

Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

Elektronika 1

1. Uvod u elektroniku

Električki signal

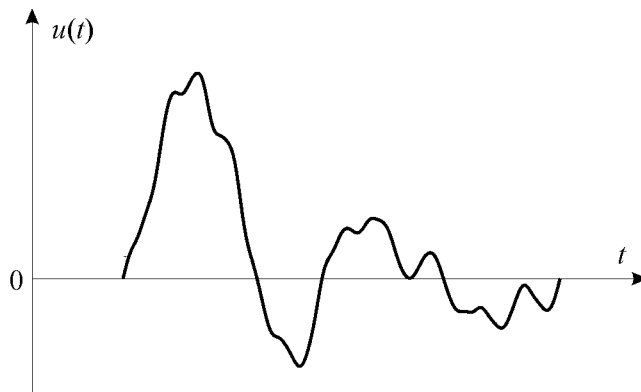
Temeljna uloga elektronike – obrada informacija.

Fizikalna informacija (temperatura, brzina, zvuk, slika) – prije obrade pretvorba u električki signal

Električki signal – sadrži informaciju u vidu vremenski promjenjivog napona ili struje

Prikaz električkog signala

Vremenski prikaz – promjena signala u vremenu



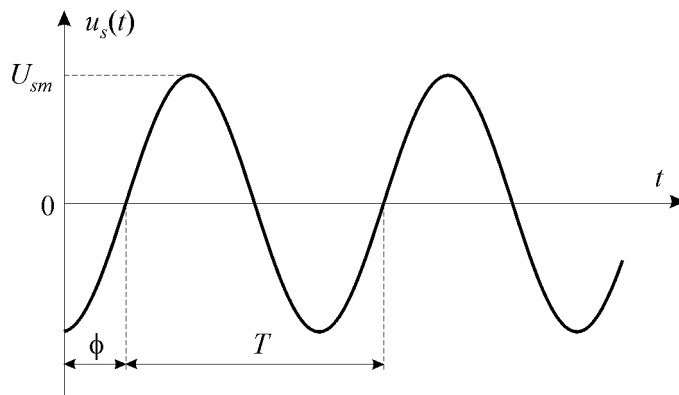
Frekvencijski spektar – ovisnost signala o frekvenciji

Određuje se pomoću *Fourierovog reda* ili *Fourierove transformacije*

Sastoji se od zbroja sinusnih signala različitih frekvencija, amplituda i faza

Sinusni signal

Sinusni signal - osnovni signal u elektronici



$$u_s(t) = U_{sm} \sin(\omega t - \phi)$$

U_{sm} – amplituda

U_s – efektivna vrijednost $U_s = U_{sm} / \sqrt{2}$

ω – kružna frekvencija

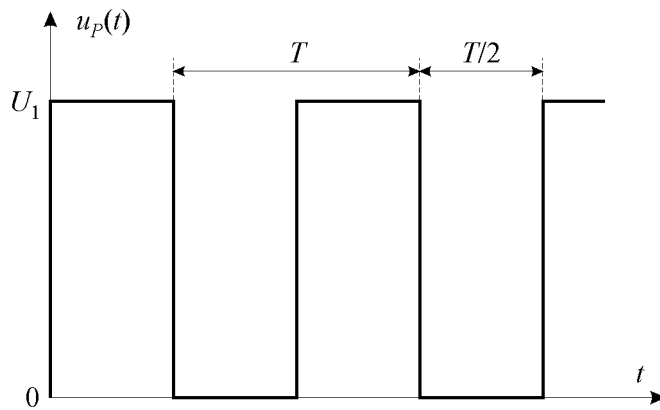
f – frekvencija $\omega = 2\pi f$

periodički signal $u_s(t + T) = u_s(t)$

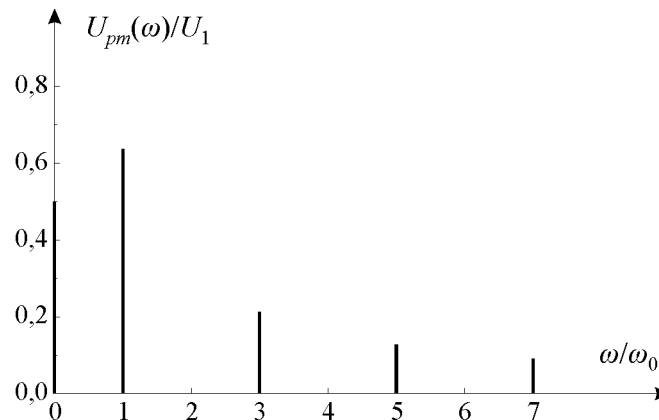
T – perioda $T = 1/f$

Primjer – pravokutni signal

Vremenski prikaz



Frekvencijski spektar



$$u_P(t) = \frac{U_1}{2} + \frac{2}{\pi} U_1 \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega_0 t + \frac{1}{7} \sin 7 \omega_0 t + \dots \right)$$

$U_1/2$ – istosmjerna komponenta

$\omega_0 = 2\pi/T$ – osnovna frekvencija

$n\omega_0$ – viši harmonici

Vrste signala

Analogni signali

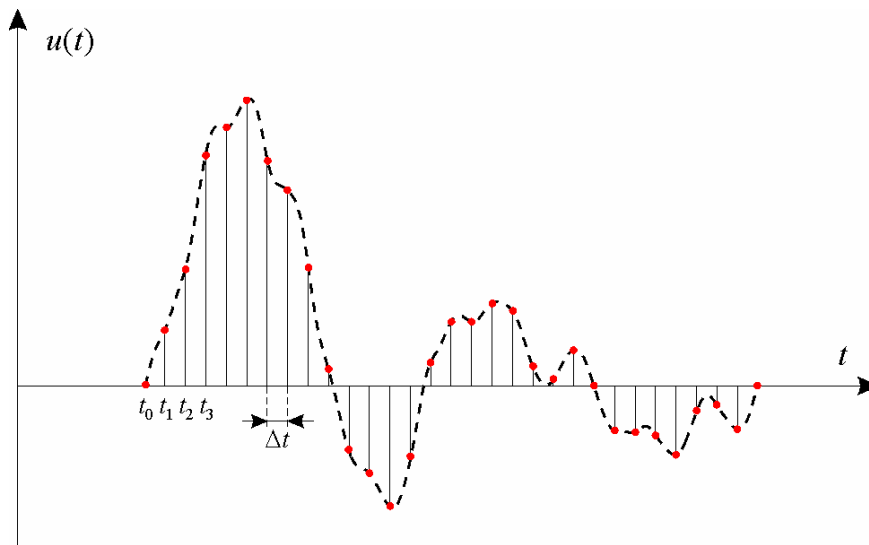
- ☐ prirodni signali, analogni fizikalnoj informaciji
- ☐ amplituda poprima sve vrijednosti (kontinuirana)
- ☐ kontinuirano se mijenja u vremenu
- ☐ obrađuju se analognim sklopovima

Digitalni signali

- ☐ nizovi brojeva koji predstavljaju veličine signala u diskretnim trenucima
- ☐ obrađuju se digitalnim sklopovima

Uzorkovanje analognog signala

Diskretizacija po vremenu – prvi korak pretvorbe analognog u digitalni signal



uzorkovanje u diskretnim
trenucima t_0, t_1, t_2, t_3

razmak diskretizacije Δt mora
biti dovoljno mali da se ne
izgubi informacija

uzorkovani signal (uzorci) –
diskretan u vremenu,
kontinuirana amplituda

Digitalizacija uzorkovanog signala

Zamjena uzoraka signala brojem s konačnim brojem znamenaka - drugi korak pretvorbe analognog u digitalni signal

Diskretizirane amplitude – poprimaju konačni broj razina

Prikaz broja - koristi se *binarni brojevni sustav* – dvije znamenke 0 i 1

Binarni broj B s N znamenaka

- računa se prema $B = b_{N-1} 2^{N-1} + \dots + b_2 2^2 + b_1 2^1 + b_0 2^0$
- piše se skraćeno $B = b_{N-1} \dots b_2 b_1 b_0$

Broj razina diskretizirane amplitude – 2^N

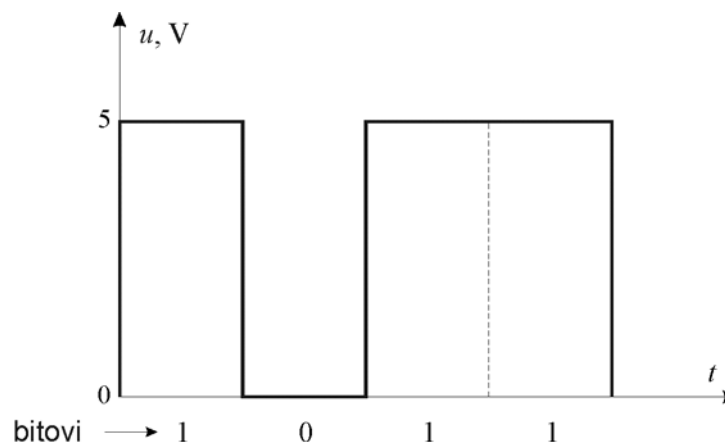
- N broj bitova binarnog broja – određuje pogrešku pretvorbe

Binarni broj u digitalnim sklopovima

Predočuje se nizom impulsa s dvije razine napona

Pozitivna logika:

- niska razina napona – bit 0
- visoka razina napona – bit 1



Analogna i digitalna elektronika

Analogni sustavi

- ❑ složeniji zbog veće osjetljivosti analognih signala – informacija signala sadržana u razini amplitude
- ❑ nužni zbog analogne prirode fizikalnih informacija

Digitalni sustavi

- ❑ jednostavniji zbog manje osjetljivosti digitalnih signala – informacija signala sadržana u neprisutnosti ili prisutnosti impulsa
- ❑ jednostavnije projektiranje – zbog manjih zahtjeva na rad sklopa
- ❑ veliki broj digitalnih blokova – realizacija s integriranim sklopovima

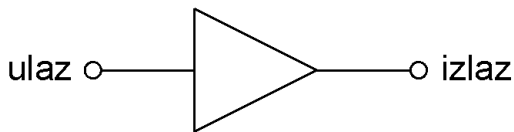
Digitalna obrada signala

- ❑ popularna zbog jednostavnosti digitalnih sustava i manje osjetljivosti digitalnih signala
- ❑ u analognim primjenama – zahtjeva analogno-digitalnu i digitalno-analognu pretvorbu

