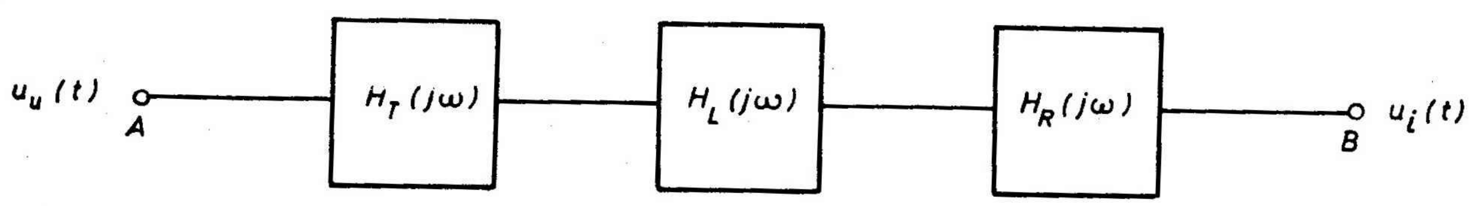
PRENOS BEZ ISI U REALNIM SISTEMIMA

Za razliku od idealnih sistema (koji fizički ne postoje) u kojima se ISI jednostavno eliminiše podešavanjem signalizacionog intervala propusnom opsegu filtra, u realnim sistemima se ISI eliminiše na drugi način. U tu svrhu definisani su ***Nyquist***-ovi kriterijumi koji preciziraju uslove koje treba da zadovolje sistemi za prenos signala u osnovnom opsegu učestanosti kako bi se izbjegla pojava intersimbolske interferencije.

Sistem od tačke A do B u realnom slučaju ima tri dijela:

1. Predajni filtar (prenosne funkcije $H_T(j\omega)$)
2. Linija veze (prenosne funkcije $H_L(j\omega)$)
3. Prijemni filtar (prenosne funkcije $H_R(j\omega)$)



Pretpostavimo digitalni signal u obliku:

$$u_u(t) = \sum_{k=-N}^{N} a_k x(t - kT)$$

Riječ je o povorci od 2N+1 elemenata, trajanje signalizacionog intervala je $T=1/f_s$, a_k je vrijednost značajnog parametra u k-tom signalizacionom intervalu, i u slučaju M-arnog signala može da ima jednu od M mogućih vrijednosti.

x(t) nazivamo ***standardni signal.*** To je standardni oblik impulsa koji predajnik šalje kada je $a_o=1$, dok su sve ostale vrijednosti $a_k=0$, tj. takav oblik signala koji opisuje impuls u jednom signalizacionom intervalu.

Ako je *Fourier*-ova transformacija signala $U_u(j\omega)=F\{u_u(t)\}$, i $U_i(j\omega)=F\{u_i(t)\}$,

onda je:

$$U_i(j\omega)=H_T(j\omega)\, H_L(j\omega)\, H_R(j\omega)\, U_u(j\omega)= H(j\omega)\, U_u(j\omega)$$

$$u_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) U_u(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Pošto je:

$$U_u(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u_u(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=-N}^{N} a_k x(t-kT) e^{-j\omega t} dt = \sum_{k=-N}^{N} a_k X(j\omega) e^{-j\omega kT}$$

to je:

$$u_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) \sum_{k=-N}^{N} a_k X(j\omega) e^{-j\omega kT} e^{j\omega t} d\omega = \sum_{k=-N}^{N} a_k \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) X(j\omega) e^{j\omega(t-kT)} d\omega$$

Uvedimo sledeću oznaku:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) X(j\omega) e^{j\omega(t-kT)} d\omega = y(t-kT)$$

kao **odziv sistema na pobudu standardnim signalom** *x(t).* Sada se izlazni signal može predstaviti kao:

$$u_i(t) = \sum_{k=-N}^{N} a_k y(t-kT)$$

Ovaj signal dolazi na sklop za odlučivanje. On zavisi od vremenskog oblika standardnog odziva, pa njegov oblik treba podesiti tako da u trenucima odlučivanja ne bude ISI. Pri tom, cilj je da značajni parametar digitalnog signala u_i(t) u složenoj funkciji u jednom određenom signalizacionom intervalu bude potpuno nezavisan od onoga što se dešava u ostalim signalizacionim intervalima.

Ako Fourierovu transformaciju funkcije *y* (t) označimo sa Y(jω):

$$Y(j\omega) = H(j\omega)X(j\omega) = H_T(j\omega)H_L(j\omega)H_R(j\omega)X(j\omega)$$

Dakle, proizvod ove četiri funkcije određuje standardni odziv *y(t).* Funkcija X(jω) vezana je za proces generisanja standardnog digitalnog signala na strani predaje i na nju se može uticati do izvjesnih granica. Funkcija prenosa linijskog dijela sistema H_L (jω) praktično je uvijek zadata i nju ne možemo da mijenjamo. Ali, možemo da projektujemo filtre, tj da utičemo na funkciju prenosa predajnog filtra H_T (jω) i na funkciju prenosa prijemnog filtra H_R (jω) tako da se dobije funkcija Y(jω) čija će inverzna Fourierova transformacija *y*(t) obezbijediti odsustvo intersimbolske interferencije. Ova dva filtra se često nazivaju *filtrima za oblikovanje impulsa*, i određuju se na osnovu Nyquistovih kriterijuma.

