POJAČAVAČI SA NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM

Projektovanje pojačavača

Postoje tri osnovna kriterijuma performansi elektronskih kola:

Snaga šuma (N)
Snaga signala (S)
Frekventni opseg (B_w)

$$C = B_w \log_2\left(\frac{S+N}{N}\right) = B_w \log_2(DR)$$

dinam. opseg

Međusobna veza je data Shannon-ovom formulom, gde je C kapacitet kola u pogledu obrade signala.
To je mera za količinu informacija koju kolo može da obradi u jednoj sekundi.
Kapacitet linearno raste sa frekventnim opsegom i logaritmom odnosa signal - šum. Kola sa širokim frekventnim opsegom, za obradu signala sa malim dinamičkim opsegom, imaju veliki kapacitet C (npr. digitalna kola i signali).
Ako je frekventni opseg ograničen, povećanje kapaciteta kola se može postići povećanjem odnosa signal - šum → analogna kola visokih performansi.
Vrednosti praktičnih specifikacija, kao što su napon napajanja, struja napajanja, potrošnja, površina čipa, mogu da se posmatraju kao parametri tri osnovna kriterijuma.

Pretpostavke kojima se postiže efikasnost strategije projektovanja:
-Ortogonalnost rešenja u odnosu na tri osnovna kriterijuma performansi
-Primena jednostavnih modela za brzu proveru mogućnosti da pretpostavljeno rešenje zadovoljava kriterijume.
-Uređenje hijerarhije projekta tj. njegova podela na potprojekte na nižim hijerarhijskim nivoima.

Pre projektovanja neophodno je da bude tačno definisana funkcija koju treba realizovati. Kada su u pitanju pojačavači, njihova funkcija je da povećaju snagu korisnog signala množeći ga tačnim konstantnim faktorom. Elementi koji imaju zadovoljavajuće tačne i konstantne faktore su pasivne komponente, koje ne mogu da povećaju snagu korisnog signala. Aktivne komponente mogu da pojačaju signal ali nemaju zadovoljavajuću tačnost. Kombinacija potrebnih karakteristika pasivnih i aktivnih komponenata može se postići jedino primenom negativne povratne sprege.

U projektovanju pojačavača sa negativnom povratnom spregom vrši se podela na dva osnovna ortogonalna koraka:
-Projektovanje kola povratne sprege, pri čemu se aktivan deo predstavlja idealnim pojačavačem (tzv. nulorom)
- Projektovanje aktivnog kola tako da mu se karakteristike koliko je potrebno približe karakteristikama idealnog pojačavača.

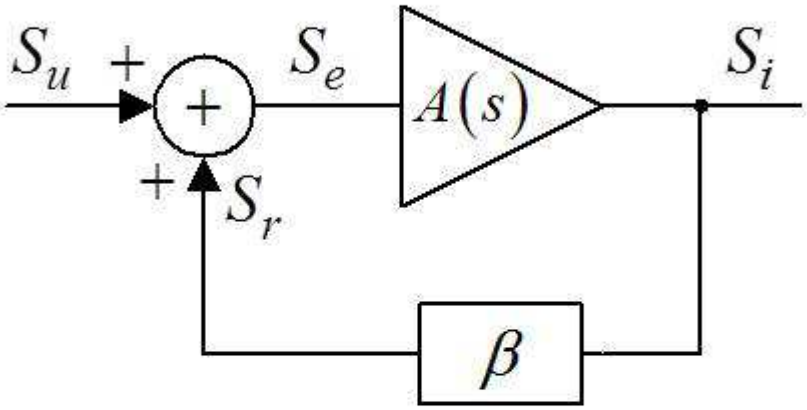
U okviru prvog koraka vrši se:
- detaljno specificiranje izvora signala, prenosa signala i potrošača
- određivanje topologije pojačavača i proračun kola povratne sprege

U okviru drugog koraka vrši se proračun:
- šuma
- izobličenja
- frekventnog opsega
- polarizacije

Pridržavanje gornjeg redosleda pretežno omogućava pravolinijsko projektovanje bez višestrukih iteracija.

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Black-ov model:



$$S_i = A(s)\cdot S_e = A(s)\cdot(S_u + S_r)$$

$$S_i = A(s)\cdot(S_u + \beta\cdot S_i)$$

$$A_r(s) = \frac{S_i}{S_u} = \frac{A(s)}{1-\beta A(s)}$$

funkcija povratne sprege $\rightarrow$ $F(s) = 1-\beta A(s)$

- analiza samo PS kod koje $\beta A(0)$ obrće fazu

uz ograničenje na $\beta A(j\omega) = |\beta A(j\omega)|\angle\pi + \Phi$

$\beta A_{rel}(j\omega) = -\beta A(j\omega) = |\beta A(j\omega)|\angle\Phi$ $\leftarrow$ relativno kružno pojačanje

$$A_r(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1+\beta A_{rel}(j\omega)} \rightarrow \text{kritična vrednost: } \beta A_{rel}(j\omega) = -1$$

$$A_r(j\omega) = \frac{V_i}{V_u} \quad V_u \neq 0, \qquad \text{za} \qquad F(j\omega_x) = 0 \quad V_i \rightarrow \infty$$

$$\Downarrow$$

pojačavač je nestabilan

u realnim pojačavačima je izlaz ograničen napajanjem (ne može da bude beskonačan)

- BIBO stabilnost (bounded input – bounded output)

- ispitivanje stabilnosti
  1° algebarski testovi – Rut-Hurvicov test; ispitivanjem karakteristične jednačine sistema daje odgovor da li je sistem stabilan ili ne; može se odrediti broj polova u desnoj poluravni

$$A_r(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{P(s)}{(1 - s/p_1)(1 - s/p_2)\ldots(1 - s/p_n)}$$

u vremenskom domenu $\downarrow$

$$\sum K_i e^{\sigma_i t} \cdot \sin(\omega_i t) \quad \text{za} \quad p_i = \sigma_i + j\omega_i$$