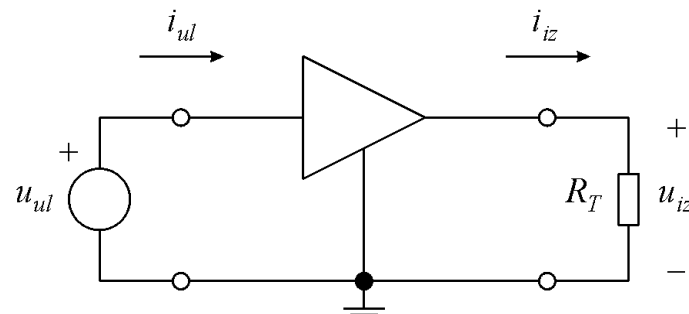
Pojačalo

Pojačalo

- ❑ pojačava ulazni signal
- ❑ linearni sklop – pojačani izlazni signal istog je valnog oblika kao i ulazni



električni simbol



priključak izvora signala u_{ul} i otpora trošila R_T

Pojačanja

naponsko

$$A_V \equiv \frac{u_{iz}(t)}{u_{ul}(t)}$$

strujno

$$A_I \equiv \frac{i_{iz}(t)}{i_{ul}(t)}$$

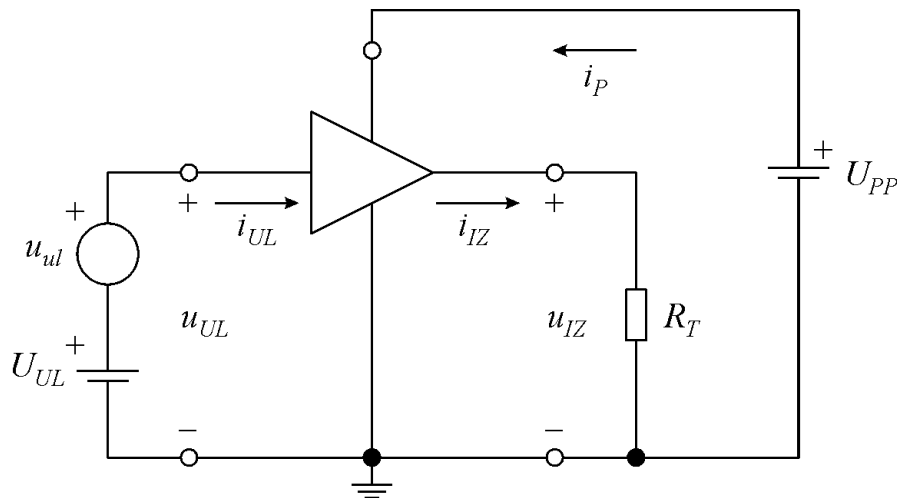
pojačanje snage

$$A_P \equiv \frac{p_{iz}(t)}{p_{ul}(t)} = \frac{u_{iz}(t) i_{iz}(t)}{u_{ul}(t) i_{ul}(t)} = A_V A_I$$

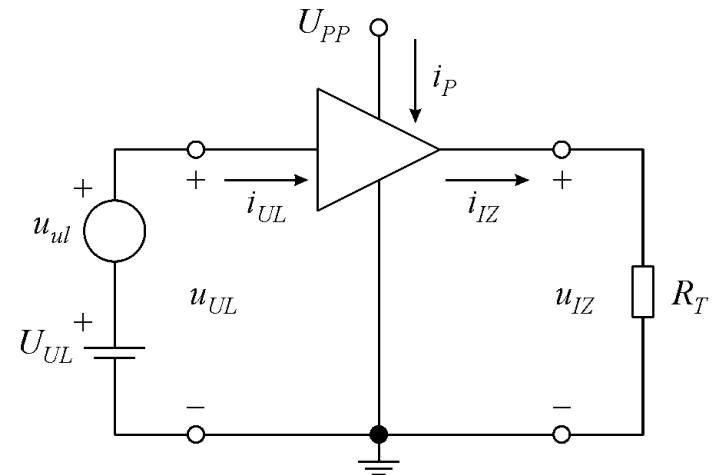
Napajanje

Pojačalo se priključuje na istosmjerni izvor napajanja

Povećanje snage signala na trošilu - korištenjem snage izvora napajanja



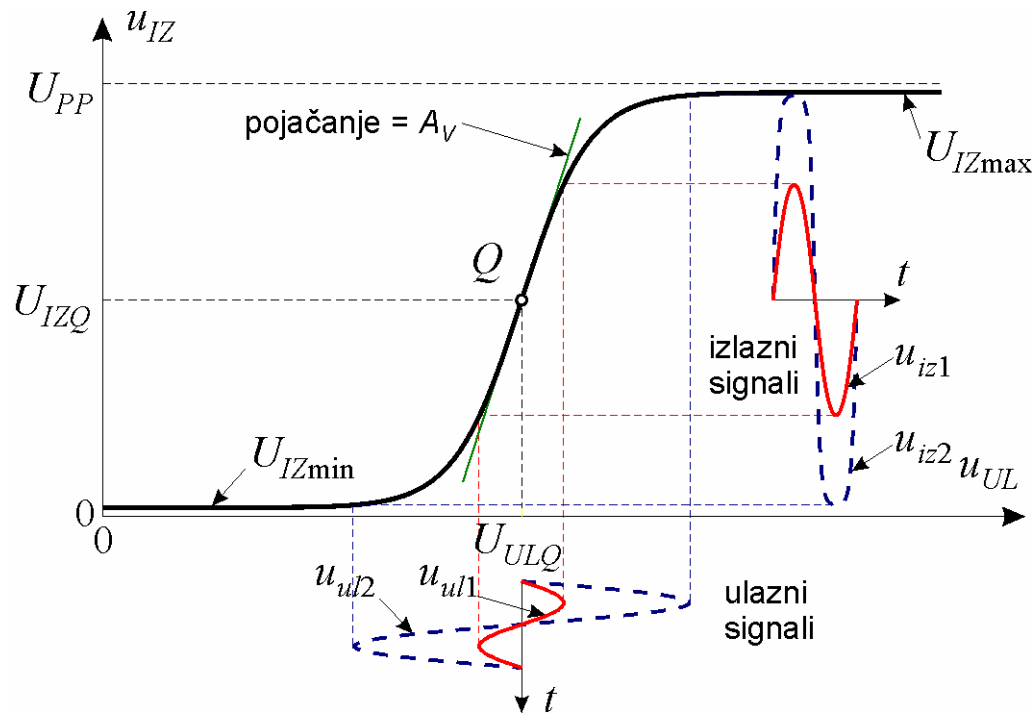
prikaz s istosmjernim
naponskim izvorom



uobičajeni način označavanja
napona napajanja

Prijenosna karakteristika (1)

Napon napajanja ograničava hod izlaznog napona u_{IZ}



Prijenosna karakteristika (2)

Pojačalo je linearni sklop – samo u linearnom dijelu prijenosne karakteristike
Istosmjerni napon U_{UL} - postavlja statičku radnu točku Q u linearni dio
prijenosne karakteristike

Optimalni položaj statičke radne točke – na sredini linearnog dijela prijenosne
karakteristike

Ulazni signal:

$$u_{UL} = U_{ULQ} + u_{ul}(t)$$

Izlazni signal u režimu malog signala (linearni rad pojačala)

$$u_{IZ} = U_{IZQ} + u_{iz}(t)$$

Za linearni rad

$$\Delta u_{UL \max} = \frac{\Delta u_{IZ \max}}{A_V} = \frac{U_{IZ \max} - U_{IZ \min}}{A_V} \approx \frac{U_{PP}}{A_V}$$

Odnosi snaga

Ulazna snaga pojačala - prvenstveno snaga izvora napajanja

❑ trenutna snaga

$$p_{PP} = U_{PP} i_P$$

❑ srednja snaga (u linearnom radu)

$$P_{PP} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{PP} i_P dt = U_{PP} I_P$$

Srednja snaga signala predana trošilu

$$P_{T,ac} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{iz}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_{iz}(t) i_{iz}(t) dt$$

Djelotvornost pojačala

$$\eta = \frac{P_{T,ac}}{P_{PP}}$$

Primjer 1.1

Pojačalo je priključeno na pozitivni napon napajanja $U_{PP} = 15 \text{ V}$. Na ulaz pojačala doveden je sinusni napon amplitude 75 mV , a trošilu otpora $1,5 \text{ k}\Omega$ predaje se sinusni napon amplitude 6 V . Iz izvora napajanja pojačalo troši istosmjernu struju od 5 mA . Amplituda ulazne sinusne struja pojačala je $0,1 \text{ mA}$. Odrediti naponsko i strujno pojačanje, pojačanje snage i djelotvornost pojačala.

Rješenje:

$$A_V = \frac{U_{izm}}{U_{ulm}} = \frac{6}{0,075} = 80$$

$$I_{izm} = \frac{U_{izm}}{R_T} = \frac{6}{1,5} = 4 \text{ mA}$$

$$A_I = \frac{I_{izm}}{I_{ulm}} = \frac{4}{0,1} = 40$$

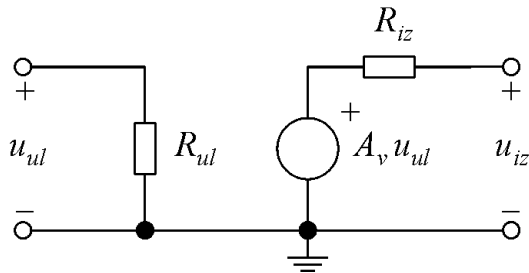
$$A_P = A_V A_I = 80 \cdot 40 = 3200$$

$$P_{PP} = U_{PP} I_P = 15 \cdot 5 = 75 \text{ mW}$$

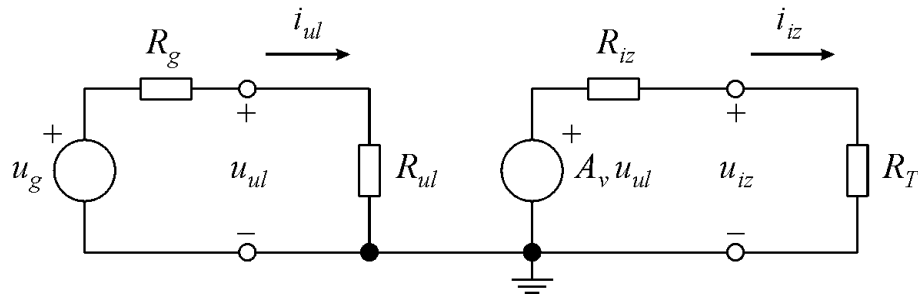
$$P_{T,ac} = U_{iz} I_{iz} = \frac{U_{izm}}{\sqrt{2}} \frac{I_{izm}}{\sqrt{2}} = \frac{6 \cdot 4}{2} = 12 \text{ mW}$$

$$\eta = \frac{P_{T,ac}}{P_{PP}} = \frac{12}{75} = 0,16 = 16 \%$$

Naponsko pojačalo (1)



sklopovski model



priključak izvora signala i trošila

Naponsko pojačanje

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = A_v \frac{R_T}{R_{iz} + R_T} \quad A_v \equiv \left. \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \right|_{i_{iz}=0}$$

$$A_{Vg} = \frac{u_{iz}}{u_g} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \frac{u_{ul}}{u_g} = A_v \frac{R_T}{R_{iz} + R_T} \frac{R_{ul}}{R_g + R_{ul}}$$

Idealno naponsko pojačalo $R_{ul} \rightarrow \infty$ $R_{iz} \rightarrow 0$ $A_{Vg} \rightarrow A_V \rightarrow A_v$

Naponsko pojačalo (2)

Strujno pojačanje

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{u_{iz} / R_T}{u_{ul} / R_{ul}} = A_V \frac{R_{ul}}{R_T}$$

Pojačanje snage

$$p_{ul} = u_{ul} i_{ul} = \frac{u_{ul}^2}{R_{ul}} = i_{ul}^2 R_{ul}$$

$$p_{iz} = u_{iz} i_{iz} = \frac{u_{iz}^2}{R_T} = i_{iz}^2 R_T$$

$$A_P = \frac{p_{iz}}{p_{ul}} = A_V A_I = A_V^2 \frac{R_{ul}}{R_T} = A_I^2 \frac{R_T}{R_{ul}}$$

Primjer 1.2

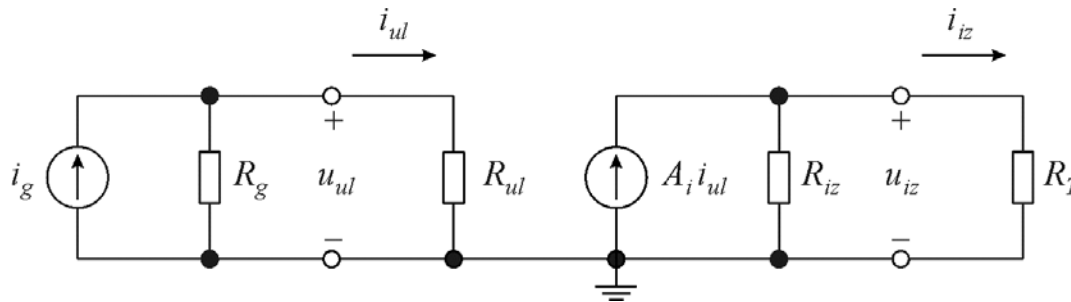
Izlazni napon naponskog pojačala smanji se za 25% kada se na njegov izlaz priključi trošilo od 1 kΩ. Koliki je izlazni otpor pojačala?

