il disturbo di misura anche $F(s)$ deve essere piccola (disaccoppiamento frequenziale tra disturbi di misura e disturbi sull'uscita)

Funzione di sensitività - analisi in frequenza

$$S(j\omega) = \frac{1}{1 + R(j\omega)G(j\omega)}$$
$$= \frac{1}{1 + L(j\omega)}$$

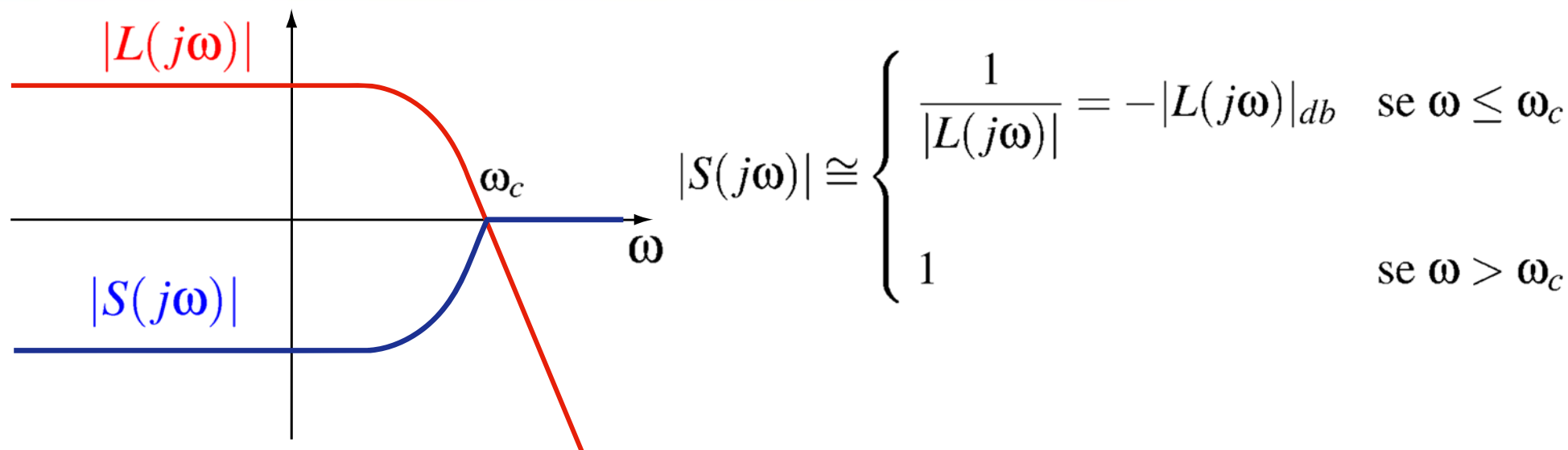


Andamento approssimato di $|S(j\omega)|$

$$|S(j\omega)| = \frac{1}{|1 + L(j\omega)|} \approx \begin{cases} \frac{1}{|L(j\omega)|} = -|L(j\omega)|_{db} & \text{se } \omega \leq \omega_c \\ 1 & \text{se } \omega > \omega_c \end{cases}$$

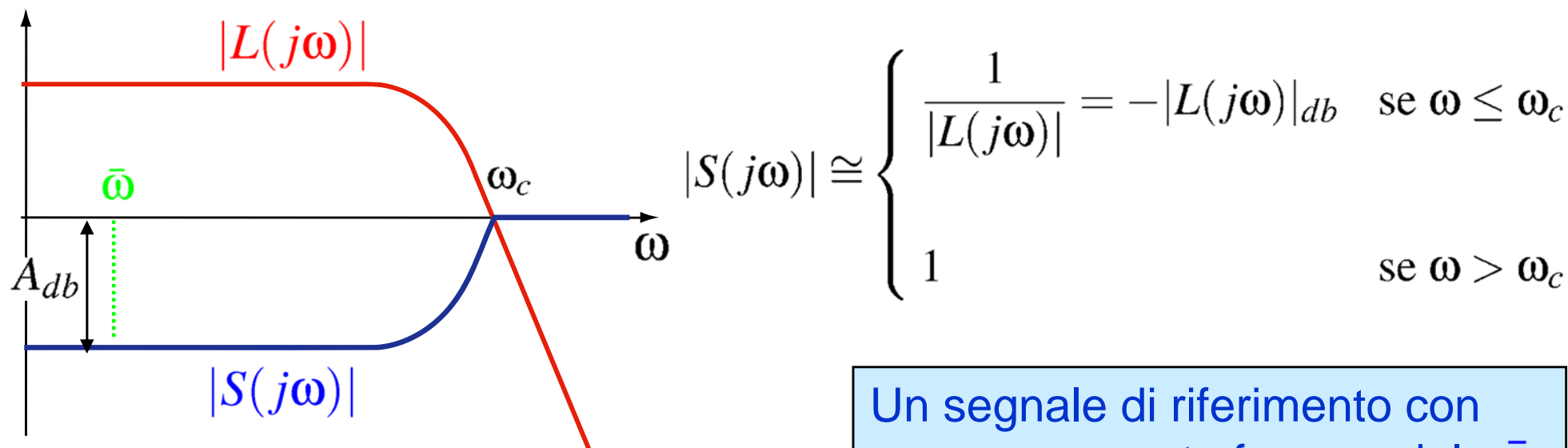
- Filtro passa alto con pulsazione di taglio ω_c