$\downarrow$

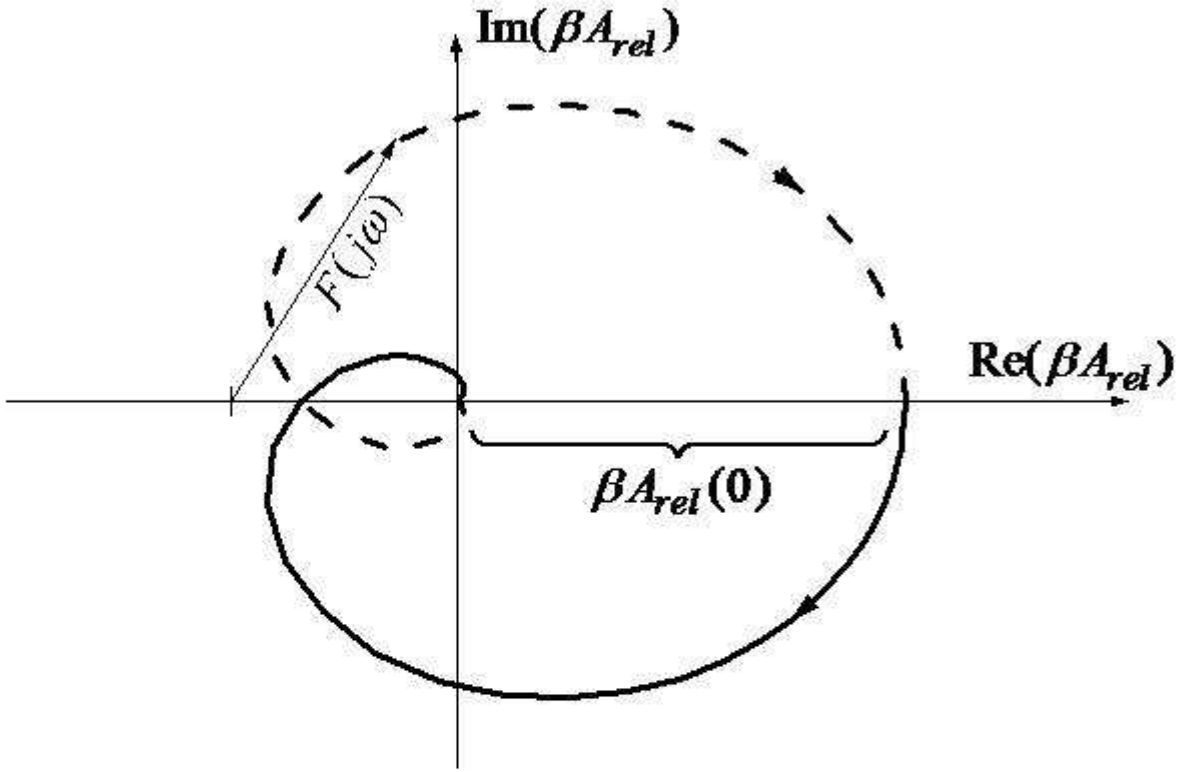
za $\sigma_i < 0$ prigušene oscilacije

za $\sigma_i > 0$ neprigušene - nestab.

2° grafički testovi

2.1° geometrijsko mesto korenova – analizira se uticaj nekog parametra pojačavača na položaj polova i nula $A_r(j\omega)$

2.2° Nikvistov kriterijum – crta se $\beta A_{rel}(j\omega)$ u polarnim koordinatama



Polovi βA_{rel} su u levoj poluravni

ω: $0 \rightarrow \infty$ kreće iz IV kvadranta jer je $\Phi_r < 0$, a $|\beta A_{rel}|$ opada

za $\omega \rightarrow \infty$ $|\beta A_{rel}| \rightarrow 0$, a na osnovu fazne karakteristike se određuje ugao ulaska krive u (0,0)

$\beta A_{rel}(-j\omega) = \beta A_{rel}^{*}(j\omega)$ $\rightarrow$ simetričan grafik za $-\infty < \omega < 0$

Vektor $F(j\omega) = 1+\beta A_{rel}(j\omega)$ ima početak u (-1, j0), a kraj na krivoj $\beta A_{rel}(j\omega)$

Nikvistov kriterijum:

Kada se menja $-\infty < \omega < \infty$, broj rotacija vektora F oko tačke (-1, j0) u smeru kazaljke na satu daje razliku između broja polova i nula funkcije $A_r(s)$ u desnoj poluravni (uslov je da su polovi βA_{rel} u levoj poluravni)

Ili: Pojačavač sa povratnom spregom je stabilan ako tačka (-1, j0) nije obuhvaćena Nikvistovim dijagramom.

3° Bodeove aproksimacije za $\beta A_{rel}(j\omega)$

Kritična tačka $\beta A_{rel}(j\omega_x) = -1 \Rightarrow |\beta A_{rel}(j\omega_x)| = 1$ i $\Phi_{rel}(j\omega_x) = -\pi$

Pojačavač (da bi bio stabilan) ne sme da ima oba uslova zadovoljena.

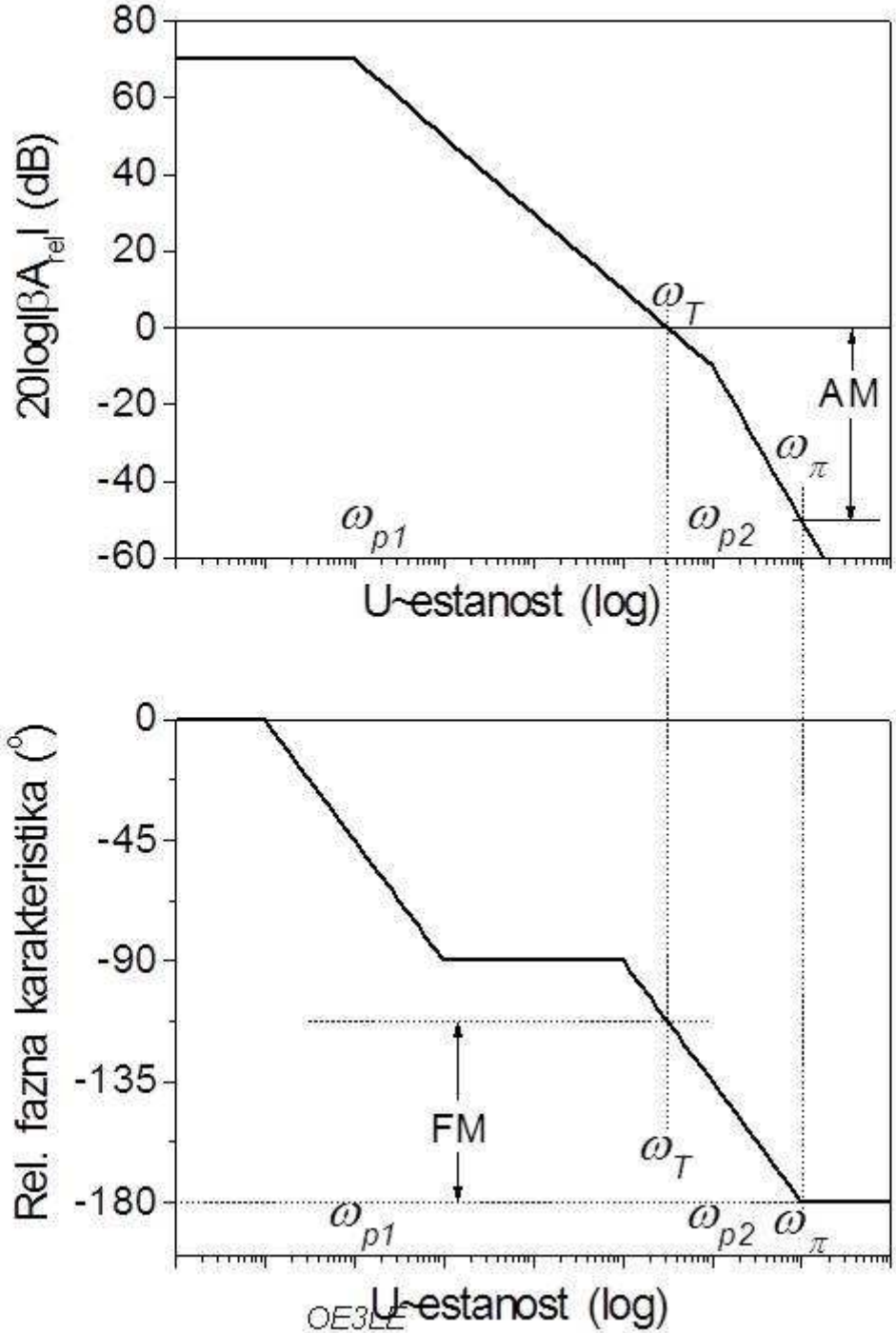
a) $|\beta A_{rel}(j\omega_T)| = 1 \Rightarrow \mathrm{FM} = \Phi_{rel}(j\omega_T) + 180°$