Rješenje:

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = A_v \frac{R_T}{R_{iz} + R_T} = 0,75 A_v$$

$$R_{iz} = R_T \left(\frac{A_v}{A_V} - 1 \right) = 1 \cdot \left(\frac{1}{0,75} - 1 \right) = 333 \Omega$$

Strujno pojačalo



Strujno pojačanje

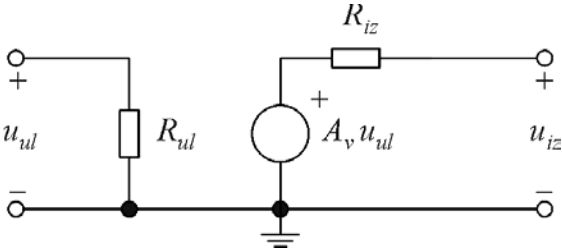
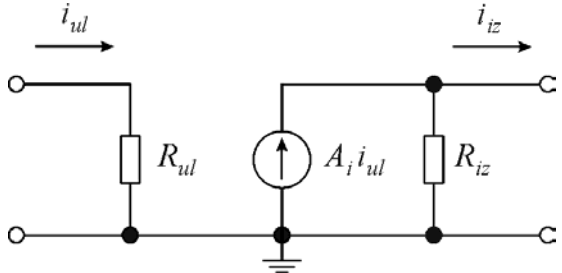
$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = A_i \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_T} \quad A_i \equiv \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \Big|_{u_{iz}=0}$$

$$A_{Ig} = \frac{i_{iz}}{i_g} = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \frac{i_{ul}}{i_g} = A_i \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_T} \frac{R_g}{R_g + R_{ul}}$$

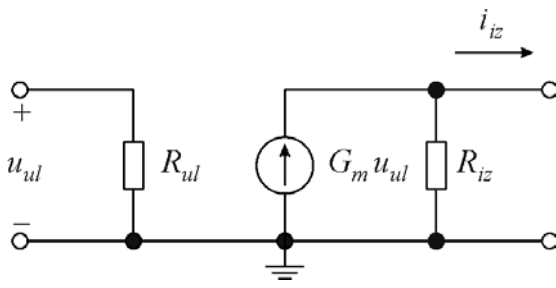
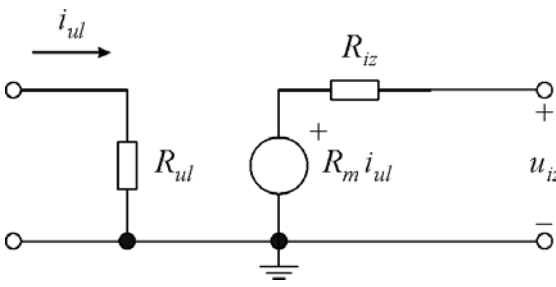
Idealno strujno pojačalo $R_{ul} \rightarrow 0 \quad R_{iz} \rightarrow \infty \quad A_{Ig} \rightarrow A_I \rightarrow A_i$

Naponsko pojačanje $A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{i_{iz} R_T}{i_{ul} R_{ul}} = A_I \frac{R_T}{R_{ul}}$

Tipovi pojačala (1)

Tip	Model	Pojačanje	Idealno pojačalo
Naponsko pojačalo		$A_v \equiv \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \Big _{i_{iz}=0}$	$R_{ul} \rightarrow \infty$ $R_{iz} \rightarrow 0$
Strujno pojačalo		$A_i \equiv \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \Big _{u_{iz}=0}$	$R_{ul} \rightarrow 0$ $R_{iz} \rightarrow \infty$

Tipovi pojačala (2)

Tip	Model	Pojačanje	Idealno pojačalo
Strminsko pojačalo		$G_m \equiv \frac{i_{iz}}{u_{ul}} \Big _{u_{iz}=0}$	$R_{ul} \rightarrow \infty$ $R_{iz} \rightarrow \infty$
Otporno pojačalo		$R_m \equiv \frac{u_{iz}}{i_{ul}} \Big _{i_{iz}=0}$	$R_{ul} \rightarrow 0$ $R_{iz} \rightarrow 0$

Pojačanja u decibelima

Pojačanja u logaritamskom mjerilu

Pojačanje snage

$$A_P = 10 \log \frac{p_{iz}}{p_{ul}}, \text{ dB}$$

$$A_P = 20 \log \frac{u_{iz}}{u_{ul}} + 10 \log \frac{R_{ul}}{R_T}, \text{ dB} \quad A_P = 20 \log \frac{i_{iz}}{i_{ul}} + 10 \log \frac{R_T}{R_{ul}}, \text{ dB}$$

Naponsko pojačanje

$$A_V = 20 \log \frac{u_{iz}}{u_{ul}}, \text{ dB}$$

Strujno pojačanje

$$A_I = 20 \log \frac{i_{iz}}{i_{ul}}, \text{ dB}$$

Frekvencijska karakteristika

Frekvencijski odziv – odziv pojačala na sinusne signale različitih frekvencija

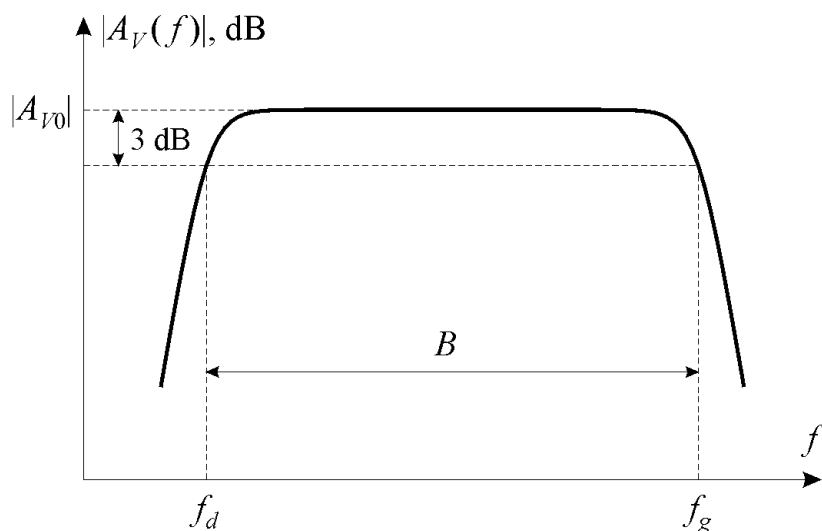
Uz linearni rad pojačala

$$u_{ul} = U_{ulm} \sin \omega t \qquad u_{iz} = U_{izm} \sin(\omega t + \phi)$$

Frekvencijska karakteristika – za svaku frekvenciju f određuje se amplituda i faza

$$|A_V(f)| = \frac{U_{izm}}{U_{ulm}} \qquad \angle A_V(f) = \phi$$

Amplitudna frekvencijska karakteristika pojačala



granične frekvencije – pad pojačanja na

$$A_{V0} / \sqrt{2} \quad \text{ili za 3 dB}$$

f_d – donja granična frekvencija

f_g – gornja granična frekvencija

$f_d < f < f_g$ – područje srednjih frekvencija

$f < f_d$ – područje niskih frekvencija

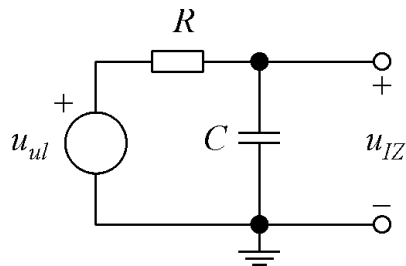
$f > f_g$ – područje visokih frekvencija

$B = f_g - f_d$ – širina frekvencijskog pojasa

Sva pojačala imaju gornju graničnu frekvenciju f_g

Kod nekih pojačala $f_d \rightarrow 0$ – **istosmjerna pojačala**

Frekvencijska karakteristika *RC*-mreže



$$u_{ul} = U_{ulm} \sin \omega t$$

$$Z_C = 1/(j \omega C)$$

$$T = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{\frac{1}{j \omega C}}{R + \frac{1}{j \omega C}} = \frac{1}{1 + j \omega RC} = \frac{1}{1 + j \omega / \omega_1}$$

$$\omega_1 = 1/(RC)$$

Bodeov dijagram

Bodeov dijagram - dva grafa: amplitudna i fazna karakteristika u ovisnosti o frekvenciji

Crta se:

- ☐ amplituda - u decibelima,
- ☐ faza - u stupnjevima,
- ☐ frekvencija - u logaritamskom mjerilu.

Odabirom Bodeovog dijagrama frekvencijske karakteristike realnih pojačala mogu se dobro aproksimirati izlomljenim pravcima.

Frekvencijska karakteristika *RC*-mreže – Bodeov dijagram (1)

Amplituda prijenosne funkcije

$$|T| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_1)^2}}$$

$$|T| = -20 \log \sqrt{1 + (\omega / \omega_1)^2}, \text{ dB}$$

$$\text{za } \omega \ll \omega_1 \quad |T| \approx -20 \log(1) = 0 \text{ dB}$$

$$\text{za } \omega = \omega_1 \quad |T| = -20 \log \sqrt{2} = -3 \text{ dB}$$

$$\text{za } \omega \gg \omega_1 \quad |T| \approx -20 \log(\omega / \omega_1), \text{ dB}$$

Faza prijenosne funkcije

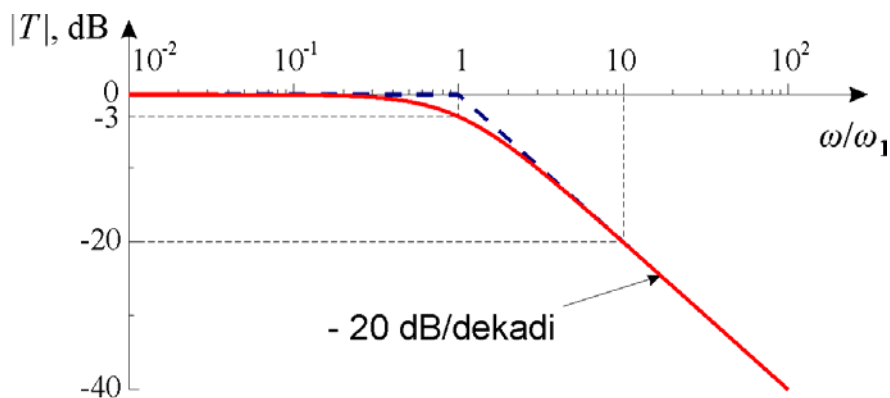
$$\phi = -\arctan(\omega / \omega_1)$$

$$\text{za } \omega \ll \omega_1 \quad \phi \approx 0^\circ$$

$$\text{za } \omega = \omega_1 \quad \phi = -45^\circ$$

$$\text{za } \omega \gg \omega_1 \quad \phi \approx -90^\circ$$

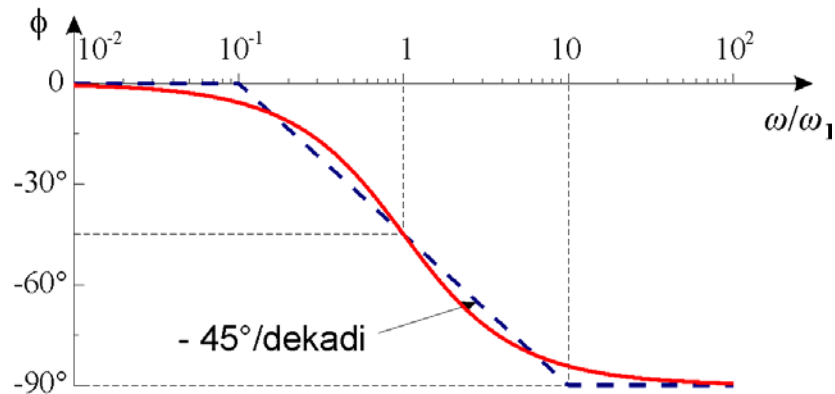
Frekvencijske karakteristike *RC*-mreže – Bodeov dijagram (2)