Postoje 3 različita Nyquistova kriterijuma, u zavisnosti od tog šta se uzima kao značajni parametar signala:

- **Prvi Nyquistov kriterijum:** odnosi se na prenos digitalnih signala kod kojih se odluka na prijemu donosi na osnovu ***amplituda*** odbiraka uzetih u sredini signalizacionih intervala.
- **Drugi Nyquistov kriterijum:** definiše uslove za sisteme u kojima je za tačan prenos potrebno da ne dođe do promjene ***trajanja*** značajnog stanja signala.
- **Treći Nyquistov kriterijum:** govori o mogućnosti da se izbjegne ISI u sistemima u kojima se kao značajni parametar signala odabere površina koju signal obuhvata u jednom signalizacionom intervalu. Ova situacija se rijetko koristi i ima više teorijski nego praktični značaj.

PRVI NYQUIST-OV KRITERIJUM

Prvi Nyquistov kriterijum se odnosi na prenos digitalnih signala kod kojih se odluka na prijemu donosi na osnovu amplituda odbiraka uzetih u sredini signalizacionih intervala. Taj kriterijum kaže da u ovakvom sistemu prenosa neće doći do ISI ako standardni odziv *y(t)* zadovoljava uslov da je $y(0)=y_0$, gdje je y_0 konstanta različita od 0, i ako su sve vrijednosti $y(mT)$ ravne nuli, gje je *m* bilo koji pozitivan ili negativan cio broj, a T trajanje signalizacionog intervala.

Analitički izraz za prvi Nyquistov kriterijum bi bio:

$$y(mT) = y_0 \delta_{m0}$$, gdje je $$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \mathrm{i} = \mathrm{j} \\ 0 & \mathrm{i} \neq \mathrm{j} \end{cases}$$ ***Kronecker***-ova delta

Pođimo od analitičkog oblika digitalnog signala na ulazu u sklop za odlučivanje:

$$u_i(mT) = \sum_{k=-N}^{N} a_k y[(m-k)T] = y_0 \sum_{k=-N}^{N} a_k \delta_{m-k,0}$$

Ako ovo dalje razvijemo:

$$u_i(mT) = y_0(a_{-N}\delta_{m+N,0} + \cdots + a_m\delta_{m-m,0} + \cdots + a_N\delta_{m-N,0})$$

dobijamo:

$$u_i(mT) = a_m y_0 = a_m y(0)$$

Kao što se vidi, vrijednost primljenog signala u *m*-tom trenutku odabiranja zavisi samo od onoga što je u tom signalizacionom intervalu bilo poslato od predajnika (ISI je jednaka nuli) ukoliko standardni odziv zadovoljava uslov koji definiše prvi Nyquistov kriterijum.

Polazeći od formulacije Nyquistovog kriterijuma u domenu vremena, možemo odrediti i odgovarajuću formu u domenu učestanosti kako bismo definisali uslov koji treba da zadovolji funkcija prenosa sistema kako ne bi došlo do ISI.

$$y(mT) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} Y(j\omega)e^{j\omega mT}d\omega$$

$$y(mT)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\omega_s}{2}}^{\frac{\omega_s}{2}} e^{j\frac{2\pi m}{\omega_s}\omega}\sum_{n=-\infty}^{\infty}Y[j(\omega+n\omega_s)]d\omega$$

Kako bi bio ispunjen Prvi Nyquistov kriterijum, tj. $y(mT) = y_0\delta_{m,0}$, u gornjem izrazu je potrebno da bude:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}Y[j(\omega+n\omega_s)]=\frac{2\pi}{\omega_s}y_0=Ty_0 \qquad *_2$$

Ovo je formulacija Prvog Nyquistovog kriterijuma u domenu učestanosti. Tada je:

$$y(mT)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\omega_s}{2}}^{\frac{\omega_s}{2}} e^{j\frac{2\pi m}{\omega_s}\omega}\frac{2\pi}{\omega_s'}y_0 d\omega=y_0\frac{\sin m\pi}{m\pi}=y_0\delta_{m0}$$

što potvrdjuje Prvi Nyquistov kriterijum.

Prethodni uslov nije samo dovoljan, već i potreban uslov za zadovoljenje Prvog Nyquistovog kriterijuma.

Ukoliko kompleksni spektar standardnog odziva zadovoljava uslov $*_2$, tada je ISI u trenucima odabiranja (na sredini signalizacionog intervala) jednaka nuli. Dobijeni izraz u kompleksnom domenu možemo da iskoristimo za projektovanje sistema za prenos, saglasno relaciji:

$$Y(j\omega)=H(j\omega)X(j\omega)=H_T(j\omega)H_L(j\omega)H_R(j\omega)X(j\omega)$$

Ako pretpostavimo da je standardni signal koji predstavlja digitalni signal u jednom signalizacionom intervalu delta impuls ($x(t)=\delta(t)$), tada je $Y(j\omega)=H(j\omega)$

Uzimajući u obzir uslov $*_2$:

$$Y(j\omega)=H(j\omega)=A(\omega)e^{j\chi(\omega)}$$

odnosno:

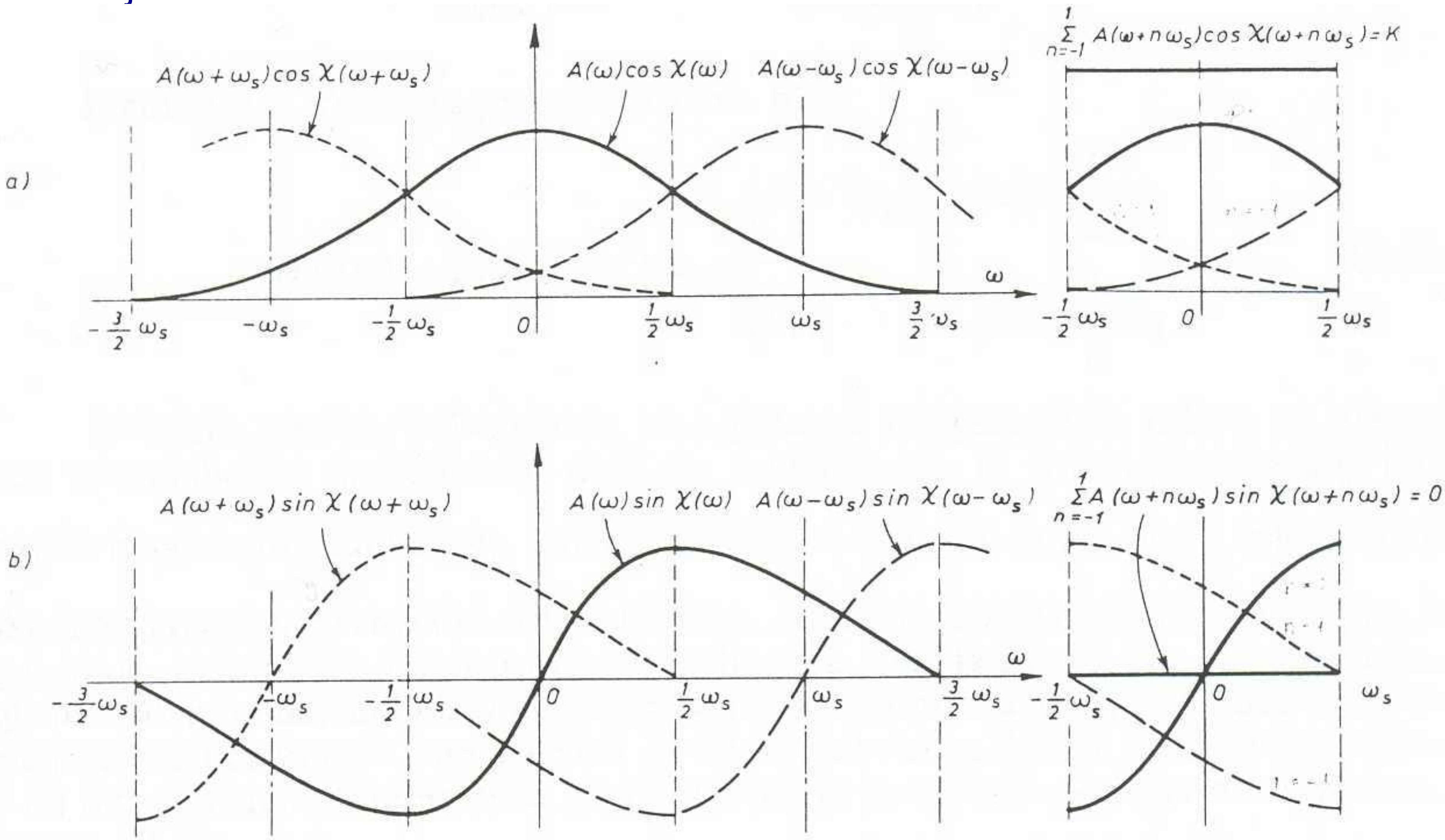
$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} Y[j(\omega+n\omega_s)]=\sum_{-\infty}^{\infty} A(\omega+n\omega_s)e^{j\chi(\omega+n\omega_s)}=\frac{2\pi}{\omega_s}y_0=Ty_0=K,\quad -\frac{1}{2}\omega_s\le\omega\le\frac{1}{2}\omega_s$$

Ako razdvojimo realni i imaginarni dio, dolazi se do uslova:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A(\omega+n\omega_s)\cos\chi(\omega+n\omega_s)=K,\quad -\frac{1}{2}\omega_s\le\omega\le\frac{1}{2}\omega_s$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A(\omega+n\omega_s)\sin\chi(\omega+n\omega_s)=0,\quad -\frac{1}{2}\omega_s\le\omega\le\frac{1}{2}\omega_s$$

Ovaj set uslova mora da zadovoljavaju amplitudska i fazna karakteristika sistema za prenos da ne dođe do intersimbolske interferencije. Na slici *a*) je ilustrovan realni dio, a na *b*) imaginarni dio funkcije prenosa sistema koji zadovoljava prvi Nyquistov kriterijum.



SISTEMI KOJI ZADOVOLJAVAJU PRVI NYQUISTOV KRITERIJUM

SLUČAJ IDEALNOG SISTEMA

Pretpostavimo da imamo sistem prenosa kome su amplitudska i fazna karakteristika date sa:

$$A(\omega)=\begin{cases} A(\omega), |\omega| \le \dfrac{\omega_s}{2} = \omega_c \\ 0, \quad |\omega| > \dfrac{\omega_s}{2} \end{cases} \qquad \chi(\omega)=\begin{cases} \chi(\omega), |\omega| \le \dfrac{\omega_s}{2} = \omega_c \\ 0, \quad |\omega| > \dfrac{\omega_s}{2} \end{cases}$$

Pošto je ovako definisana funkcija prenosa različita od 0 samo u intervalu $-\omega_s/2 \le \omega \le \omega_s/2$, jasno je da će sume:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A(\omega + n\omega_s)\cos\chi(\omega + n\omega_s) = K, \quad -\frac{1}{2}\omega_s \le \omega \le \frac{1}{2}\omega_s$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A(\omega + n\omega_s)\sin\chi(\omega + n\omega_s) = 0, \quad -\frac{1}{2}\omega_s \le \omega \le \frac{1}{2}\omega_s$$

imati samo po jedan član, pa se navedeni uslovi svode na:

$$A(\omega)\cos\chi(\omega)=K,\ \text{i}\ \ A(\omega)\sin\chi(\omega)=0,\qquad |\omega|\le\frac{1}{2}\omega_s$$

tj.

$$A(\omega)=K=y_0,\ \text{i}\ \ \chi(\omega)=0,\qquad |\omega|\le\frac{1}{2}\omega_s$$

Na osnovu toga je jasno da je funkcija prenosa sistema u opsegu učestanosti $-\omega_s/2\le\omega\le\omega_s/2$ koja zadovoljava Prvi Nyquistov kriterijum oblika:

$$H(j\omega)=A(\omega)=\begin{cases}K=Ty_0, & |\omega|\le\frac{1}{2}\omega_s\\[2ex] 0, & |\omega|\ge\frac{1}{2}\omega_s\end{cases}$$

Uočava se da je sistem prenosa koji ima minimalni propusni opseg, i u kome nema intersimbolske interferencije, ustvari idealni sistem prenosa. Stoga on ima više teorijski nego praktični značaj jer uslov idealnosti mora biti strogo zadovoljen.