ω_T - jedinična učestanost kružnog pojačanja; FM – fazna margina

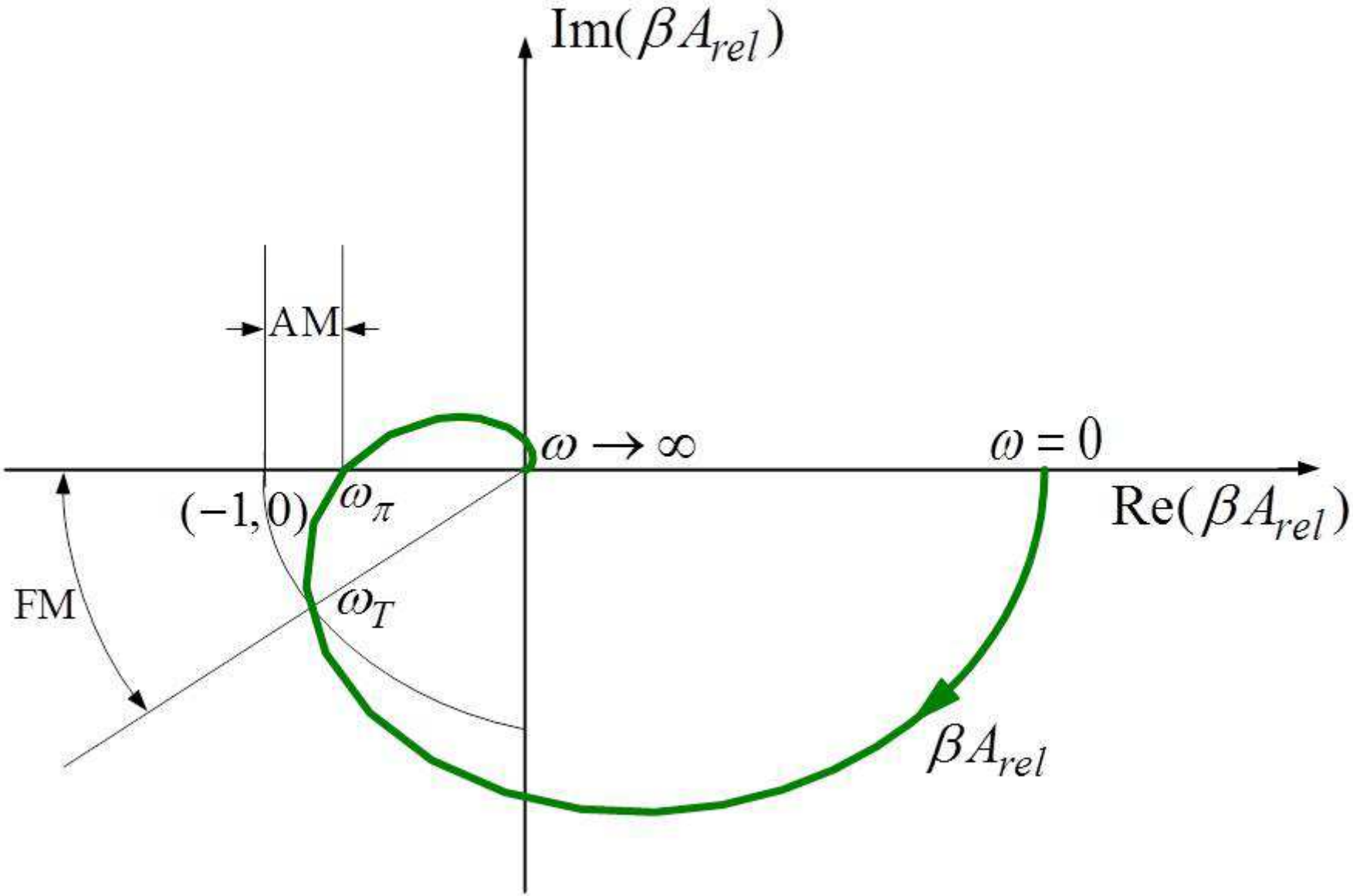
b) $\Phi_{rel}(j\omega_\pi) = -180° \Rightarrow \mathrm{AM} = -20\log|\beta A_{rel}(j\omega_\pi)|$