niskopropusni filter

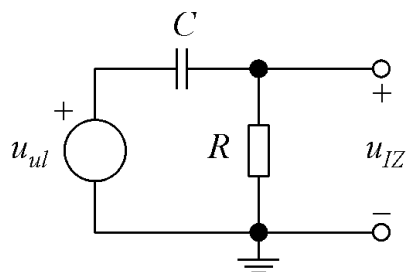
za frekvenciju $\omega = \omega_1$

$$|Z_c(\omega_1)| = \frac{1}{\omega_1 C} = R$$



$$\omega_g = \omega_1 = \frac{1}{RC}$$

Frekvencijska karakteristika *CR*-mreže



$$Z_C = 1/(j\omega C)$$

$$T = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{j\omega/\omega_1}{1 + j\omega/\omega_1}$$

$$u_{ul} = U_{ulm} \sin \omega t$$

$$\omega_1 = 1/(RC)$$

Frekvencijska karakteristika *CR*-mreže – Bodeov dijagram (1)

Amplituda prijenosne funkcije

$$|T| = \frac{\omega / \omega_1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_1)^2}}$$

$$|T| = 20 \log(\omega / \omega_1) - 20 \log \sqrt{1 + (\omega / \omega_1)^2}, \text{ dB}$$

$$\text{za } \omega \ll \omega_1 \quad |T| \approx 20 \log(\omega / \omega_1), \text{ dB}$$

$$\text{za } \omega = \omega_1 \quad |T| = -20 \log \sqrt{2} = -3 \text{ dB}$$

$$\text{za } \omega \gg \omega_1 \quad |T| \approx 0 \text{ dB}$$

Faza prijenosne funkcije

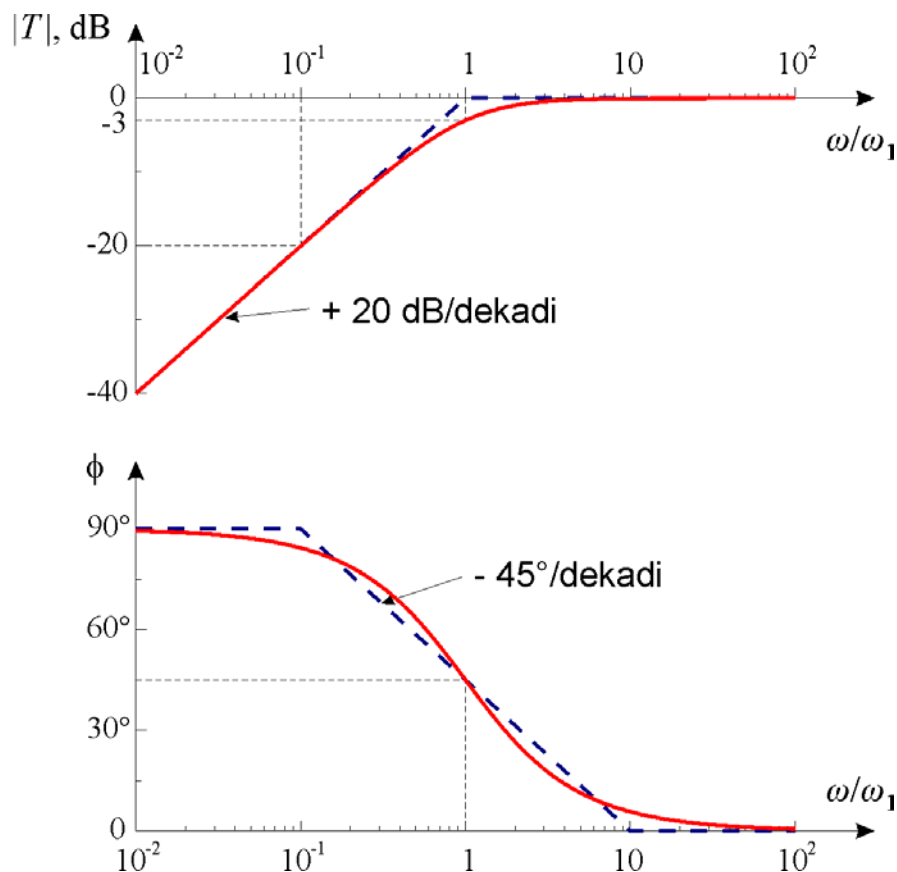
$$\phi = 90^\circ - \arctan(\omega / \omega_1)$$

$$\text{za } \omega \ll \omega_1 \quad \phi \approx 90^\circ$$

$$\text{za } \omega = \omega_1 \quad \phi = 45^\circ$$

$$\text{za } \omega \gg \omega_1 \quad \phi \approx 0^\circ$$

Frekvencijske karakteristike *CR*-mreže – Bodeov dijagram (2)



visokopropusni filter

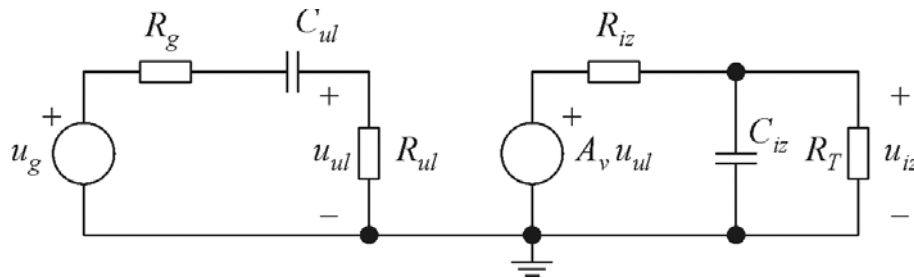
za frekvenciju $\omega = \omega_1$

$$|Z_c(\omega_1)| = \frac{1}{\omega_1 C} = R$$

$$\omega_d = \omega_1 = \frac{1}{RC}$$

Primjer 1.3 (1)

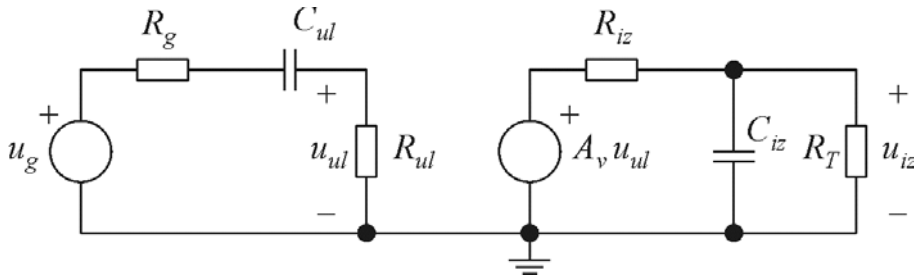
Odrediti frekvencijsku karakteristiku pojačanja $A_{VG} = U_{IZ}/U_g$ pojačala na slici. Ulazni napon $u_g = U_{gm} \sin \omega t$. Zadano je: $A_v = 100$, $R_{ul} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{iz} = 50 \text{ }\Omega$, $R_g = 100 \text{ }\Omega$, $R_T = 1 \text{ k}\Omega$, $C_{ul} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ i $C_{iz} = 10 \text{ pF}$. Nacrtati Bodeov dijagram amplitudne karakteristike pojačanja A_{VG} .



Rješenje:

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_{iz}} \parallel R_T = \frac{R_T}{1 + j\omega R_T C_{iz}}$$

Primjer 1.3 (2)



$$U_{iz} = A_v U_{ul} \frac{Z_2}{R_{iz} + Z_2} = A_v U_{ul} \frac{\frac{R_T}{1 + j\omega R_T C_{iz}}}{R_{iz} + \frac{R_T}{1 + j\omega R_T C_{iz}}}$$

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = A_v \frac{R_T}{R_{iz} + R_T} \frac{1}{1 + j\omega (R_{iz} \parallel R_T) C_{iz}}$$

$$\frac{U_{ul}}{U_g} = \frac{R_{ul}}{R_g + \frac{1}{j\omega C_{ul}} + R_{ul}} = \frac{j\omega R_{ul} C_{ul}}{1 + j\omega (R_g + R_{ul}) C_{ul}} = \frac{R_{ul}}{R_g + R_{ul}} \frac{j\omega (R_g + R_{ul}) C_{ul}}{1 + j\omega (R_g + R_{ul}) C_{ul}}$$

$$A_{vg} = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} \frac{U_{ul}}{U_g} = A_{vg0} \frac{j\omega / \omega_1}{(1 + j\omega / \omega_1)(1 + j\omega / \omega_2)}$$

Primjer 1.3 (3)

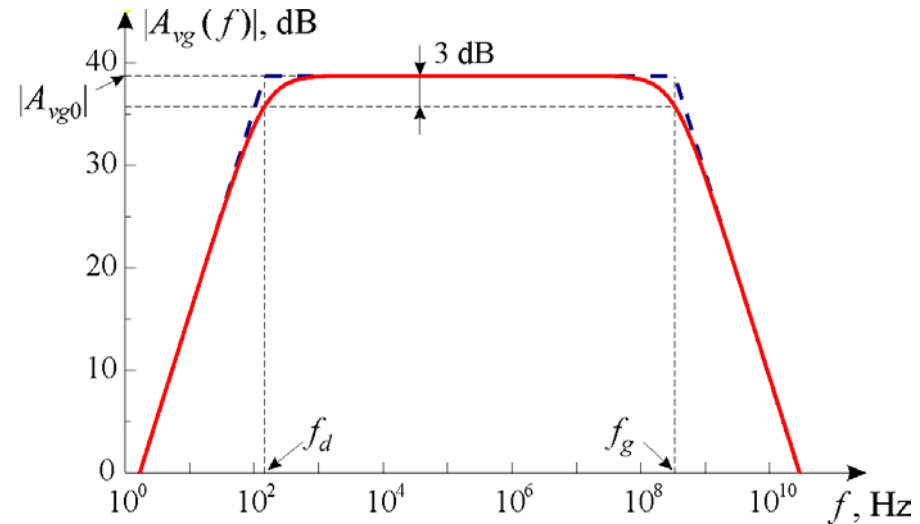
$$A_{vg0} = A_v \frac{R_T}{R_{iz} + R_T} \frac{R_{ul}}{R_g + R_{ul}} = 86,6 = 38,7 \text{ dB } \angle 0^\circ$$

$$\tau_1 = \frac{1}{\omega_1} = (R_g + R_{ul})C_{ul} = 1,1 \text{ ms}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 145 \text{ Hz} = f_d$$

$$\tau_2 = \frac{1}{\omega_2} = (R_{iz} \parallel R_T)C_{iz} = 476 \text{ ps}$$

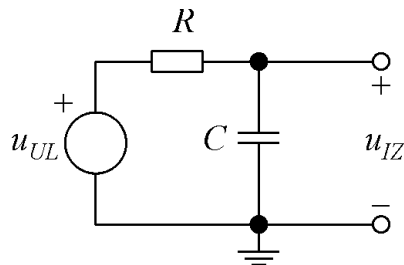
$$f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 334 \text{ MHz} = f_g$$