Sistemi koji zadovoljavaju Nyquistov kriterijum i mogu se fizički realizovati (na račun proširenja propusnog opsega za najviše dva puta) nazivaju se ***Nyquistovi slučajevi.*** Takvih sistema je beskonačno mnogo.

Nyquistovi slučajevi

Riječ je o sistemima propusnicima niskih učestanosti kod kojih je propusni opseg proširen u odnosu na idealan sistem. Kod takvih sistema je:

$$A(\omega)=\begin{cases} A(\omega), & |\omega| \le \omega_g \\ 0, & |\omega| > \omega_g \end{cases} \qquad , \frac{1}{2}\omega_s \le \omega_g \le \omega_s$$

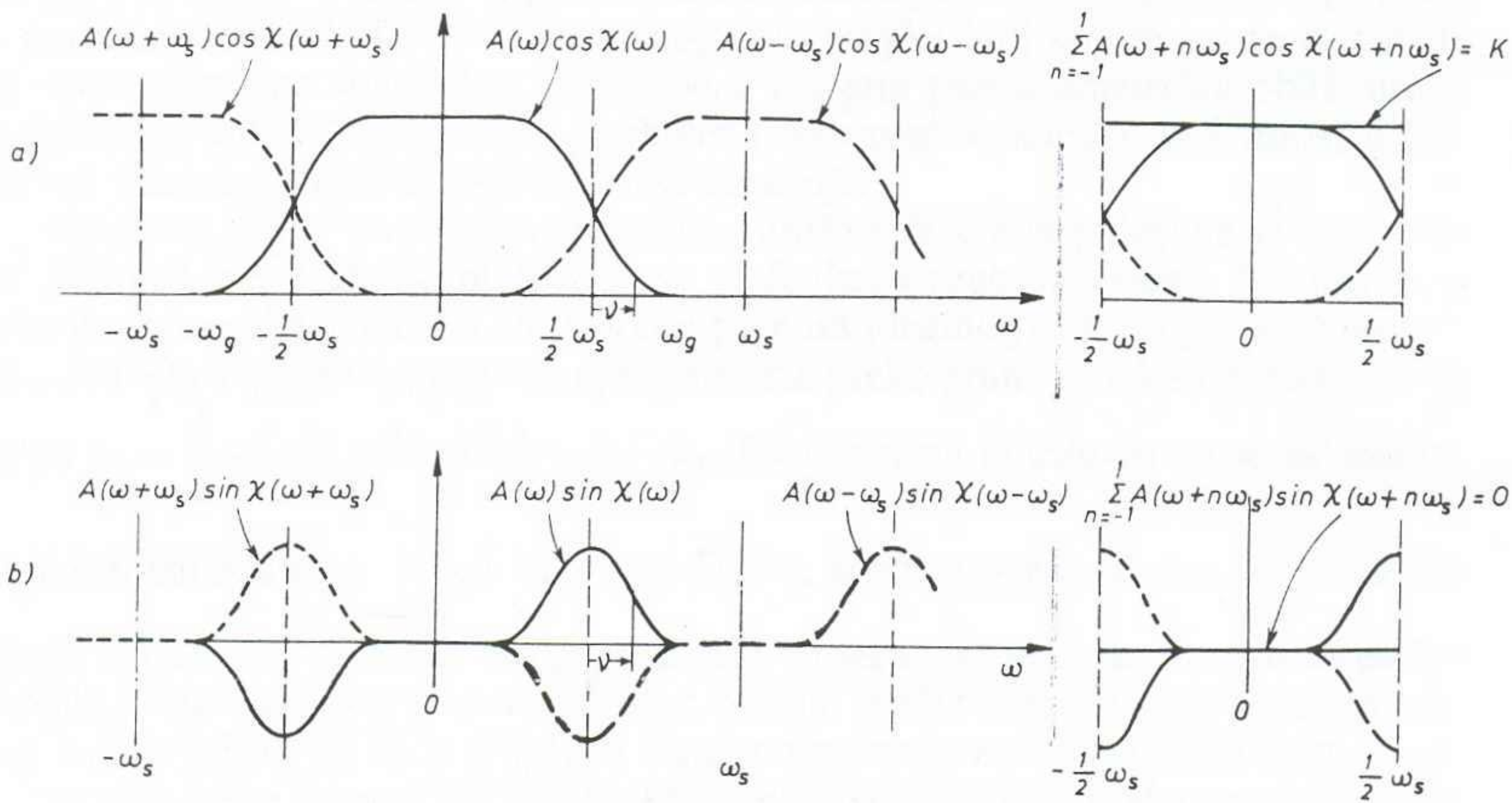
<u>Ograničenje u realizaciji ovakvih sistema se ogleda u tome da se minimalni propusni opseg (slučaj idealnog sistema) može proširiti najviše 100%.</u>

Amplitudska i fazna karakteristika ovakvog realnog sistema zadovoljavaju uslove:

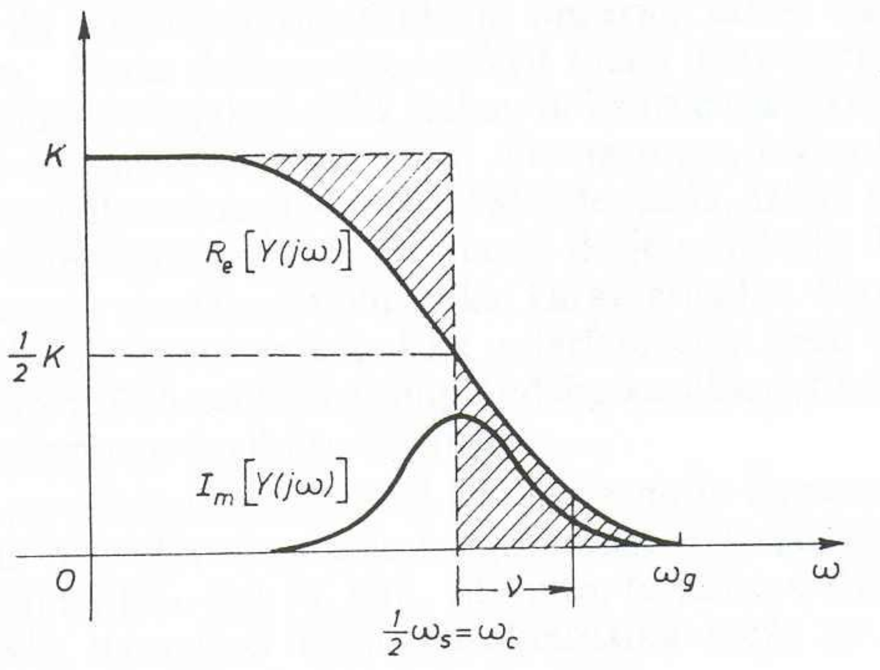
$$A(\omega)\cos\chi(\omega)+A(\omega-\omega_s)\cos\chi(\omega-\omega_s)=K, \qquad 0\le\omega\le\frac{1}{2}\omega_s$$

$$A(\omega)\sin\chi(\omega)+A(\omega-\omega_s)\sin\chi(\omega-\omega_s)=0, \qquad 0\le\omega\le\frac{1}{2}\omega_s$$

Odnosno, realni i imaginarni dio funkcije prenosa imaju oblik kao na slici:



Izdvojimo samo jedan detalj sa prethodne slike.



Kao što se vidi sa ove slike i datih izraza, realni i imaginarni dio funkcije prenosa imaju određenu simetriju. Naime, realni dio može da se shvati kao da je sastavljen iz dva dijela: iz pravougaonog oblika, prikazanog isprekidanom linijom, i zaobljenog oblika, koji je neparno simetričan u odnosu na tačku ($\omega_s/2$, $K/2$). Pri tome, zaobljena kriva linija definiše osjenčenu površinu koja se oduzima od pravougaonog oblika i dodaje iznad učestanosti $\omega_c = \omega_s/2$ kako bi se dobio realni dio funkcije prenosa. Što se tiče imaginarnog dijela funkcije prenosa, on je parno simetričan u odnosu na pravu $\omega = \omega_c = \omega_s/2$.

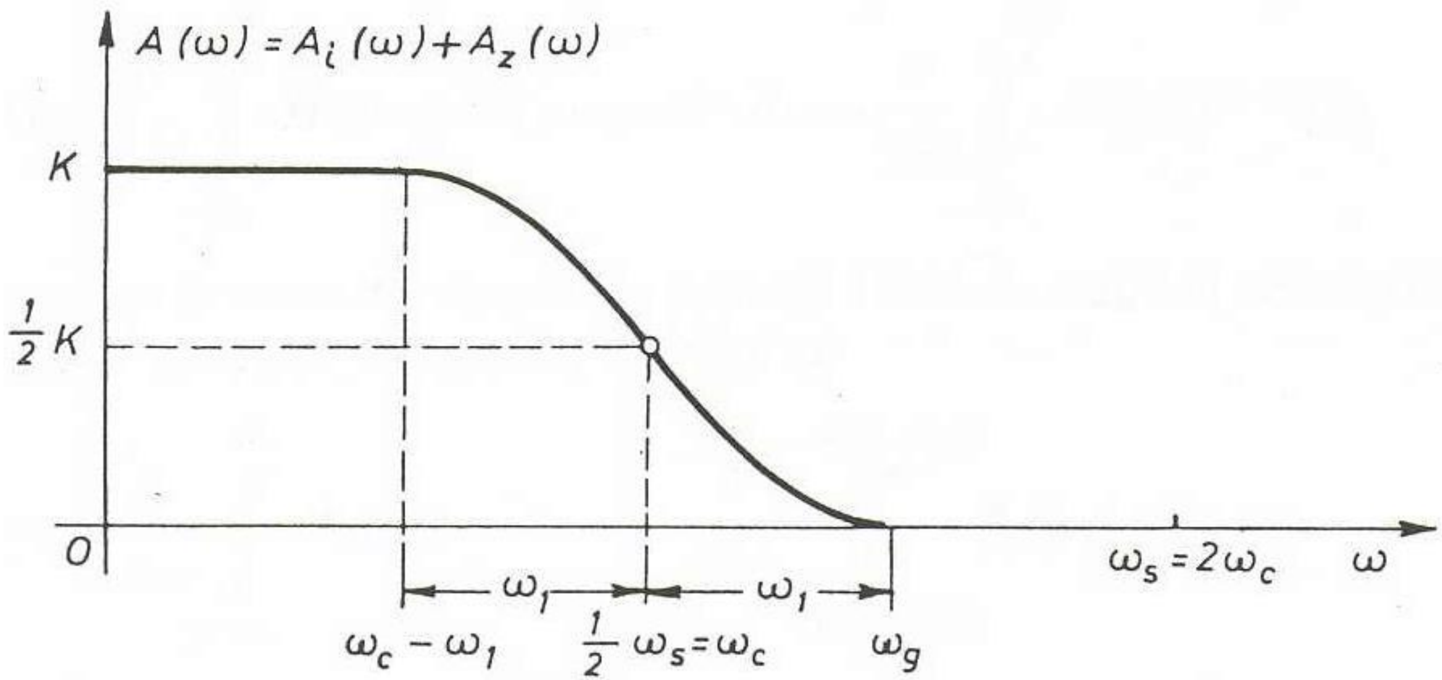
Kako je $\omega_s/2= \omega_c \leq\omega_g \leq \omega_s=2\ \omega_c$, Nyquist je zaključio da je moguće napraviti bezbroj funkcija prenosa koje obezbjeđuju prenos bez intersimbolske interferencije. Pri tome je definisao tzv. ***Nyquistove uslove simetrije*** koje te funkcije prenosa moraju zadovoljavati. Oni glase:

- Ako se pođe od idealnog sistema prenosa za koji je realni dio Re[H(jω)] dat pravougaonim oblikom, a imaginarni dio Im[H(jω)] je 0, i doda li se prvom neparno simetrično zaobljenje u odnosu na tačku ($\omega_s/2$, K/2), a drugom parno simetričan oblik u odnosu na pravu $\omega=\omega_c= \omega_s/2$, uslovi za prenos bez interferencije među simbolima (Prvi Nyquistov kriterijum) biće uvijek ispunjeni.

PRIMJERI NYQUISTOVIH SISTEMA ZA PRENOS

Funkcije prenosa sa kosinusoidalnim zaobljenjem

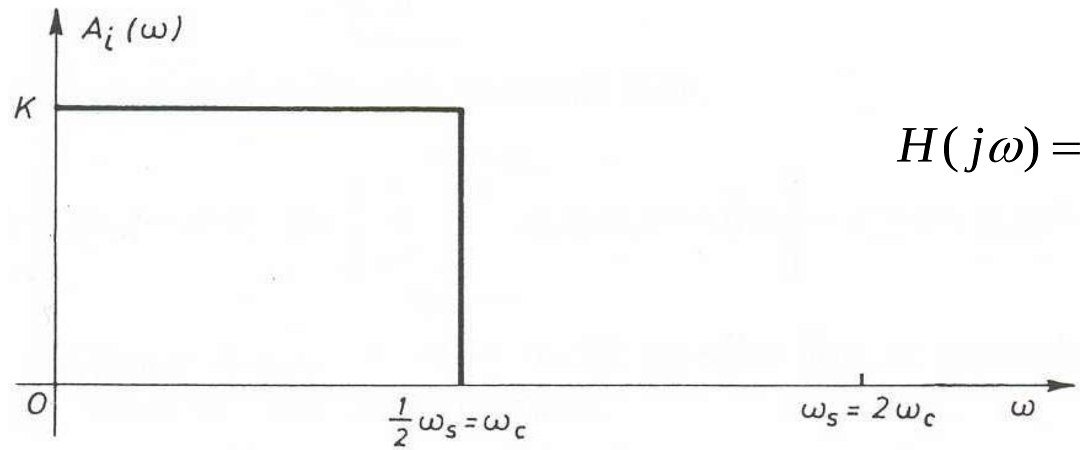
Razmotrimo jednu klasu funkcija prenosa koje zadovoljavaju Prvi Nyquistov kriterijum. Pretpostavimo da je kod njih fazna funkcija ravna nuli ($\chi(\omega)=0$, tj. nema kašnjenja), a da amplitudska karakteristika ima opšti oblik kao na slici. Idealnom sistemu prenosa je dodato ***neparno*** zaobljenje i to po zakonu kosinusa.



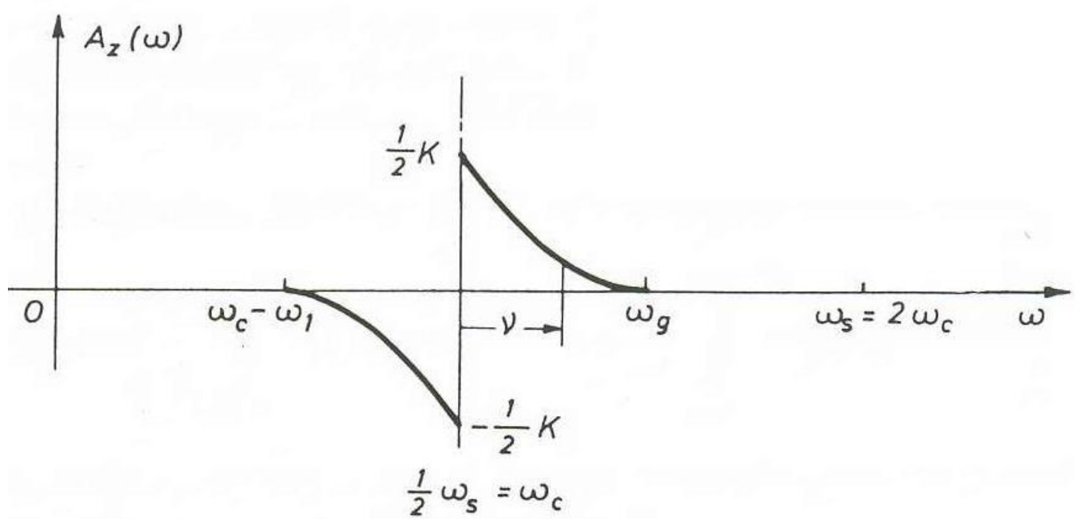
Provjerimo da li u trenucima odabiranja ima ISI. Potrebno je pronaći odziv takvog sistema na pobudu u vidu delta impulsa ($x(t)=\delta(t)$).