Funzione di sensitività - analisi in frequenza

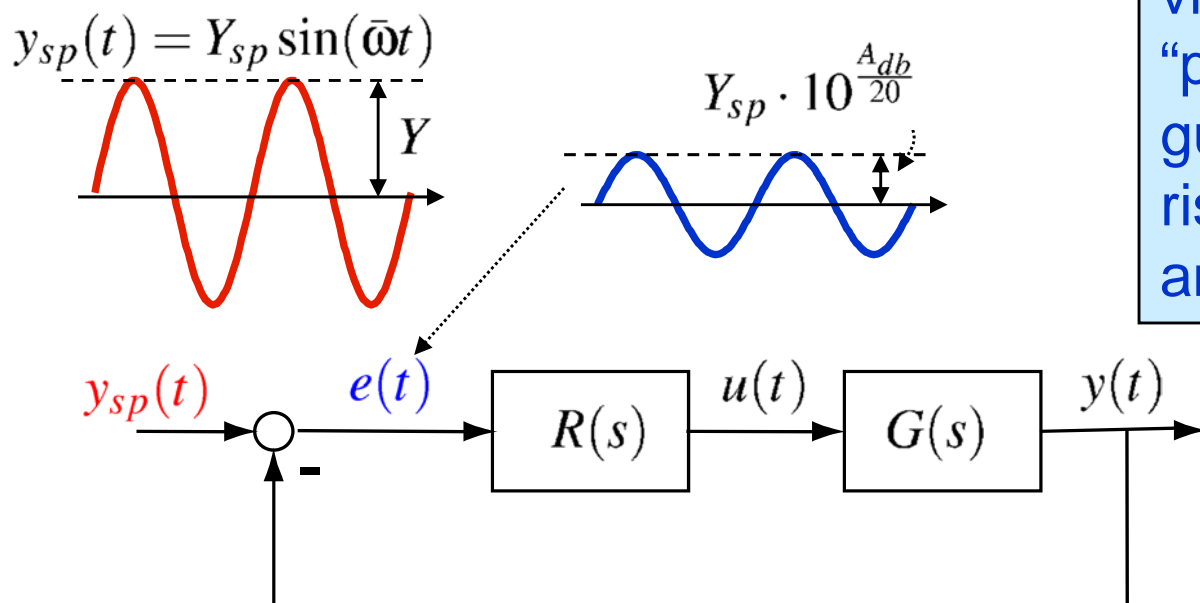


- L'andamento approssimato di $|S(j\omega)|$ mette in evidenza che
 - Le componenti del riferimento e del disturbo sull'uscita a frequenze basse (sotto la pulsazione di attraversamento ω_c di $L(j\omega)$) vengono attenuate sull'errore di una fattore pari a $1/|L(j\omega)|$ ($A_{db} = -|L(j\omega)|_{db}$)
 - Le frequenze superiori a ω_c non vengono invece alterate

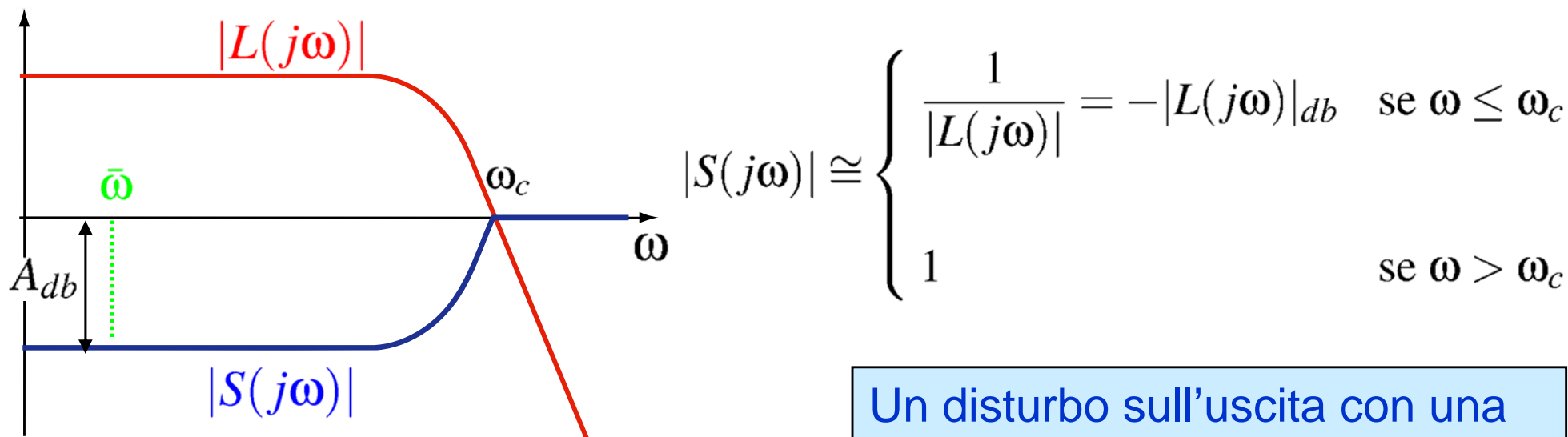
Funzione di sensitività - analisi in frequenza