$$|A_{vg}| = A_{vg0} / \sqrt{2} = 61,2$$

$$|A_{vg}| = A_{vg0} - 3 \text{ dB} = 35,7 \text{ dB}$$

Odziv *RC*-mreže na skokovitu pobudu (1)



$$u_{UL}(t) = U_1 S(t)$$

Laplaceova transformacija

$$U_{ul}(s) = \frac{U_1}{s}$$

$$Z_C = 1/(s C)$$

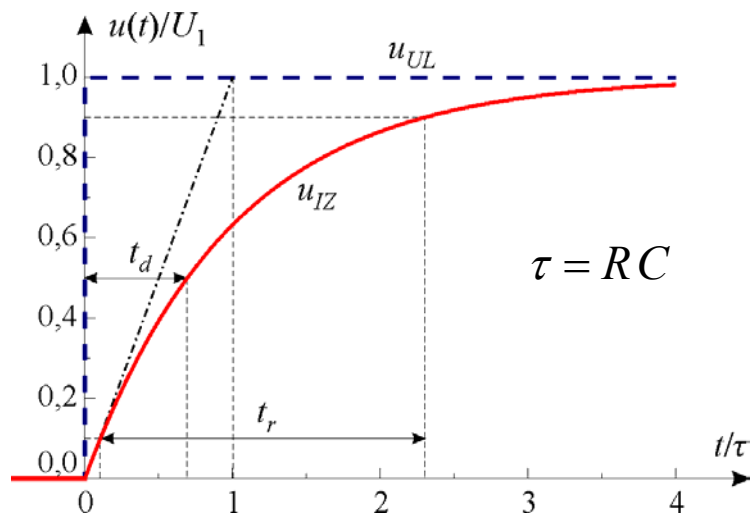
$$T(s) = \frac{U_{iz}(s)}{U_{ul}(s)} = \frac{\frac{1}{s C}}{R + \frac{1}{s C}} = \frac{1}{1 + s R C} = \frac{1}{1 + s \tau}$$

$$U_{iz}(s) = T(s)U_{ul}(s) = \frac{U_1}{s(1 + s \tau)}$$

inverzna Laplaceova transformacija

$$u_{IZ}(t) = U_1 [1 - \exp(-t / \tau)] S(t)$$

Odziv *RC*-mreže na skokovitu pobudu (2)



$$t = \tau \rightarrow u_{IZ} = 0,632 \cdot U_1$$

$$t = 5\tau \rightarrow u_{IZ} = 0,993 \cdot U_1$$

vrijeme porasta

$$u_{IZ} = 0,1U_1 \rightarrow t_{i0,1} = 0,1\tau$$

$$u_{IZ} = 0,9U_1 \rightarrow t_{i0,9} = 2,3\tau$$

$$t_r = t_{i0,9} - t_{i0,1} = 2,2\tau$$

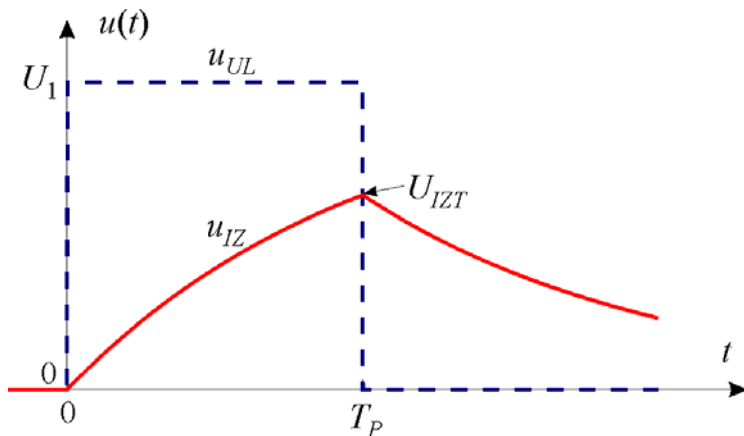
vrijeme kašnjenja

$$u_{UL} = 0,5U_1 \rightarrow t_{u0,5} = 0$$

$$u_{IZ} = 0,5U_1 \rightarrow t_{i0,5} = 0,69\tau$$

$$t_d = t_{i0,5} - t_{u0,5} = 0,69\tau$$

Odziv *RC*-mreže na pravokutni impuls (1)

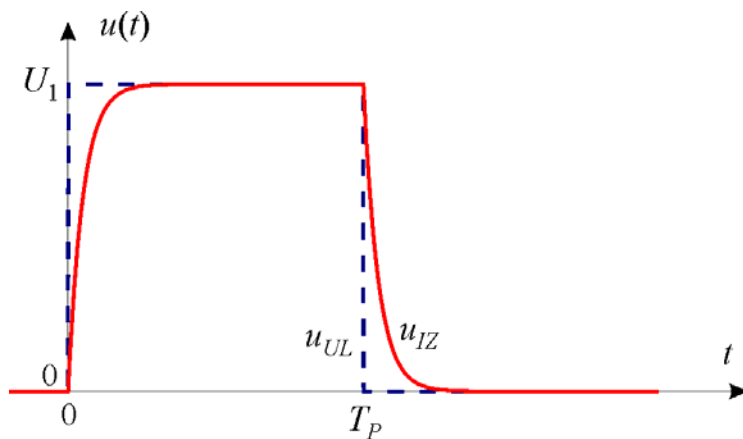


$$0 < t < T_P \quad u_{IZ}(t) = U_1 [1 - \exp(-t/\tau)]$$

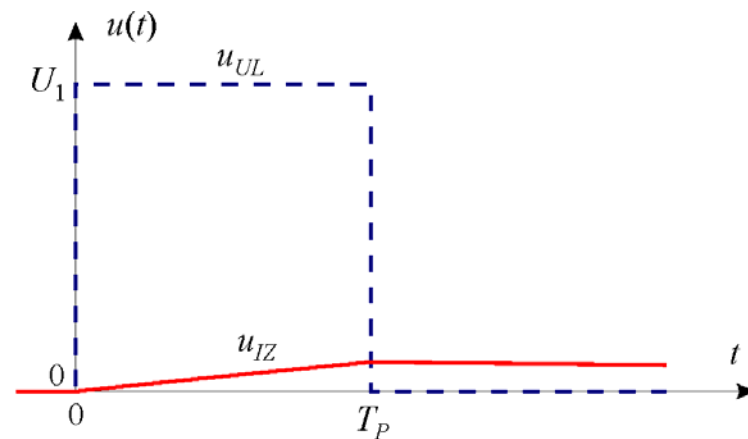
$$u_{IZ}(T_P) = U_1 [1 - \exp(-T_P/\tau)] = U_{IZT}$$

$$t > T_P \quad u_{IZ}(t) = U_{IZT} \exp[-(t - T_P)/\tau]$$

Odziv *RC*-mreže na pravokutni impuls (2)

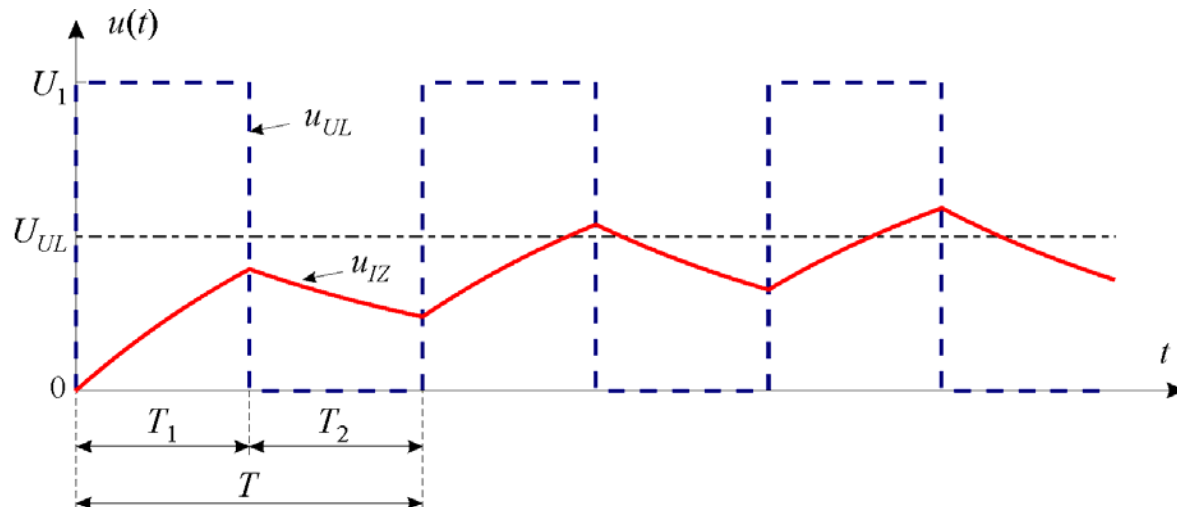


$$\tau \ll T_P$$



$$\tau \gg T_P$$

Odziv *RC*-mreže na pravokutni napon – prijelazna pojava



Primjer 1.4 (1)

Na RC -mrežu s otporom $R = 1 \text{ k}\Omega$ i kapacitetom $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ priključen je ulazni simetrični pravokutni napon visoke razine $U_1 = 5 \text{ V}$ i frekvencije $f = 1 \text{ kHz}$. Istosmjerna komponenta ulaznog pravokutnog napona $U_{UL} = 2,5 \text{ V}$. Odrediti valni oblik izlaznog napona mreže u prijelaznom stanju za prve dvije periode ulaznog napona.

Rješenje:

$$T = 1/f = 1/10^3 = 1 \text{ ms} \quad T_1 = T_2 = T/2 = 0,5 \text{ ms} \quad \tau = RC = 10^3 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ ms}$$

$$0 < t < T/2 \quad u_{IZ}(t) = U_1 [1 - \exp(-t/\tau)]$$

$$t = T/2 = t_1 = 0,5 \text{ ms} \quad u_{IZ}(t_1) = 5 \cdot [1 - \exp(-1/2)] = 1,97 \text{ V}$$

Primjer 1.4 (2)

$$T/2 < t < T \quad u_{IZ}(t) = u_{IZ}(t_1) \exp[-(t - t_1)/\tau]$$

$$t = T = t_2 = 1 \text{ ms} \quad u_{IZ}(t_2) = 1,97 \cdot \exp(-1/2) = 1,19 \text{ V}$$

$$T < t < 3T/2 \quad u_{IZ}(t) = U_1 + [u_{IZ}(t_2) - U_1] \exp[-(t - t_2)/\tau]$$

$$t = 3T/2 = t_3 = 1,5 \text{ ms} \quad u_{IZ}(t_3) = 5 + (1,19 - 5) \cdot \exp(-1/2) = 2,69 \text{ V}$$