Pretpostavljena amplitudska karakteristika $A(\omega)$ može da se razloži na dvije karakteristike:

1. Idealni dio sistema označen sa $A_i(\omega)$
2. Izobličenje u odnosu na idealnu karakteristiku označeno sa $A_z(\omega)$



$$H(j\omega) = A(\omega) = A_i(\omega) + A_z(\omega)$$



Odziv ovakvog sistema je:

$$y(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}H(j\omega)X(j\omega)e^{j\omega t}d\omega=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}A(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

$$y(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\omega_c}^{\omega_c}A_i(\omega)e^{j\omega t}d\omega+\frac{1}{2\pi}\int_{-(\omega_c+\omega_1)}^{-(\omega_c-\omega_1)}A_z(\omega)e^{j\omega t}d\omega+\frac{1}{2\pi}\int_{\omega_c-\omega_1}^{\omega_c+\omega_1}A_z(\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

Poslednja dva integrala su u smislu vrijednosti jednaka, pa možemo pisati:

$$y(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\omega_c}^{\omega_c}A_i(\omega)e^{j\omega t}d\omega+\mathrm{Re}\left[\frac{1}{\pi}\int_{\omega_c-\omega_1}^{\omega_c+\omega_1}A_z(\omega)e^{j\omega t}d\omega\right]=y_i(t)+y_z(t)$$

Odziv se sastoji od dvije komponente. Jedna je posljedica idealnog dijela karakteristike prenosa, a druga je od zaobljenja.
Kako je $A_i(\omega)=K$, to je odziv na idealni dio prenosne karakteristike sistema:

$$y_i(t)=K\frac{2\omega_s}{2\pi}\frac{\sin\omega_c t}{\omega_c t}=\frac{K}{T}\frac{\sin\omega_c t}{\omega_c t}=y_0\frac{\sin\omega_c t}{\omega_c t}$$

Komponenta odziva koja potiče od zaobljenja karakteristike je:

$$y_z(t) = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{\pi}\int_{\omega_c-\omega_1}^{\omega_c} A_z(\omega)e^{j\omega t}d\omega + \frac{1}{\pi}\int_{\omega_c}^{\omega_c+\omega_1} A_z(\omega)e^{j\omega t}d\omega\right]$$

Uvedimo pomjeraje u odnosu na centralnu učestanost:

$$y_z(t) = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{\pi}\int_0^{\omega_1} A_z(\omega_c-\nu)e^{j\omega_c t}e^{-j\nu t}d\nu + \frac{1}{\pi}\int_0^{\omega_1} A_z(\omega_c+\nu)e^{j\omega_c t}e^{j\nu t}d\nu\right]$$

Posmatrana funkcija zadovoljava Nyquistov kriterijum simetrije, tj. zaobljenje je neparno simetrično, pa važi da je:

$$A_z(\omega_c-\nu) = -A_z(\omega_c+\nu)$$

Odavde se dobija da je:

$$y_z(t) = \frac{2}{\pi}\sin\omega_c t\int_0^{\omega_1} A_z(\omega_c-\nu)\sin\nu t\, d\nu$$

Ukupan odziv funkcije prenosa je:

$$y(t) = y_i(t) + y_z(t) = \frac{K}{T}\frac{\sin\omega_c t}{\omega_c t} + \frac{2}{\pi}\sin\omega_c t\int_0^{\omega_1} A_z(\omega_c - \nu)\sin\nu t\, d\nu$$

Ako pretpostavimo kosinusoidalno zaobljenje tako da je:

$$A_z(\omega) = K\begin{cases} -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{2}\frac{|\omega| - \omega_c}{\omega_1}, & \omega_c - \omega_1 \le |\omega| \le \omega_c \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{2}\frac{|\omega| - \omega_c}{\omega_1}, & \omega_c \le |\omega| \le \omega_c + \omega_1 \end{cases}$$

Ukupna prenosna funkcija je:

$$A(\omega) = K\begin{cases} 1, & |\omega| \le \omega_c - \omega_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{2}\frac{|\omega| - \omega_c}{\omega_1}, & \omega_c - \omega_1 \le |\omega| \le \omega_c + \omega_1 \\ 0, & |\omega| \ge \omega_c + \omega_1 \end{cases}$$

Uobičajeno je da se za ovakve zaobljene karakteristike definiše ***faktor zaobljenja*** ("roll off") kao odnos ω_1 i ω_c.