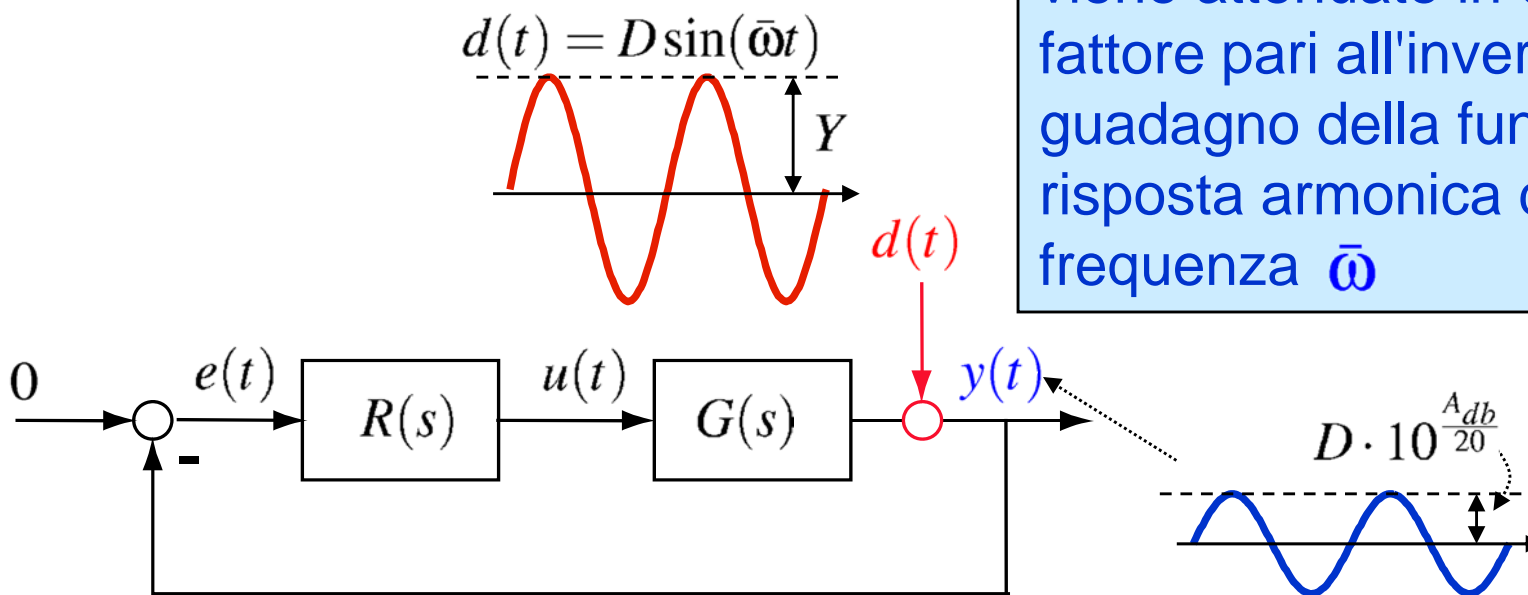
Un segnale di riferimento con una componente frequenziale $\bar{\omega}$ viene inseguito con una "precisione" pari all'inverso del guadagno della funzione di risposta armonica di anello alla frequenza $\bar{\omega}$



Funzione di sensitività - analisi in frequenza



Un disturbo sull'uscita con una componente frequenziale $\bar{\omega}$ viene attenuato in uscita di un fattore pari all'inverso del guadagno della funzione di risposta armonica di anello alla frequenza $\bar{\omega}$