AM – amplitudska margina

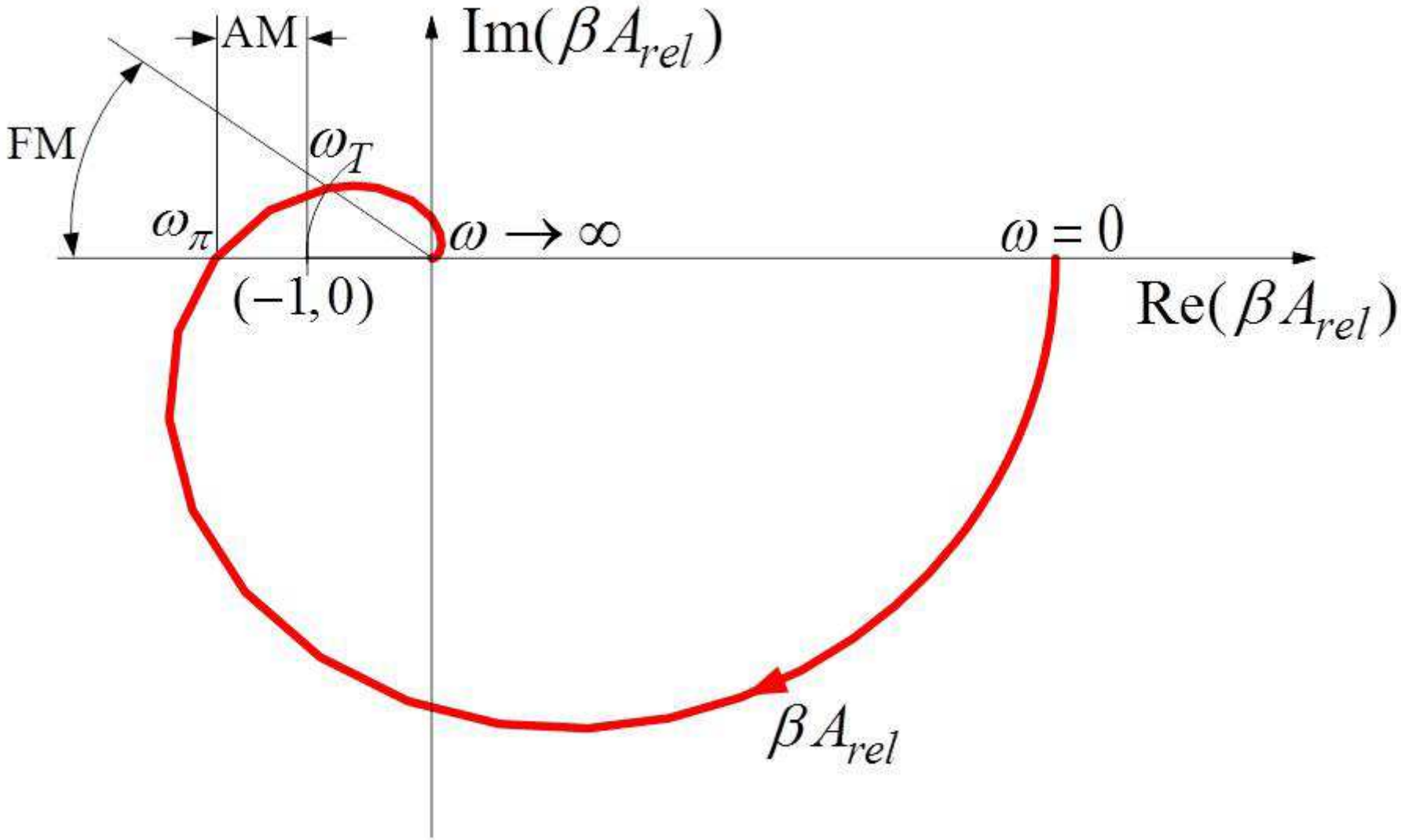
Sistem je stabilan ako je FM > 0 i AM > 0.


80
60
40
20
0
-20
-40
-60
20log|βA_rel| (dB)
ω_T
AM
ω_π
ω_p1
ω_p2
U~estanost (log)
0
-45
-90
-135
-180
Rel. fazna karakteristika (°)
FM
ω_T
ω_p1
ω_p2
ω_π
U~estanost (log)

FM i AM se mogu odrediti sa Nikvistovog dijagrama

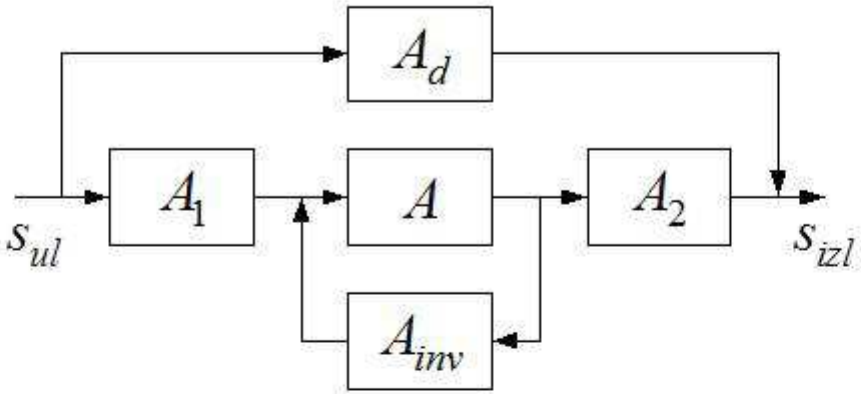


Stabilno kolo



Nestabilno kolo

Složeniji model:



Rešavanjem se dobija:

$$\boxed{A_r = \frac{s_{izl}}{s_{ul}} = \frac{A_1 \cdot A \cdot A_2}{1+T} + A_d}$$

gde je $T = -A \cdot A_{inv}$ **("return ratio" – povratni odnos)**

Uvođenjem $A_\infty = A_r\Big|_{T=\infty} = \frac{A_1 \cdot A \cdot A_2}{T} + A_d = \frac{A_1 \cdot A_2}{A_{inv}} + A_d$

ovo može da se napiše u obliku:

$$\boxed{A_r = A_\infty \frac{T}{1+T} + \frac{A_d}{1+T}}$$

drugi oblik:

$$\boxed{A_r = A_\infty \frac{1+1/T_n}{1+1/T} = A_d \frac{1+T_n}{1+T}}$$

T_n - **"null return ratio"**

$$\boxed{\frac{T_n}{T} = \frac{A_\infty}{A_d}}$$

Uticaj FM na karakteristike pojačavača sa povratnom spregom

(kada za pojačavač važi Black-ov model)

FM=45° $\Rightarrow$ $\beta A_{rel}(j\omega_T) = 1\angle -135°$

$$A_r(j\omega_T) = \frac{A(j\omega_T)}{1+e^{-j135°}} = \frac{A(j\omega_T)}{1-0,7-0,7j}$$