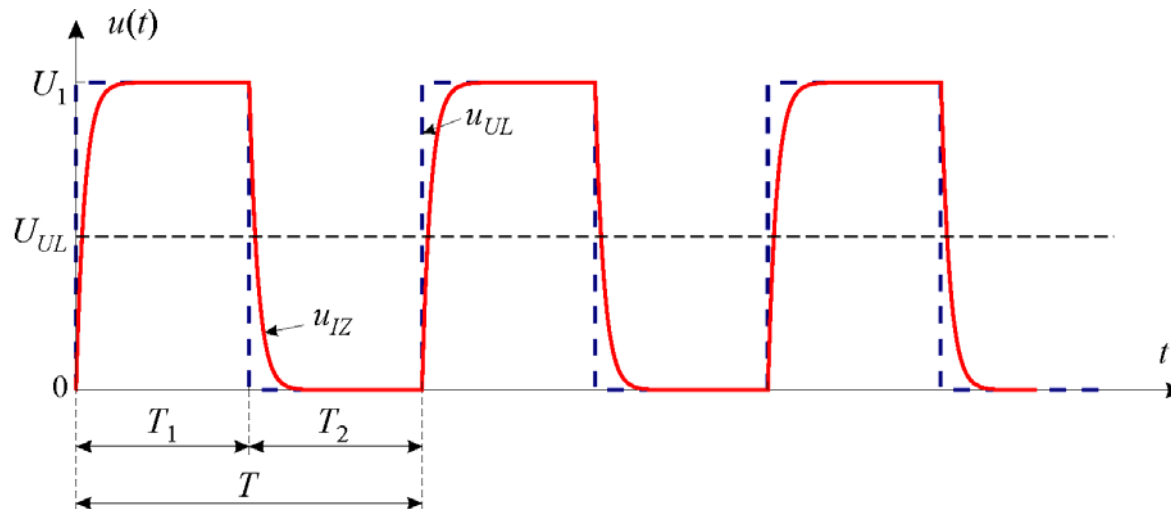
$$3T/2 < t < 2T \quad u_{IZ}(t) = u_{IZ}(t_3) \exp[-(t - t_3)/\tau]$$

$$t = 2T = t_4 = 2 \text{ ms} \quad u_{IZ}(t_4) = 2,69 \cdot \exp(-1/2) = 1,63 \text{ V}$$

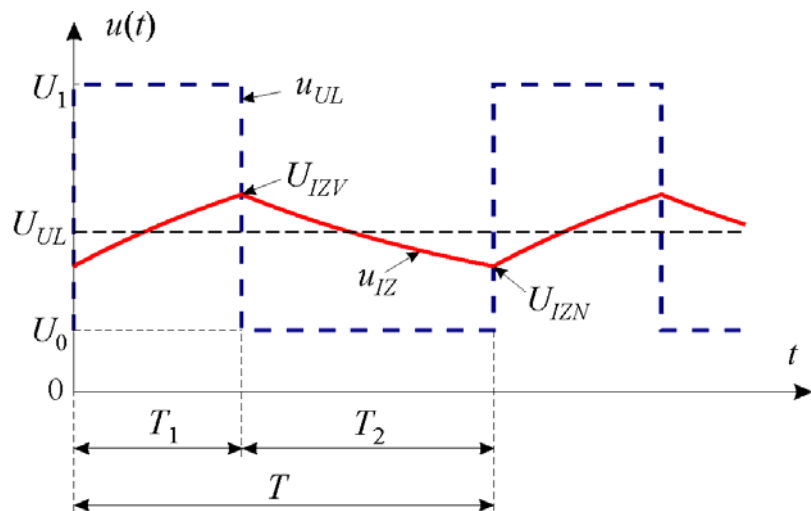
$$u_{IZ}(t_3) > u_{IZ}(t_1) \quad u_{IZ}(t_4) > u_{IZ}(t_2) \quad - \text{izlazni napon postupno raste}$$

Odziv *RC*-mreže na pravokutni napon – poseban slučaj

za $\tau \ll T$



Odziv *RC*-mreže na pravokutni napon – stacionarno stanje



$$U_{UL} = \frac{U_1 T_1 + U_0 T_2}{T}$$

$$0 < t < T_1$$

$$u_{IZ}(t) = U_1 + (U_{IZN} - U_1) \exp(-t/\tau)$$

$$T_1 < t < T_1 + T_2$$

$$u_{IZ}(t) = U_0 + (U_{IZV} - U_0) \exp[-(t - T_1)/\tau]$$

$$t = T_1$$

$$U_{IZV} = U_1 + (U_{IZN} - U_1) \exp(-T_1/\tau)$$

$$t = T_1 + T_2$$

$$U_{IZN} = U_0 + (U_{IZV} - U_0) \exp(-T_2/\tau)$$

Primjer 1.5

Na RC -mrežu vremenske konstante $\tau = 2,5$ ms priključen je ulazni pravokutni napon s visokom razinom $U_1 = 5$ V, niskom razinom $U_0 = 1$ V, trajanjem visoke razine $T_1 = 1$ ms i trajanjem niske razine $T_2 = 1,5$ ms. Izračunati istosmjernu komponentu i vršne vrijednosti izlaznog napona u stacionarnom stanju.

Rješenje:

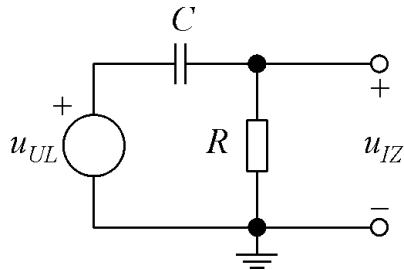
$$U_{IZ} = (U_1 T_1 + U_0 T_2) / T = (5 \cdot 1 + 1 \cdot 1,5) / 2,5 = 2,6 \text{ V}$$

$$U_{IZV} = 5 + (U_{IZN} - 5) \exp(-1 / 2,5) = 1,648 + 0,670 \cdot U_{IZN}$$

$$U_{IZN} = 1 + (U_{IZV} - 1) \exp(-1,5 / 2,5) = 0,451 + 0,549 \cdot U_{IZV}$$

$$U_{IZV} = 3,09 \text{ V} \quad U_{IZN} = 2,15 \text{ V}$$

Odziv *CR*-mreže na skokovitu pobudu (1)

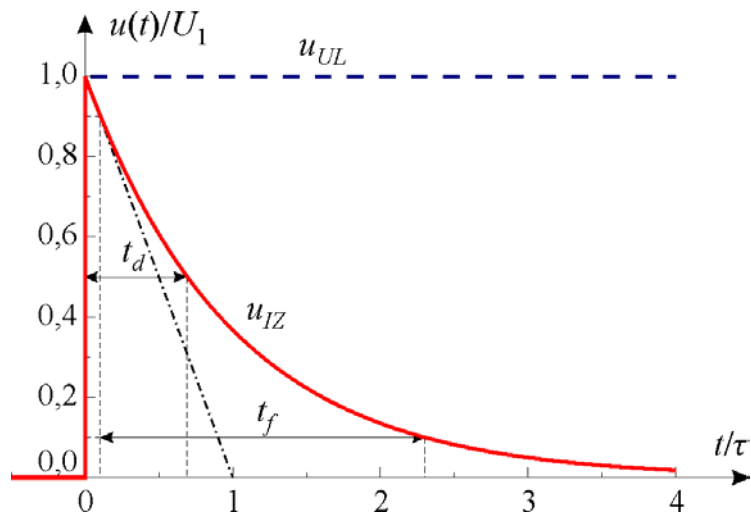


$$u_{IZ} = u_R = u_{UL} - u_C$$

$$u_C(t) = U_1 [1 - \exp(-t/\tau)]S(t)$$

$$u_{IZ}(t) = U_1 \exp(-t/\tau)S(t)$$

Odziv CR-mreže na skokovitu pobudu (2)



$$t = \tau \rightarrow u_{IZ} = 0,368 \cdot U_1 \quad \tau = RC$$

$$t = 5\tau \rightarrow u_{IZ} = 0,007 \cdot U_1$$

vrijeme pada

$$u_{IZ} = 0,9U_1 \rightarrow t_{i0,9} = 0,1\tau$$

$$u_{IZ} = 0,1U_1 \rightarrow t_{i0,1} = 2,3\tau$$

$$t_f = t_{i0,1} - t_{i0,9} = 2,2\tau$$

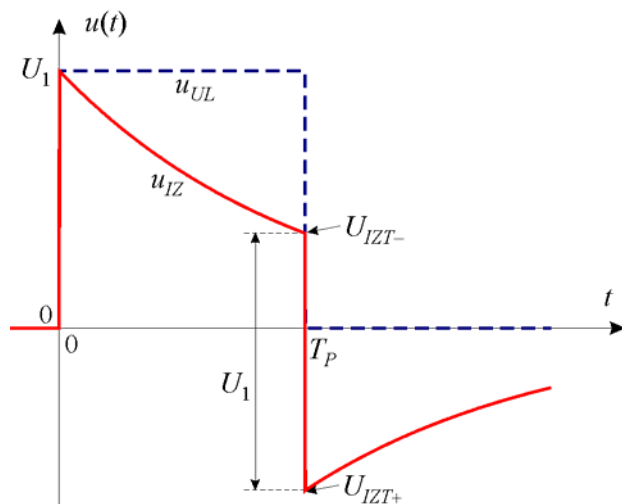
vrijeme kašnjenja

$$u_{UL} = 0,5U_1 \rightarrow t_{u0,5} = 0$$

$$u_{IZ} = 0,5U_1 \rightarrow t_{i0,5} = 0,69\tau$$

$$t_d = t_{i0,5} - t_{u0,5} = 0,69\tau$$

Odziv **CR**-mreže na pravokutni impuls (1)



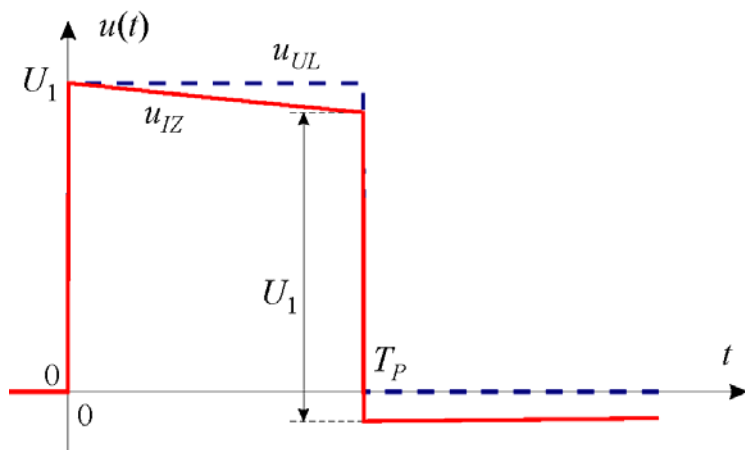
$$0 < t < T_P \quad u_{IZ}(t) = U_1 \exp(-t/\tau)$$

$$u_{IZ}(T_{P-}) = U_1 \exp(-T_P/\tau) = U_{IZT-}$$

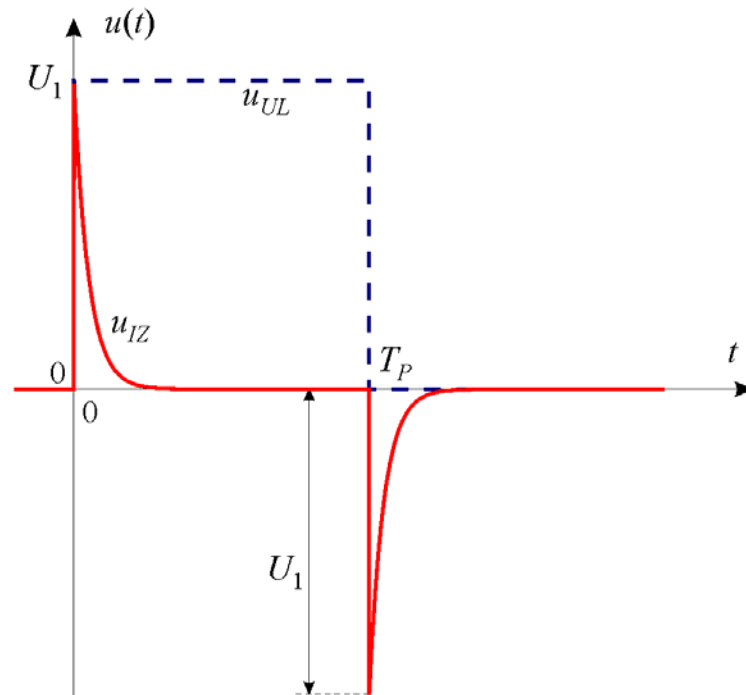
$$u_{IZ}(T_{P+}) = U_{IZT-} - U_1 = U_{IZT+}$$

$$t > T_P \quad u_{IZ}(t) = U_{IZT+} \exp[-(t - T_P)/\tau]$$

Odziv *CR*-mreže na pravokutni impuls (2)