$$\xi = \frac{\omega_1}{\omega_c}$$

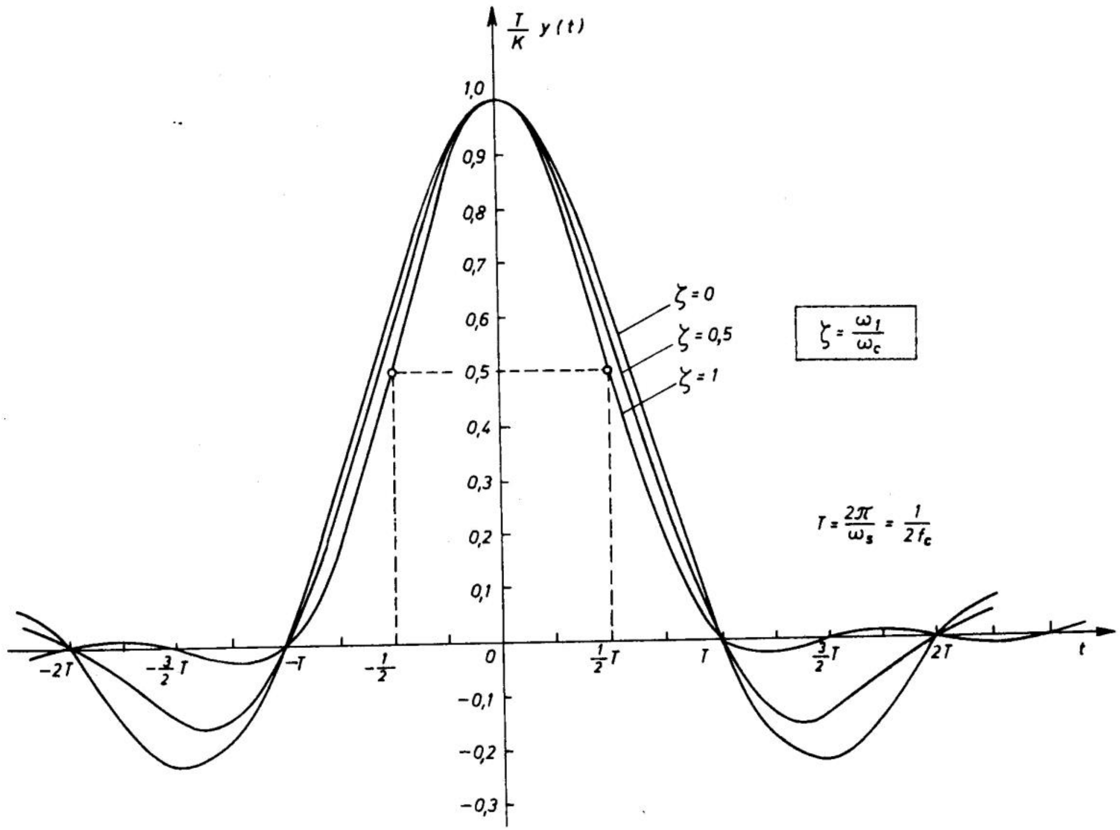
Kod sistema iz grupe Nyquistovih slučajeva ovaj faktor se kreće u granicama od 0 (idealan sistem) do 1 (maksimalno proširenje sistema, duplo veće od idealnog).

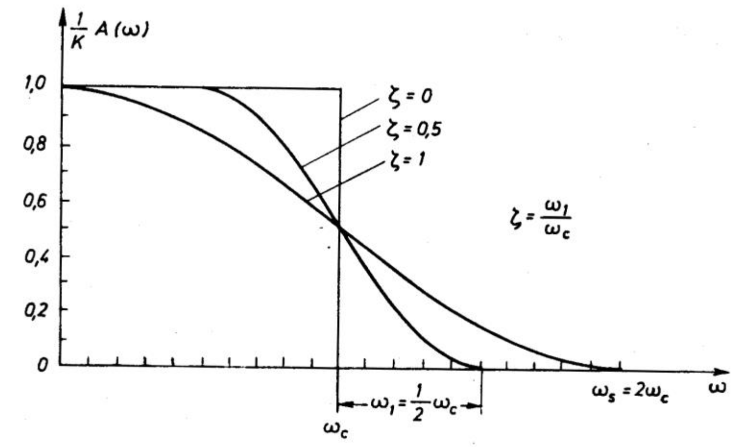
Da bi se pronašao traženi odziv sistema čija amplitudska karakteristika ima kosinusoidalno zaobljenje na pobudu δ impulsom potrebno je u izrazu za odziv sistema uvrstiti karakteristiku $A_z(\omega)$, pa se konačno dobija:

$$y(t) = \frac{K}{T}\frac{\sin\omega_c t}{\omega_c t} + \frac{2}{\pi}\sin\omega_c t\int_0^{\omega_1} K\left(-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{2}\frac{\nu}{\omega_1}\right)\sin\nu t\, d\nu$$

$$y(t) = \frac{K}{T}\frac{\sin\omega_c t}{\omega_c t}\frac{\cos\omega_1 t}{1-\left(\frac{2\omega_1 t}{\pi}\right)^2}, \quad \mathrm{T} = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{1}{2 f_c}$$

Za različite vrijednosti roll off faktora dobijaju se različiti oblici odziva. Neki od njih su prikazani na slici, i to: slučaj idealne amplitudske karakteristike za koji je faktor zaobljenja ξ=0, slučaj u kome je faktor zaobljenja ξ=0,5 i slučaj u kome je ξ= 1. Prikazane su i odgovarajuće amplitudske karakteristike ovih sistema.





Analizirajući impulsni odziv vidi se da se unošenjem zaobljenja u amplitudsku karakteristiku nije izmijenio ni položaj nula odziva u odnosu na odziv idealnog sistema, ni maksimalna vrijednost odziva $y(0)=y_0=K/T$. Znači, neće postojati intersimbolske interferencija.

S druge strane, uticaj zaobljenja je takav da je amplituda oscilacija u »repu« odziva utoliko manja ukoliko je faktor zaobljenja ξ bliži vrijednosti 1. To znači da ako i dođe do intersimbolske interferencije iz bilo kojih razloga, njen uticaj će biti manji ako postoji zaobljenje.

Posebnu pažnju zaslužuje karakteristika čiji je faktor zaobljenja ξ=1. Ovakva karakteristika naziva se često i karakteristikom *"podignuti kosinus".* Sa slike se vidi da su u tom slučaju amplitude oscilacija u odzivu ne samo smanjene već se u odzivu javljaju i dodatne nule u trenucima ±3T/2, ±5T/2, ±7T/2, ...(2n+1)T/2, a u tačkama ±T/2 relativna amplituda odziva iznosi 0,5. To ima poseban značaj i na to ćemo se osvrnuti onda kad bude riječi o Drugom Nyquistovom kriterijumu.