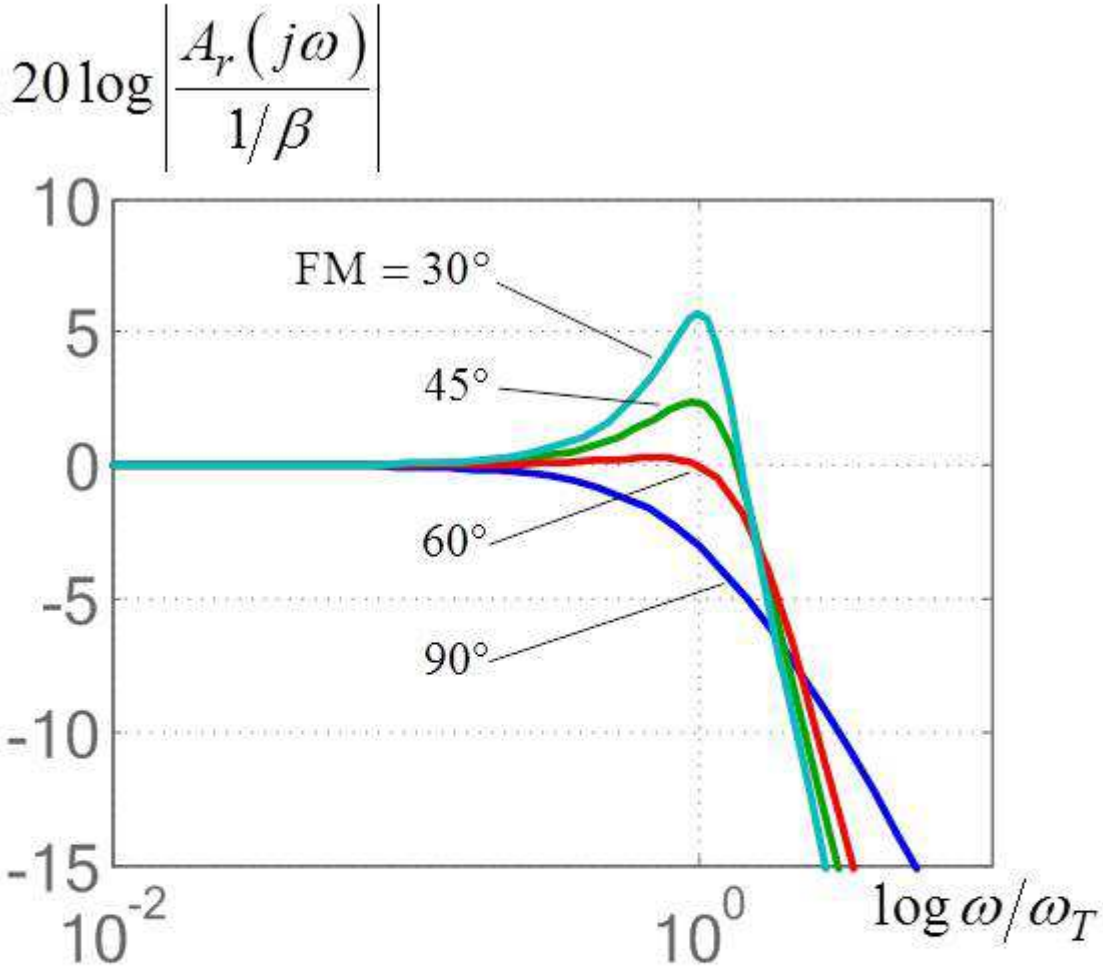
$$\left|A_r(j\omega_T)\right| = \frac{\left|A(j\omega_T)\right|}{0,76} = 1,3\cdot\frac{1}{|\beta|}$$

$\downarrow$

+2,4 dB iznad pojačanja na niskim učestanostima

FM=60° $\left|A_r(j\omega_T)\right| = \frac{1}{|\beta|}$

FM=90° $\left|A_r(j\omega_T)\right| = 0,7\cdot\frac{1}{|\beta|}$ $\rightarrow$ -3 dB $\leftarrow$



FM=0° $\Rightarrow A_r(j\omega_T) \to \infty$

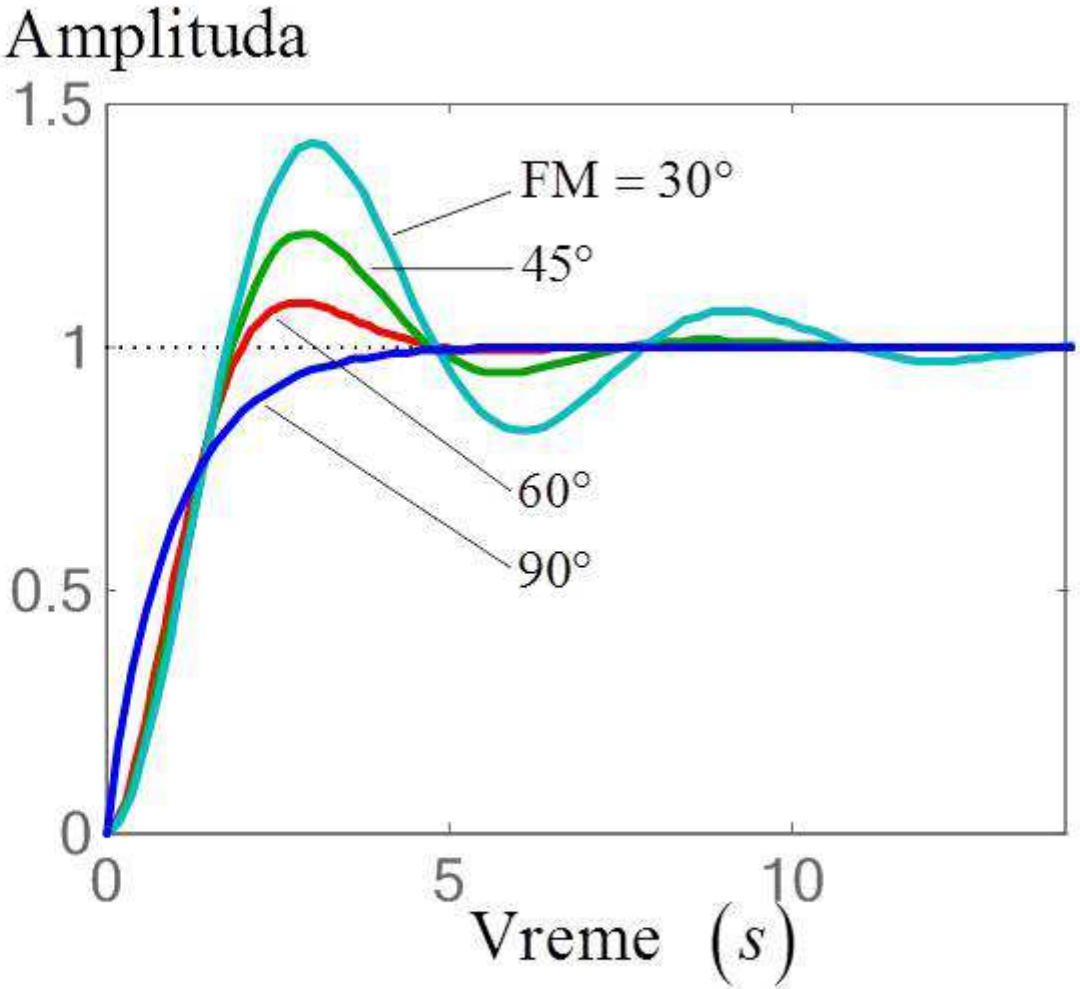
Za FM = 90° izražen je uticaj prvog pola (tada je drugi $\gg \omega_T$), a za manje FM veći je uticaj drugog pola (tada je doprinos prvog fiksan, ~90°)

Minimalna FM pri projektovanju je 45°, a vrlo često je 60°

na visokim $(\omega \gg \omega_T)$ učestanostima je $|\beta A(j\omega)| \ll 1$, pa je

$$A_r(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 - \underbrace{\cancel{\beta A(j\omega)}}_{\ll 1}} \approx A(j\omega)$$

U vremenskom domenu:



Za male vrednosti FM se javljaju velika premašenja i oscilacije su slabo prigušene, tj. kolo je blizu granice oscilovanja.