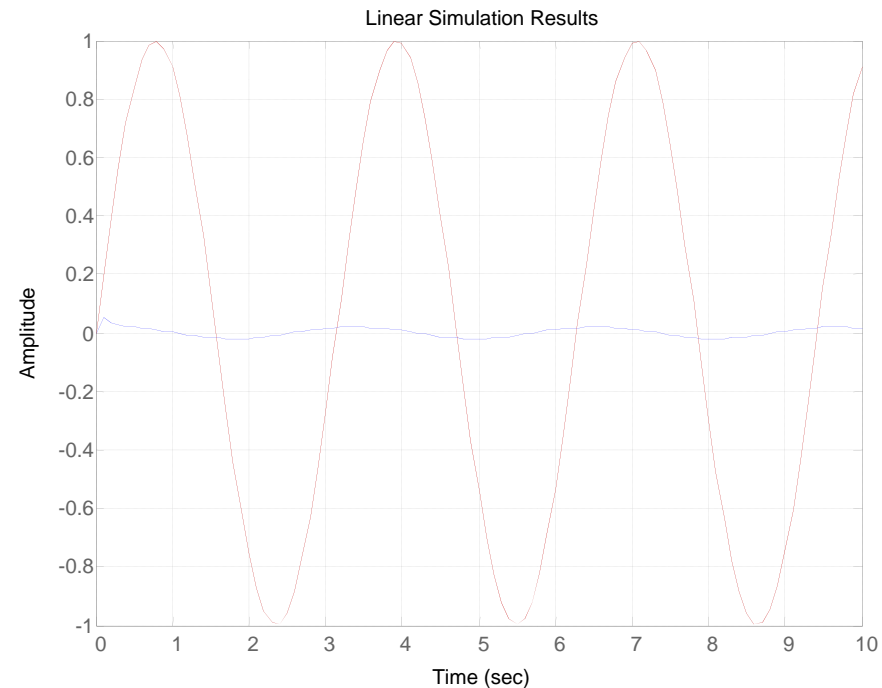
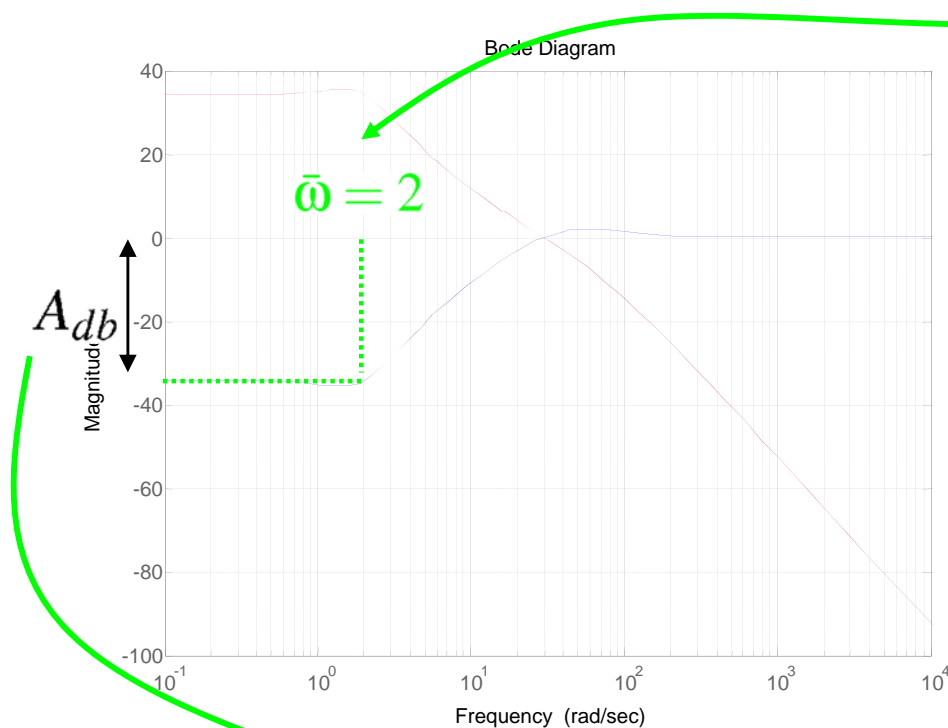
Funzione di sensitività - analisi in frequenza

- Esempio

$$R(s) = \frac{0.1578s + 1}{0.0134s + 1} \quad G(s) = \frac{200}{s^2 + 2s + 4}$$

$$L(s) = \frac{200(0.1578s + 1)}{(0.0134s + 1)(s^2 + 2s + 4)}$$

$$d(t) = \sin(2t)$$



$$|L(j\bar{\omega})| = |L(j2)| = 34.3886db = 52.4122$$

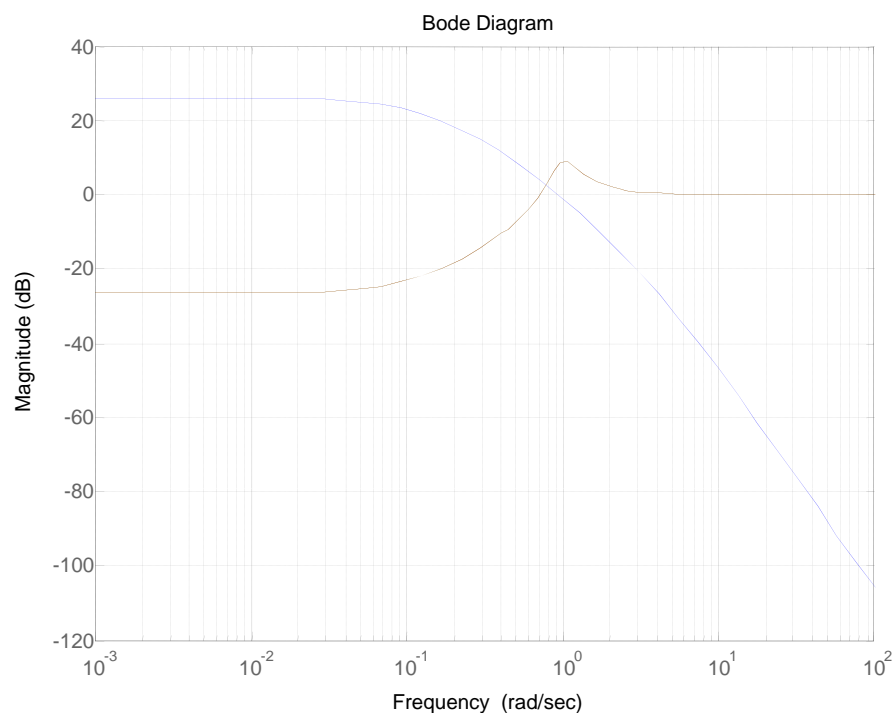
$$|S(j\bar{\omega})| = |S(j2)| = -34.4356db = 0.0190$$