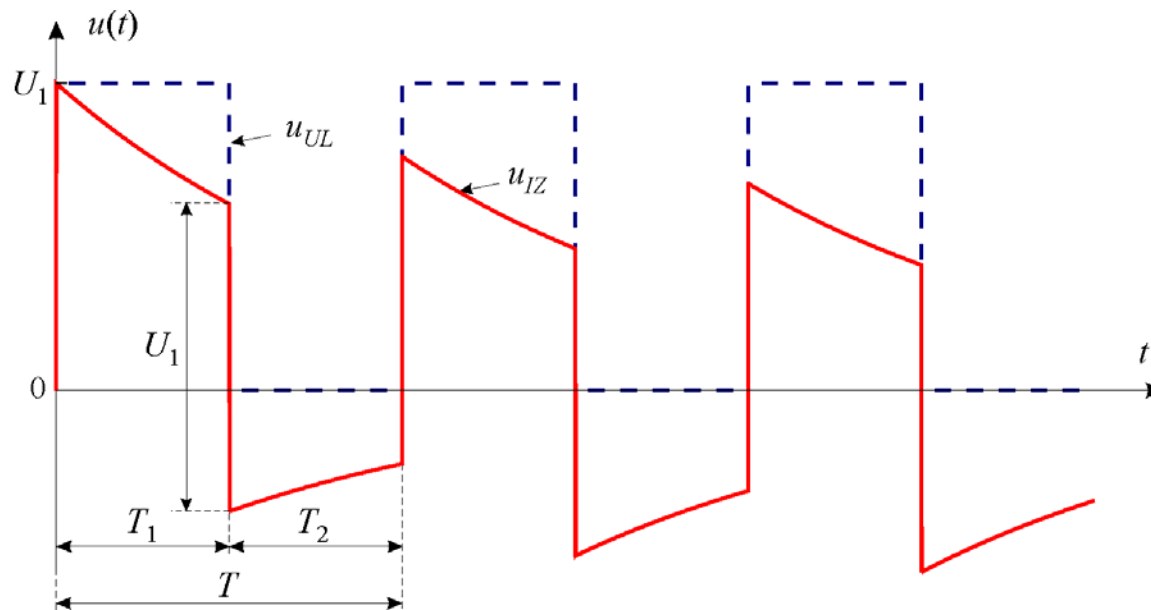


$$\tau \gg T_P$$



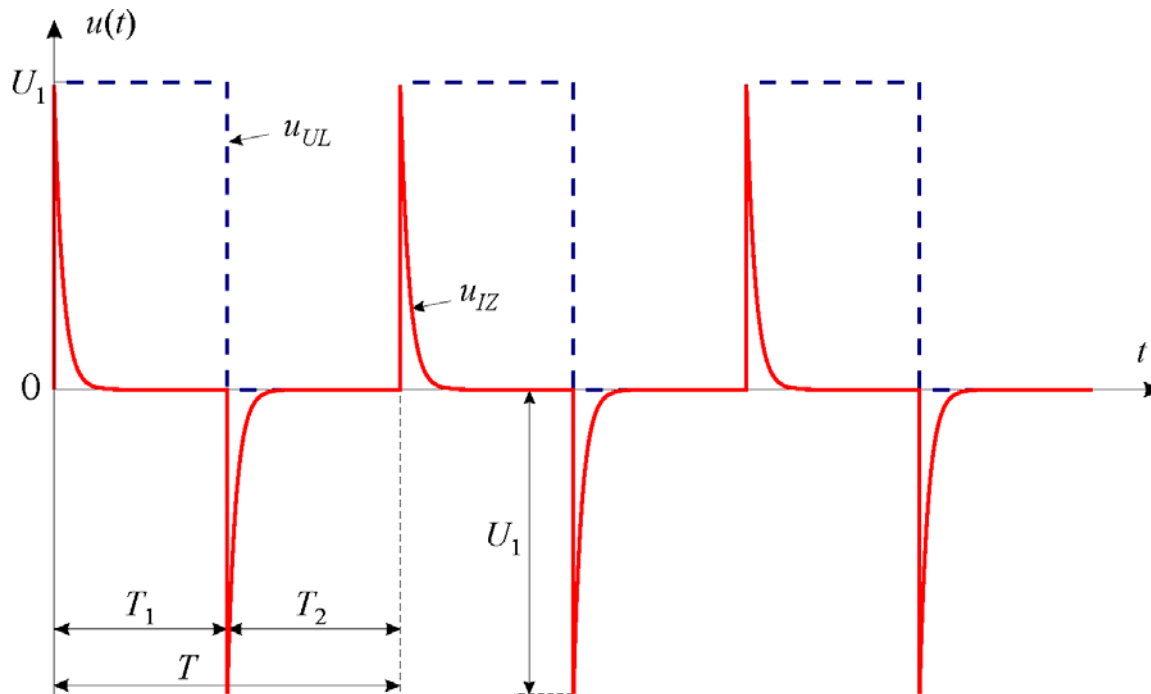
$$\tau \ll T_P$$

Odziv *CR*-mreže na pravokutni napon – prijelazna pojava

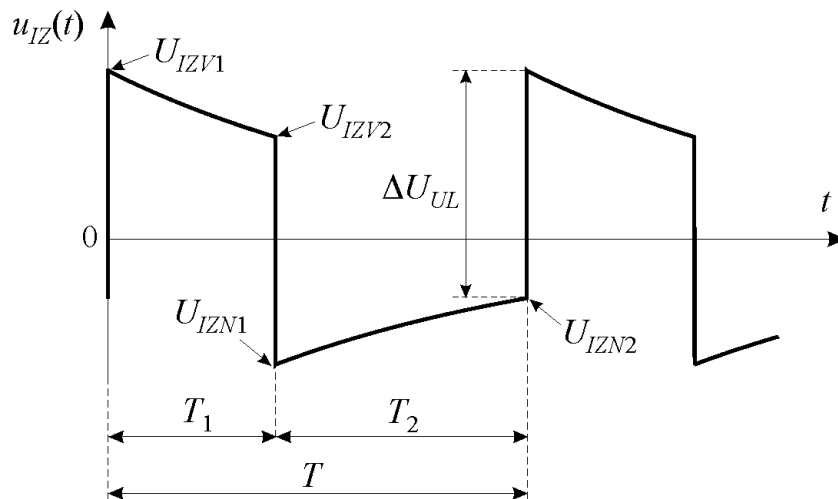


Odziv *CR*-mreže na pravokutni napon – poseban slučaj

za $\tau \ll T$



Odziv *CR*-mreže na pravokutni napon – stacionarno stanje



$$U_{IZV2} = U_{IZV1} \exp(-T_1 / \tau)$$

$$U_{IZN2} = U_{IZN1} \exp(-T_2 / \tau)$$

$$U_{IZV1} - U_{IZN2} = \Delta U_{UL}$$

$$U_{IZV2} - U_{IZN1} = \Delta U_{UL}$$

Primjer 1.6

Na CR -mrežu vremenske konstante $\tau = 2 \text{ ms}$ priključen je ulazni simetrični pravokutni napon frekvencije $f = 500 \text{ Hz}$ s visokom razinom $U_1 = 5 \text{ V}$ i niskom razinom $U_0 = 0$. Izračunati rubne vrijednosti izlaznog napona u stacionarnom stanju.

Rješenje:

$$T_1 = T_2 = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = \frac{1}{2 \cdot 500} = 1 \text{ ms} \quad \Delta U_{UL} = U_1 - U_0 = 5 \text{ V}$$

izlazni napon je simetričan $U_{IZV1} = -U_{IZN1}$ $U_{IZV2} = -U_{IZN2}$

$$U_{IZV2} = U_{IZV1} \exp(-T/2\tau) = -U_{IZN2} = \Delta U_{UL} - U_{IZV1}$$

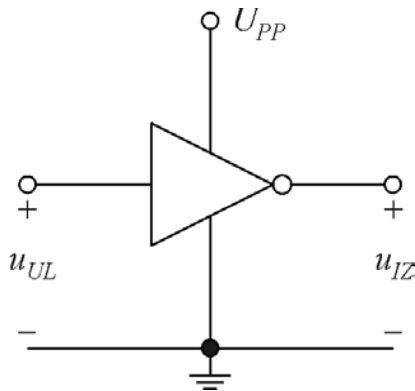
$$U_{IZV1} = \frac{\Delta U_{UL}}{1 + \exp(-T/2\tau)} = \frac{5}{1 + \exp(-1/2)} = 3,11 \text{ V} = -U_{IZN1}$$

$$U_{IZV2} = U_{IZV1} \exp(-T/2\tau) = 3,11 \cdot \exp(-1/2) = 1,89 \text{ V} = -U_{IZN2}$$