Uticaj povratne sprege na polove pojačavača

- jednopolna funkcija (pretpostavlja se da je β = const, tj. $\beta \neq f(s)$)

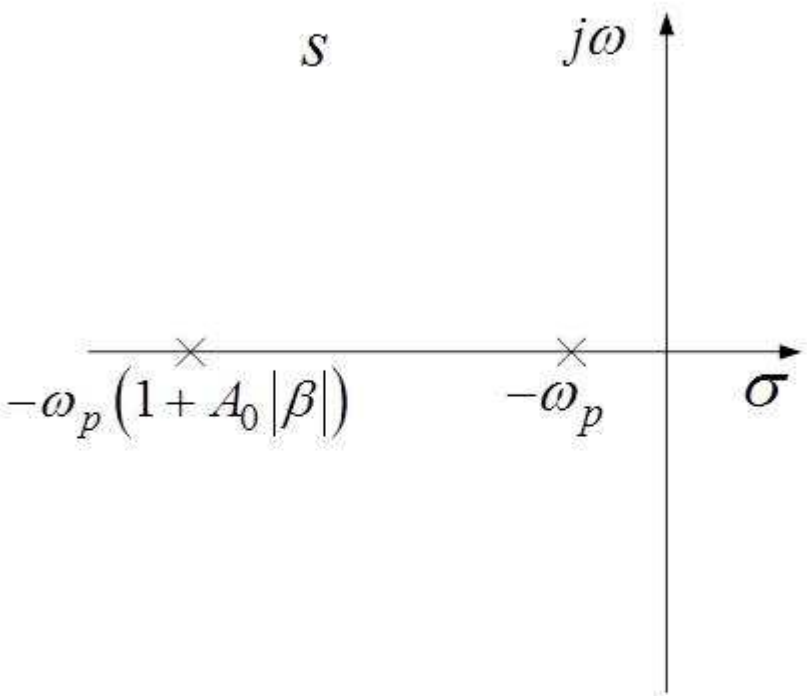
$$A(s) = \frac{A_0}{1 - \frac{s}{p_1}} = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \qquad \omega_g = \omega_p$$

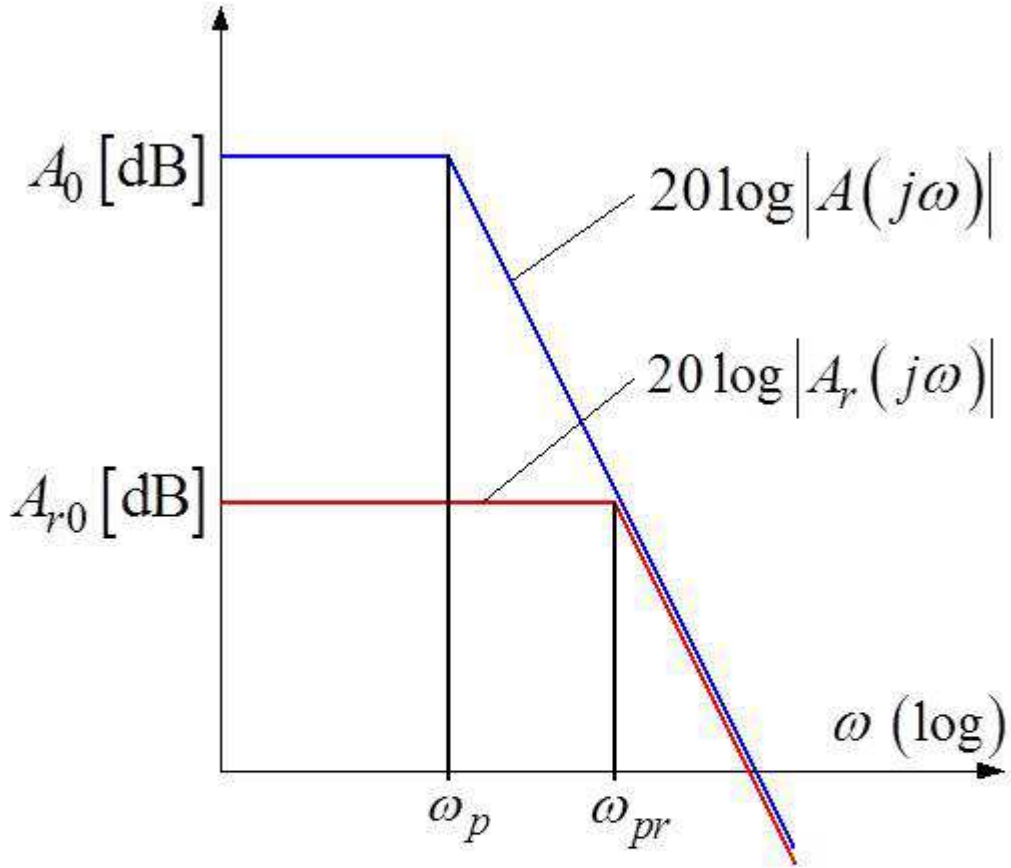
$$\Downarrow$$

$$A_r(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_p} + A_0|\beta|} = \frac{A_0}{1 + A_0|\beta|} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_p(1 + A_0|\beta|)}}$$

$$\Downarrow$$

$$A_r(0) = \frac{A_0}{1 + A_0|\beta|}; \qquad \omega_{gr} = \omega_g \cdot (1 + A_0|\beta|) \qquad \omega_{pr} = \omega_{gr}$$





Proizvod pojačanja i propusnog opsega

$$A \cdot B = A_0 \cdot \omega_p = \frac{A_0}{1 + A_0 |\beta|} \cdot \omega_p \left(1 + A_0 |\beta|\right) = \text{const}$$