$$y(t) = 0.0190 \sin(2t + \arg\{S(j\omega)\})$$

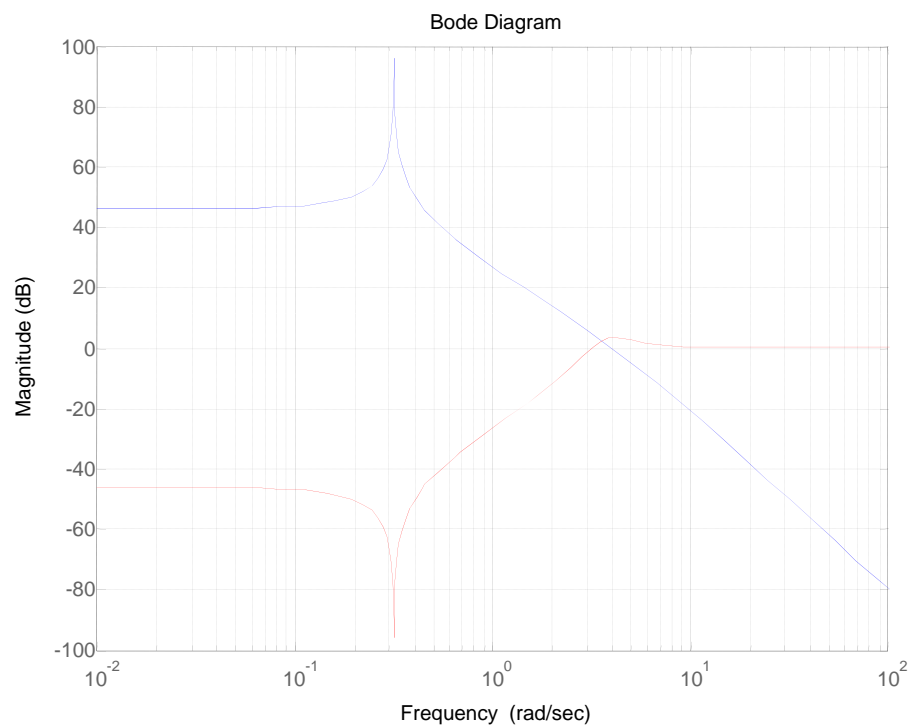
Funzione di sensitività - analisi in frequenza

- Altri esempi:

$$L(s) = \frac{20}{(1 + 10s)(1 + 2s)(1 + 0.2s)}$$

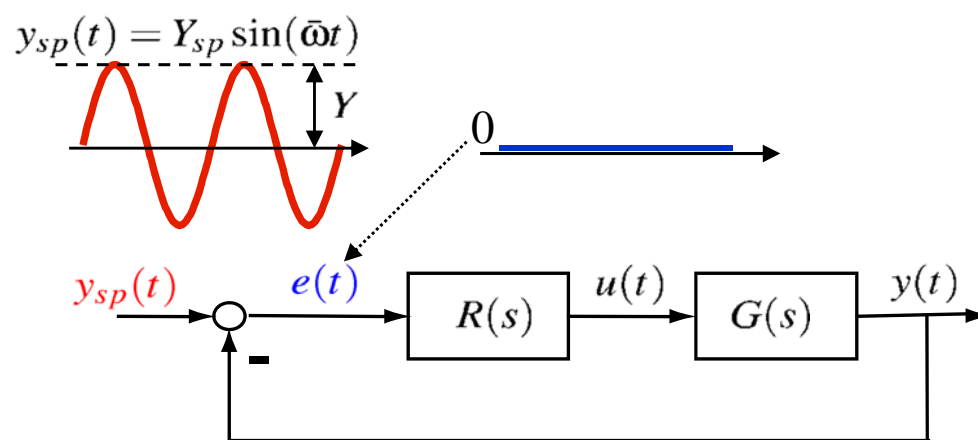
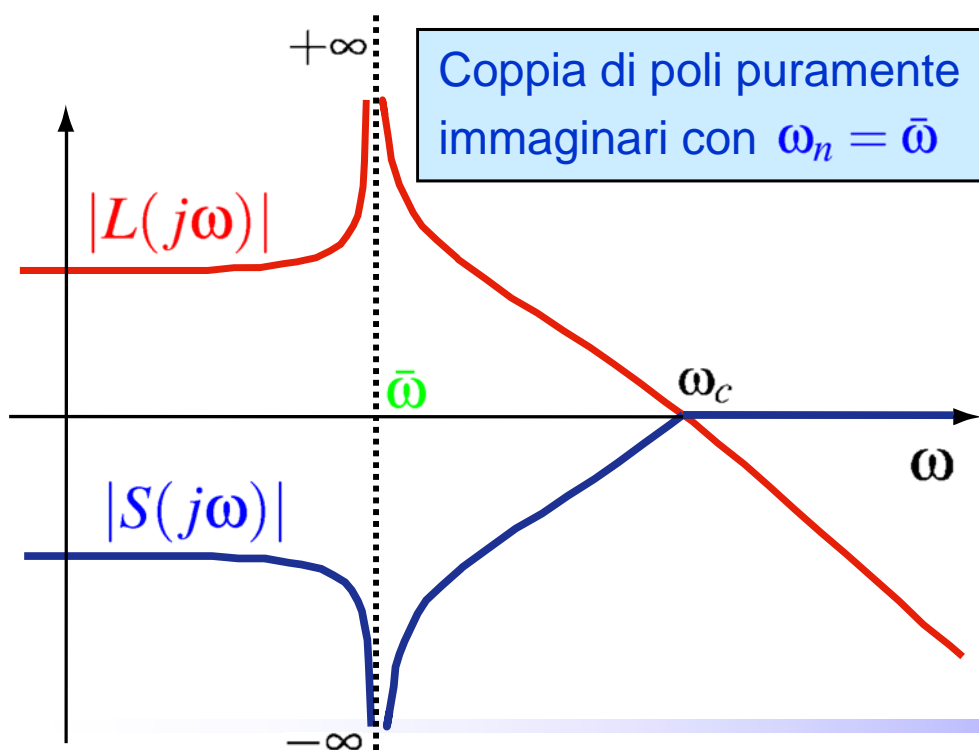