Invertor

Invertor

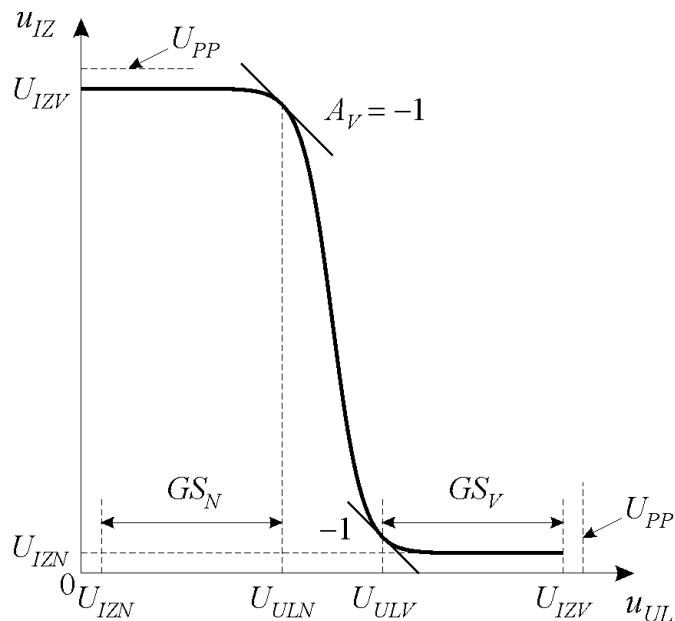
logička funkcija – invertiranje signala



u_{UL} i u_{IZ} - digitalni signali

visoka razina napona – logička 1
niska razina napona – logička 0

Prijenosna karakteristika invertora – granice smetnji



primjena invertora – u područjima
zasićenja izlaznog napona

niska razina napona – U_{IZN}

niska razina napona – U_{IZV}

početak promjene izlaznog napona –

$$A_V = \partial u_{IZ} / \partial u_{UL} = -1$$

dozvoljena smetnja – $u_{UL} < U_{ULN}$

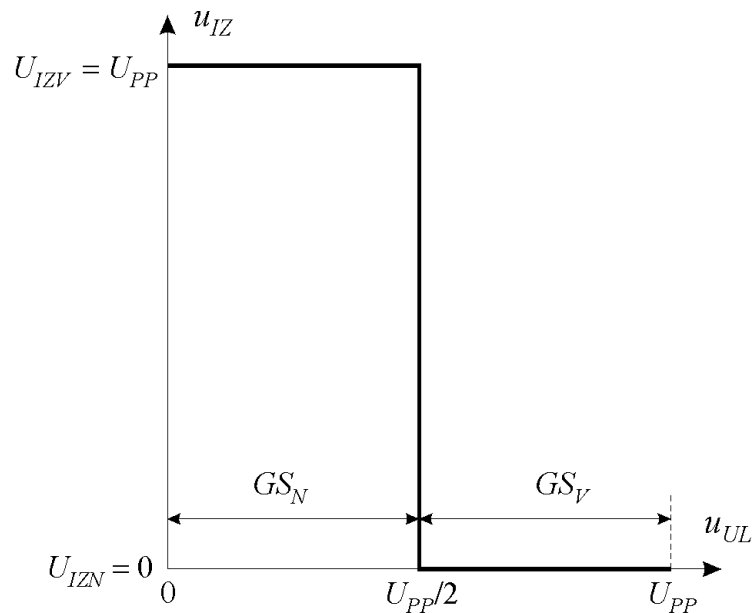
$$u_{UL} > U_{ULV}$$

granice smetnji

❑ za nisku razinu ulaznog napona – $GS_N = U_{ULN} - U_{IZN}$

❑ za visoku razinu ulaznog napona – $GS_V = U_{IZV} - U_{ULV}$

Prijenosna karakteristika idealnog invertora



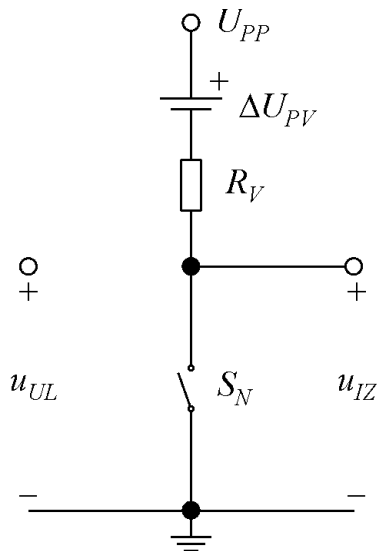
$$U_{IZV} = U_{PP}$$

$$U_{IZN} = 0 \text{ V}$$

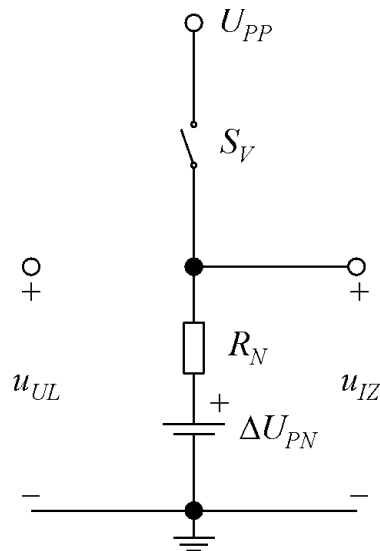
$$U_{ULN} = U_{ULV} = U_{PP} / 2$$

$$GS_N = GS_V = U_{PP} / 2$$

Model invertora



za ulazni napon logičke 0



za ulazni napon logičke 1

R_V, R_N – nadomjesni
otpori uključenih sklopki

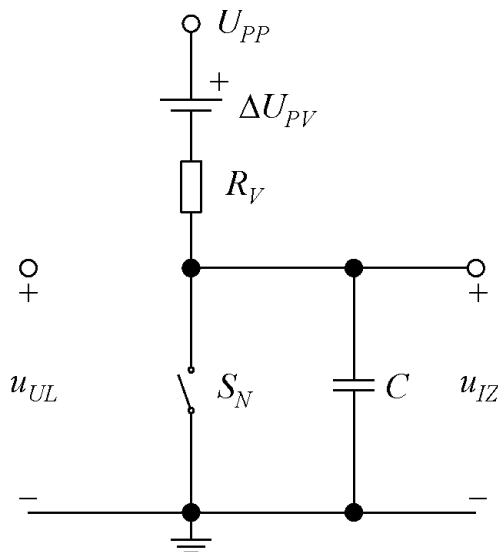
naponi pomaka:
visoke razine –

$$\Delta U_{PV} = U_{PP} - U_{IZV}$$

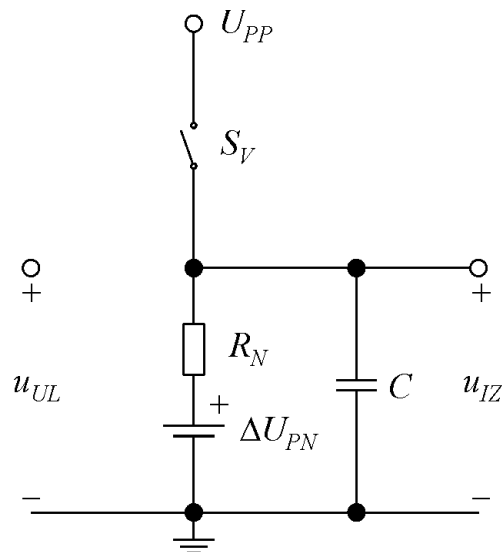
niske razine –

$$\Delta U_{PN} = U_{IZN}$$

Model invertora s kapacitivnim opterećenjem



za ulazni napon logičke 0



za ulazni napon logičke 1

- ❑ Prijelaz iz niske u visoku razinu – kapacitet C nabija se preko R_V
- ❑ Prijelaz iz visoke u nisku razinu – kapacitet C izbija se preko R_N

Primjer 1.7 (1)

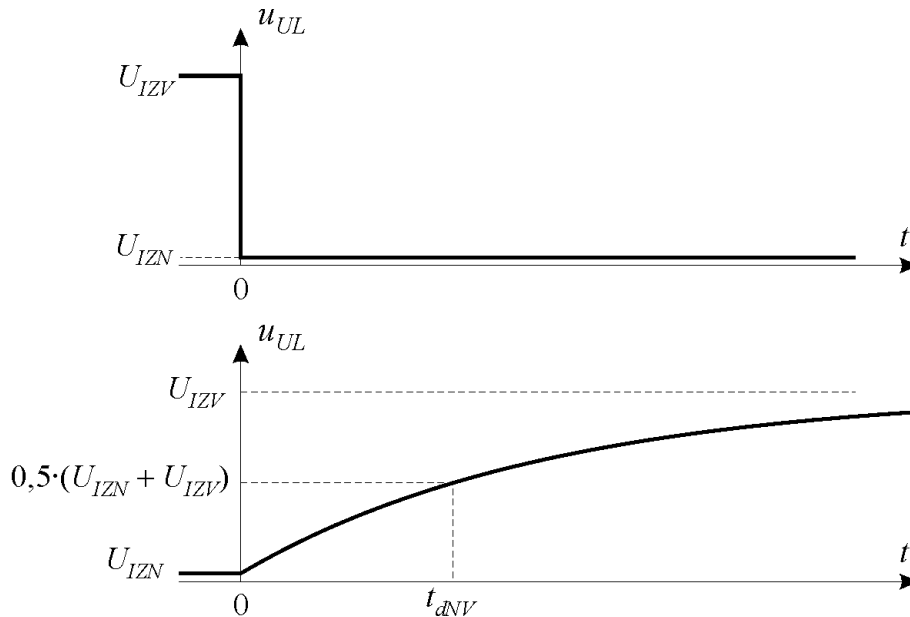
Invertor, spojen na napon napajanja $U_{PP} = 2,5 \text{ V}$, kapacitivno je opterećen s $C = 10 \text{ fF}$. Naponi pomaka visoke i niske razine invertora su $\Delta U_{PV} = \Delta U_{PN} = 0,1 \text{ V}$, a nadomjesni otpori uključenih sklopki $R_V = R_N = 1 \text{ k}\Omega$. Ulazni napon invertora skokovito se mijenja s visoke u nisku razinu. Izračunati vrijeme kašnjenja izlaznog napona invertora.

Rješenje:

$$U_{IZV} = U_{PP} - \Delta U_{PV} = 2,5 - 0,1 = 2,4 \text{ V}$$

$$U_{IZN} = \Delta U_{PN} = 0,1 \text{ V}$$

Primjer 1.7 (2)



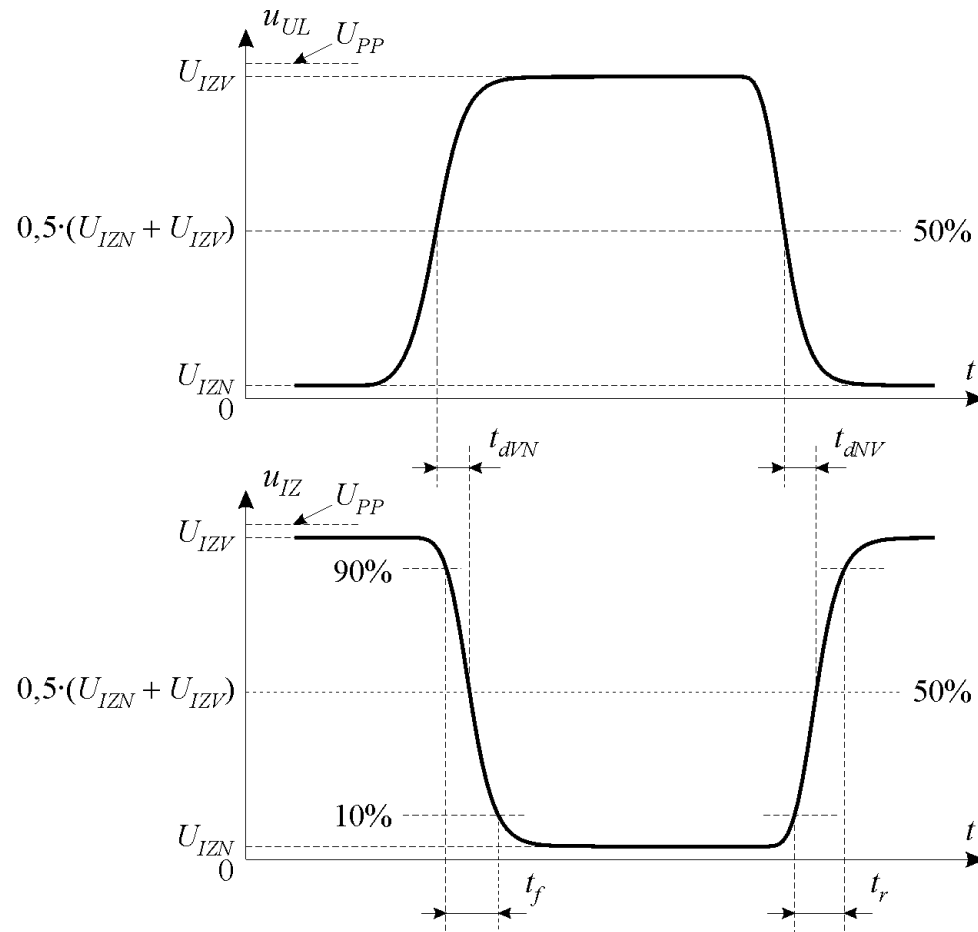
$$u_{IZ}(t) = U_{IZV} + (U_{IZN} - U_{IZV}) \exp(-t/\tau)$$

$$\tau = R_V C = 10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-15} = 100 \text{ ps}$$

$$\begin{aligned} u_{IZ}(t_{dNV}) &= \frac{U_{IZN} + U_{IZV}}{2} = \\ &= U_{IZV} + (U_{IZN} - U_{IZV}) \exp(-t_{dNV}/\tau) \end{aligned}$$

$$t_{dNV} = \ln(2) \cdot \tau = 0,69 \cdot 100 = 69 \text{ ps}$$

Vremena kašnjenja, porasta i pada realnog invertora



$$t_d = \frac{t_{dVN} + t_{dNV}}{2}$$