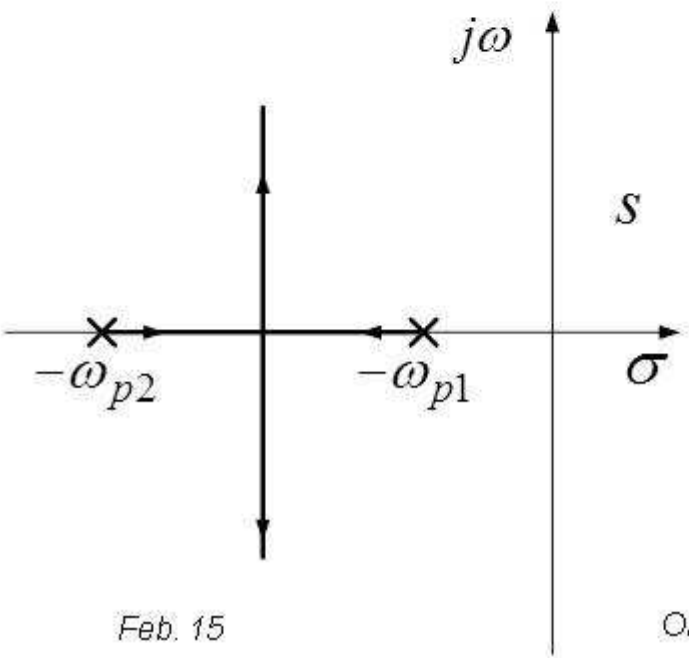
Pojačavač sa dvopolnom funkcijom pojačanja

$$A(s) = \frac{A_0}{\left(1 + s/\omega_{p1}\right)\left(1 + s/\omega_{p2}\right)}$$

Polovi $A_r(s)$ su rešenja $1 + A(s)|\beta| = 0$

$$s^2 + s\left(\omega_{p1} + \omega_{p2}\right) + \left(1 + A_0|\beta|\right) \cdot \omega_{p1} \cdot \omega_{p2} = 0$$

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2}\left(\omega_{p1} + \omega_{p2}\right) \pm \frac{1}{2}\sqrt{\left(\omega_{p1} + \omega_{p2}\right)^2 - 4\left(1 + A_0|\beta|\right) \cdot \omega_{p1} \cdot \omega_{p2}}$$



Geometrijsko mesto polova

$A_0|\beta| = 0 \rightarrow s_1 = -\omega_{p1} \quad s_2 = -\omega_{p2}$

$A_0|\beta| \nearrow \rightarrow$ polovi su realni i

približavaju se do tačke $-\frac{1}{2}\left(\omega_{p1} + \omega_{p2}\right)$

$A_0|\beta| \nearrow\nearrow \rightarrow$ polovi su konjugovano kompleksni

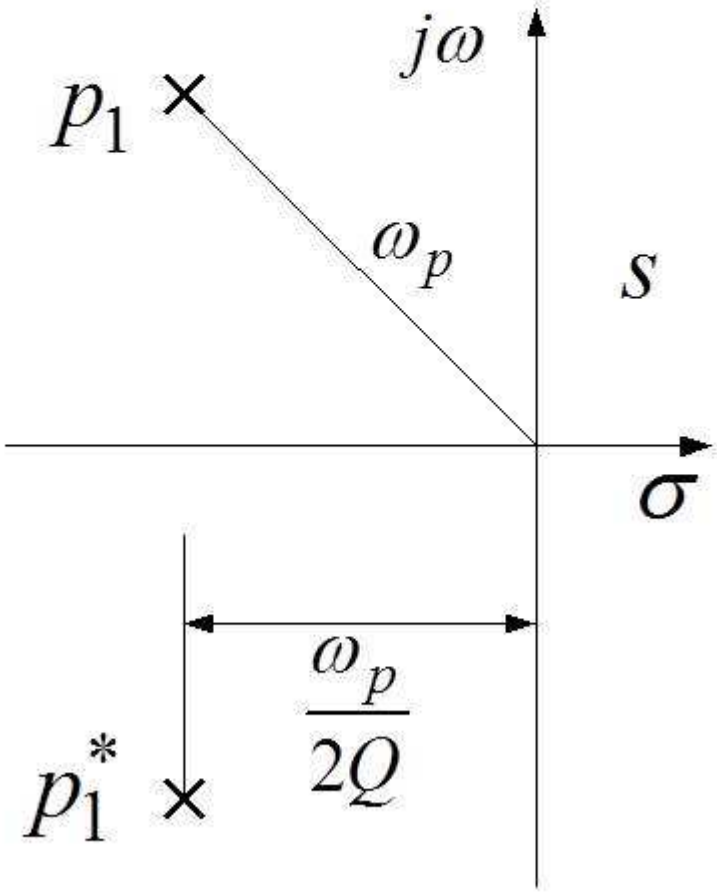
- Može se zaključiti da su polovi $A_r(s)$ uvek u levoj poluravni, tj. kolo je uvek stabilno.

- za male vrednosti $A_0|\beta|$ $A_r(s)$ može da ima dominantan pol koji određuje ω_g

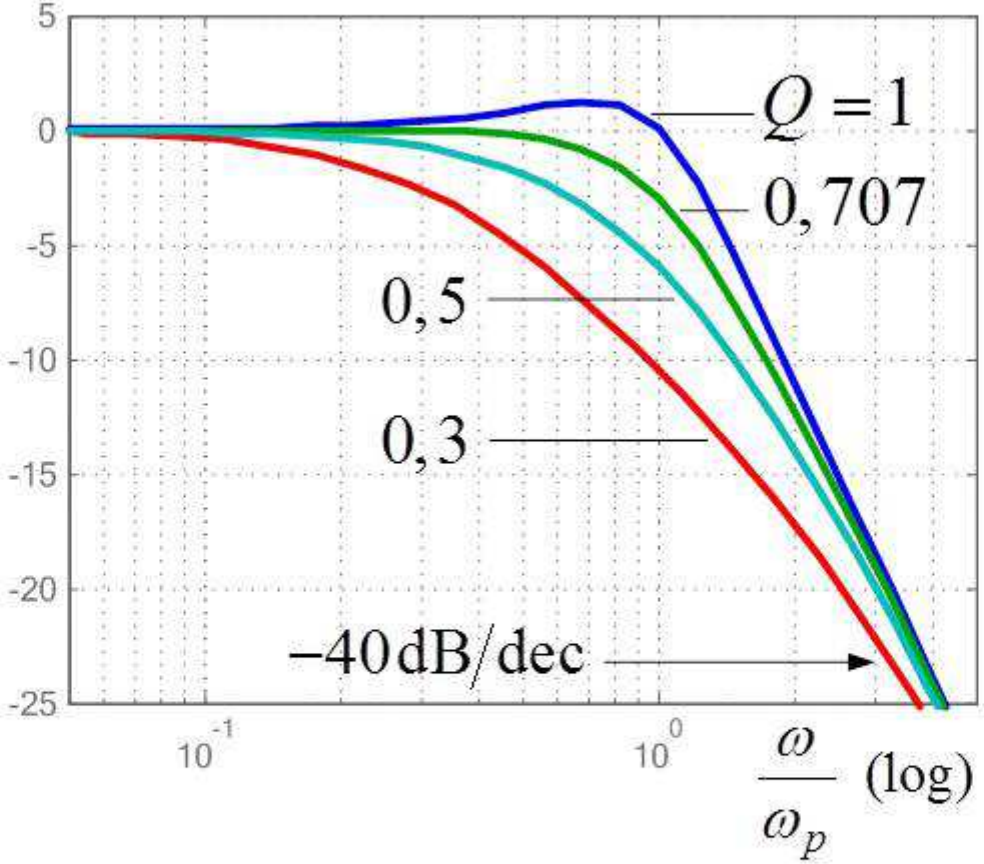
$$s^2 + s\frac{\omega_p}{Q} + \omega_p^2 = 0$$