$$L(s) = \frac{20}{(s^2 + 0.001s + 0.1)(1 + 0.2s)}$$



Funzione di sensitività e modello interno

- Le specifiche statiche sul sistema in retroazione possono essere imposte agendo sul modulo della $L(j\omega)$ a certe frequenze
- Nel caso si volesse che un riferimento (disturbo sull'uscita) alla pulsazione $\bar{\omega}$ venisse esattamente inseguito (compensato) a regime occorrerebbe che $|L(j\bar{\omega})| = \infty$ (ovvero che $|S(j\bar{\omega})| = 0$ o equivalentemente $|S(j\bar{\omega})|_{db} = -\infty$). Questo si ha se $L(s)$ presenta una coppia di poli complessi coniugati a smorzamento nullo e pulsazione naturale $\bar{\omega}$



Modello interno

- **Principio del modello interno:** Affinchè un segnale di riferimento (disturbo sull'uscita) con una componente spettrale alla pulsazione $\bar{\omega}$ sia inseguito (neutralizzato) a regime perfettamente in uscita è necessario e sufficiente che
 - il sistema chiuso in retroazione sia asintoticamente stabile
 - la funzione ad anello aperto $L(s)$ abbia una coppia di poli complessi coniugati sull'asse immaginario con pulsazione naturale pari a $\bar{\omega}$
- **Caso particolare:** segnali di riferimento e disturbi sull'uscita **costanti**, cioè caratterizzati da una componente spettrale a frequenza zero.

Condizione necessaria e sufficiente affinché un riferimento (disturbo sull'uscita) costante sia inseguito (compensato) esattamente a regime in uscita è che il sistema chiuso in retroazione sia asintoticamente stabile e che la funzione ad anello abbia almeno un polo nell'origine

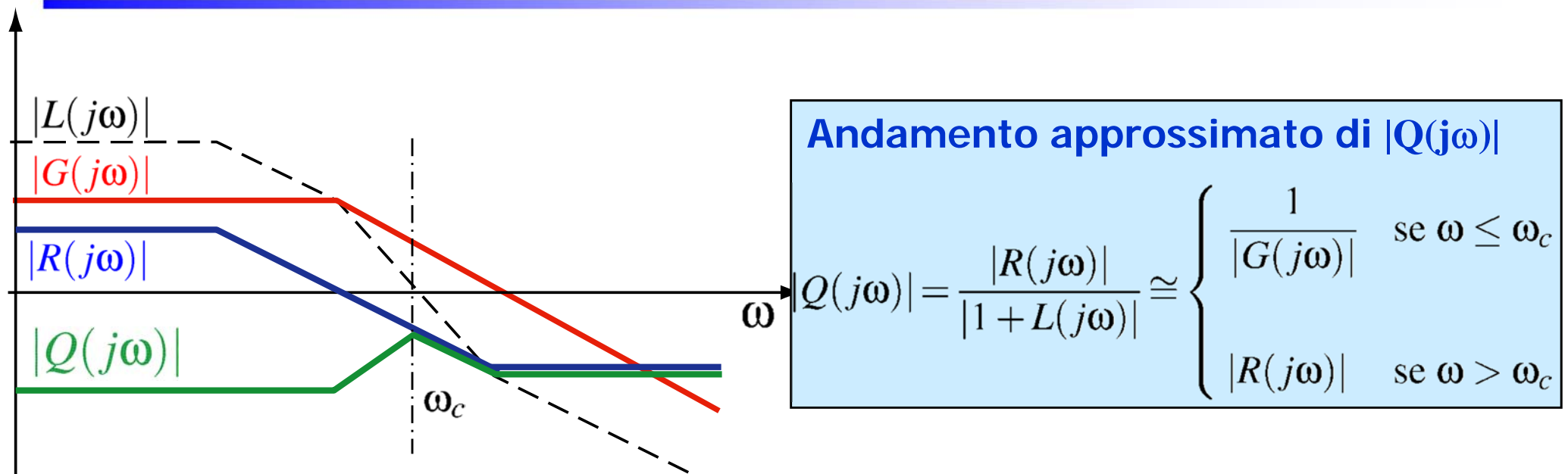
$$L(s) = \frac{\prod_i (1 + \tau_{zi} s)}{s \prod_j (1 + \tau_{pj} s)} \Rightarrow |L(j0)| = \infty \Rightarrow |S(j0)|_{db} = -\infty$$

Funzione di sensitività del controllo

$$Q(s) = \frac{R(s)}{1 + R(s)G(s)} = \frac{R(s)}{1 + L(s)} \begin{bmatrix} Y(s) \\ U(s) \\ E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(s) & S(s) & -F(s) \\ Q(s) & -Q(s) & -Q(s) \\ S(s) & -S(s) & F(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{sp}(s) \\ D(s) \\ N(s) \end{bmatrix}$$

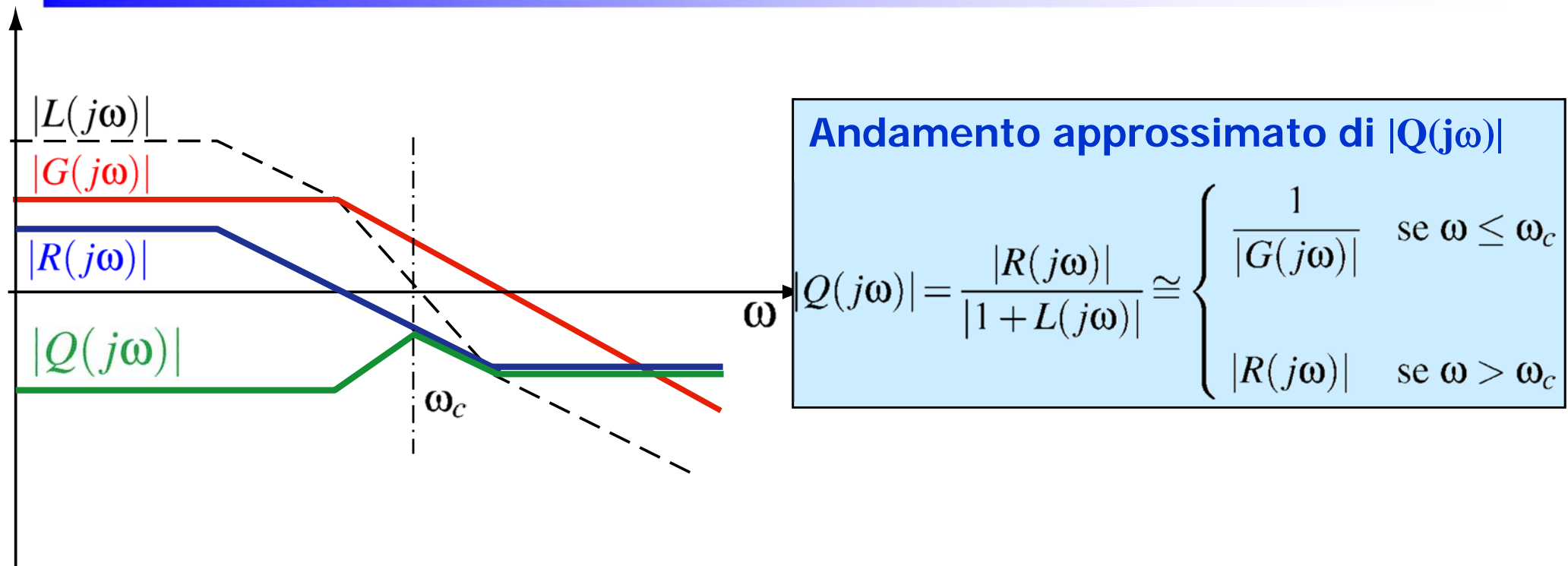
- La funzione di sensitività del controllo rappresenta la relazione dinamica tra tutti gli ingressi di interesse e la variabile di controllo $u(t)$
- Obiettivo progettuale: poichè uno dei requisiti del sistema di controllo è quello di tenere lo sforzo di controllo "piccolo" sarebbe auspicabile che $Q(s)$ fosse "piccola"
- Seguendo un approccio frequenziale, sarà auspicabile avere $Q(j\omega)$ piccola sia a frequenze basse (al fine di avere moderazione a fronte di riferimenti e disturbi sull'uscita) che a frequenze elevate (al fine di avere moderazione del controllo a fronte di disturbi di misura)

Funzione di sensitività del controllo - analisi in frequenza



- Le componenti a frequenze basse, minori della pulsazione di attraversamento ω_c di $|L(j\omega)|$ (frequenza alla quale $|R(j\omega)|$ interseca $1/|G(j\omega)|$), sono filtrate dall'inversa di $|G(j\omega)|$. Di conseguenza **il fattore di attenuazione a frequenze basse non è condizionabile attraverso il progetto del controllo.**
- Le componenti a frequenze elevate (maggiori della pulsazione di attraversamento ω_c di $|L(j\omega)|$) sono filtrate da $|R(j\omega)|$. Perciò **il fattore di attenuazione a frequenze elevate è condizionabile attraverso il progetto del regolatore.**

Funzione di sensitività del controllo - analisi in frequenza



Una buona regola da seguire, al fine di moderare lo sforzo di controllo, è evitare l'uso di regolatori che “amplificano” a frequenze elevate, ovvero evitare di imporre frequenze di attraversamento ω_c di $|L(j\omega)|$ molto più alte rispetto a quella del sistema $|G(j\omega)|$