ω_p – učestanost polova
Q – faktor dobrote polova

polovi su konjugovano kompleksni za $Q > 0,5$



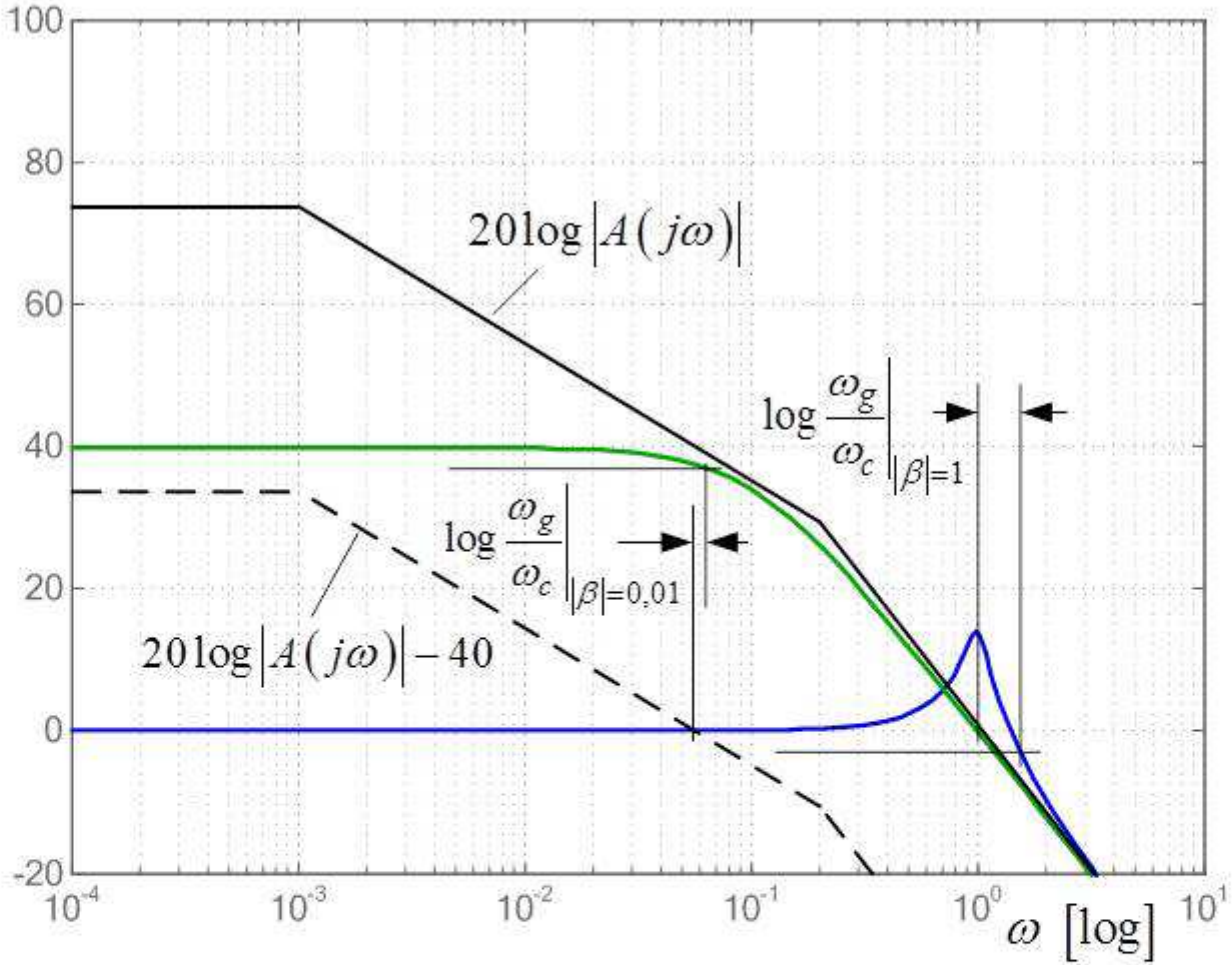
$$20\log\left|\frac{A_r(j\omega)}{A_r(0)}\right| \quad [\text{dB}]$$



Q=0,3 → realni polovi, karakteristika ima segment sa nagibom –20 dB/dec

Q=0,5 → dvostruki realan pol

Q=0,707 → maksimalno ravna amplitudska karakteristika



$$A_r(j\omega)=\frac{A(j\omega)}{1+A(j\omega)|\beta|}$$

$$\begin{matrix}\omega\to 0\\ A_0\gg 1\end{matrix}\ :\ A_r(0)=\frac{A_0}{1+A_0|\beta|}\approx\frac{1}{|\beta|}$$

$\omega_c\equiv\omega_T$

$$\omega\to\infty\ :\ A(j\omega)\to 0\quad A_r(j\omega)=\frac{A(j\omega)}{1-\underbrace{\cancel{\beta A(j\omega)}}_{\ll 1}}\approx A(j\omega)$$

! ω_g za $A_r(j\omega)$ mora da se računa

$$\left|A_r\left(j\omega_T\right)\right| = \frac{1}{|\beta|}\cdot\frac{\left|\beta A\left(j\omega_T\right)\right|}{\left|1+\beta A\left(j\omega_T\right)\right|} = \frac{1}{|\beta|}\cdot\frac{1}{\left|1+1\cdot e^{j\Phi_{rel}(j\omega_T)}\right|}$$

$$\underbrace{\Phi_{rel}\left(j\omega_T\right) = -90^\circ}$$

$$\Downarrow$$

$$\left|A_r\left(j\omega_T\right)\right| = \frac{1}{|\beta|}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \omega_g = \omega_T$$

$$\underbrace{\left|\Phi_{rel}\left(j\omega_T\right)\right| > 90^\circ}$$

$$\Downarrow$$

$$\omega_g > \omega_T$$

$$\left(\left|F\left(j\omega_T\right)\right| = \left|1+1\cdot e^{j\Phi_{rel}(j\omega_T)}\right| < \sqrt{2}\right)$$