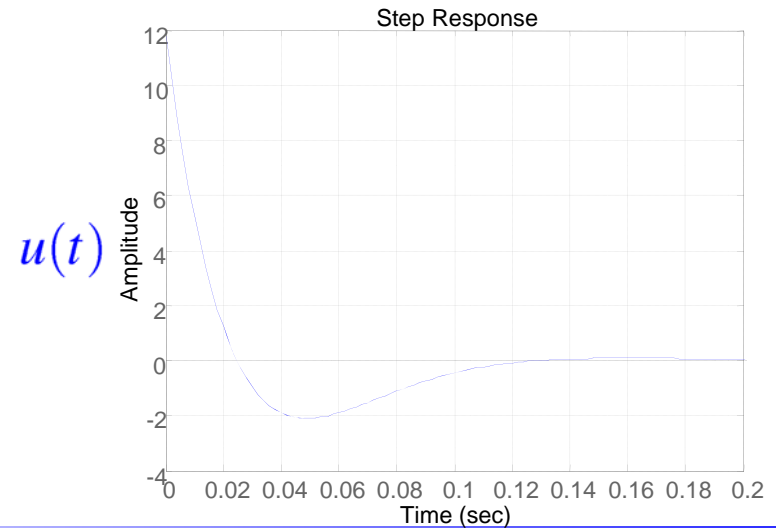
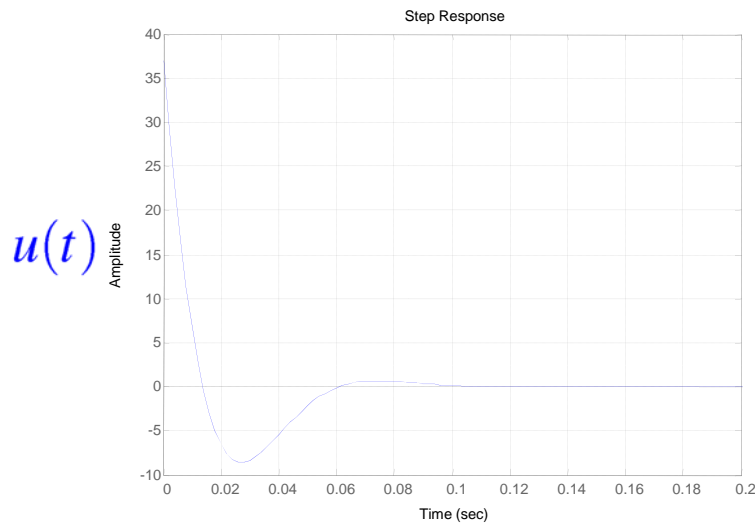
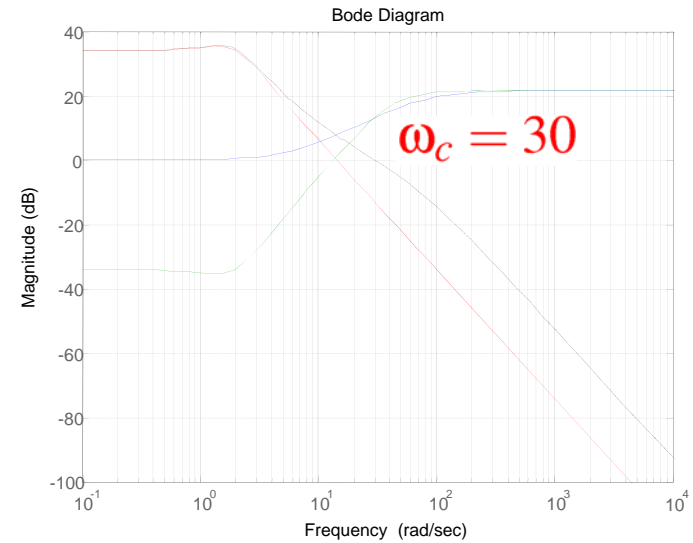
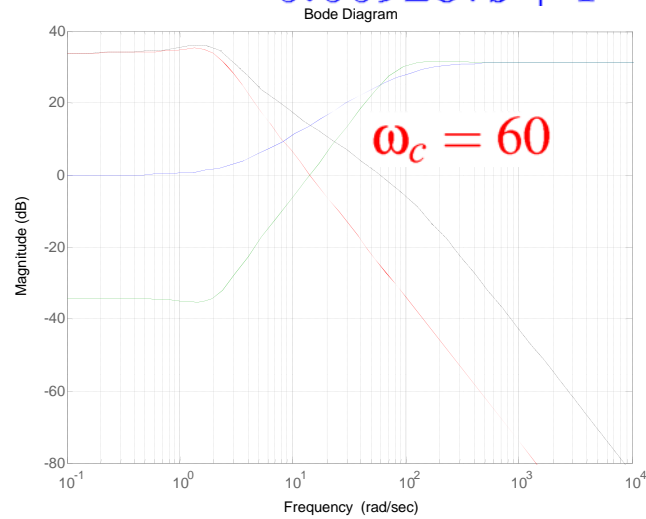
Funzione di sensitività del controllo - analisi in frequenza

- Esempio

$$G(s) = \frac{200}{s^2 + 2s + 4}$$

$$R(s) = \frac{0.3428s + 1}{0.009287s + 1}$$

$$R(s) = \frac{0.1578s + 1}{0.0134s + 1}$$



CONTROLLI AUTOMATICI

Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/ControlliAutomatici.html>

ANALISI DEI SISTEMI IN RETROAZIONE E FUNZIONI DI SENSITIVITA' FINE

Ing. Luigi Biagiotti

e-mail: luigi.biagiotti@unimore.it

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti>