

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

# **Elektronika 1**

Ž. Butković, J. Divković Pukšec, A. Barić

## **1. Uvod u elektroniku**

# Električki signal

---

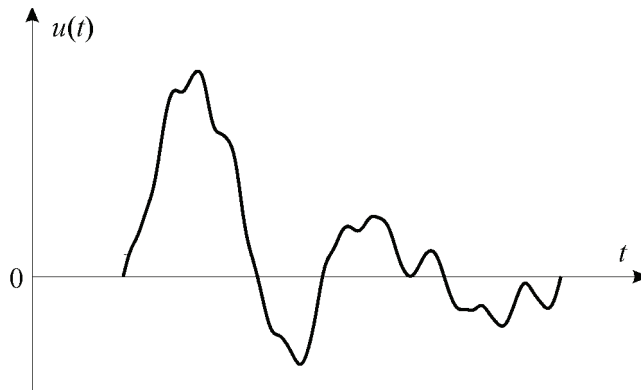
Temeljna uloga elektronike – obrada informacija.

**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



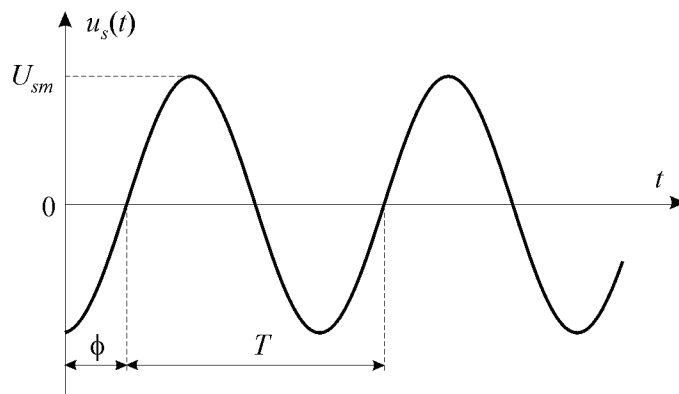
Frekvencijski spektar – ovisnost signala o frekvenciji

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  $U_s = U_{sm}/\sqrt{2}$

$\omega$  – kružna frekvencija

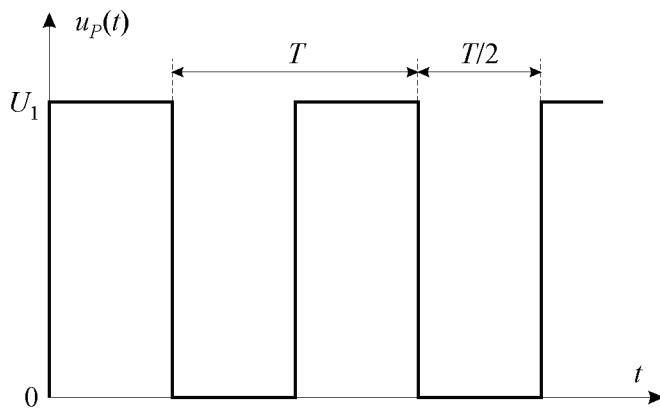
$f$  – frekvencija  $\omega = 2\pi f$

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

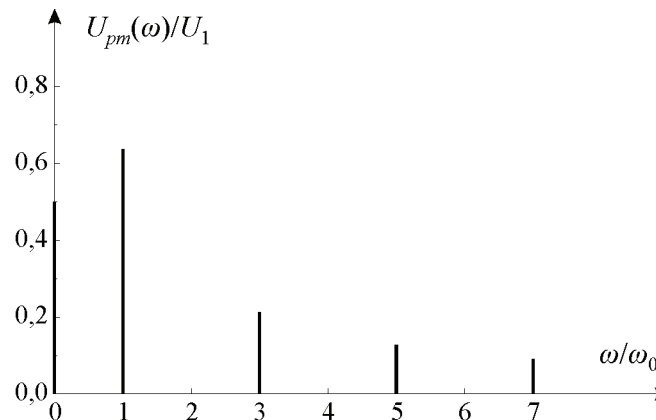
$T$  – perioda  $T = 1/f$

# Primjer – pravokutni signal

Vremenski prikaz



Frekvencijski spektar



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

$U_1/2 = U_P$  – istosmjerna komponenta

$\omega_0 = 2\pi/T$  – osnovna frekvencija       $n\omega_0$  – viši harmonici

# Vrste signala

---

## Analogni signali

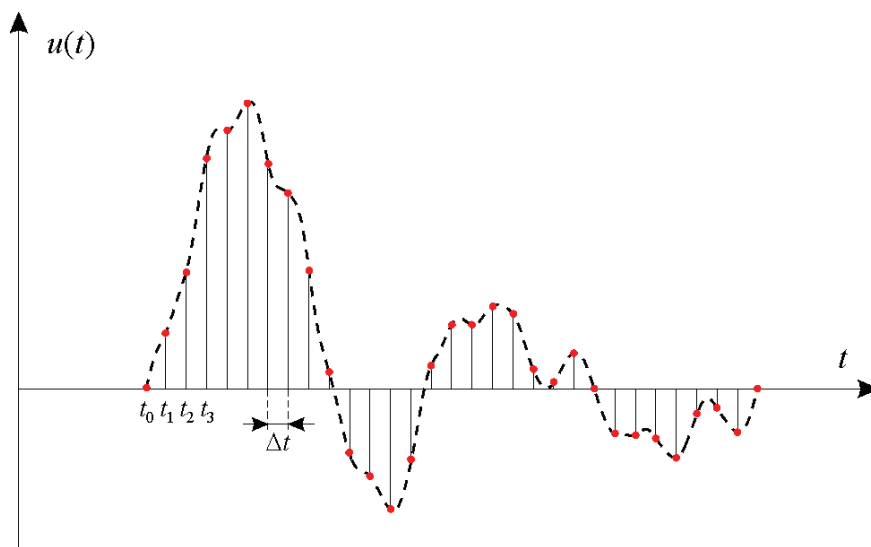
- ☐ prirodni signali, analogni fizikalnoj informaciji
- ☐ amplituda poprima sve vrijednosti (kontinuirana)
- ☐ kontinuirano se mijenja u vremenu
- ☐ obrađuju se analognim sklopovima

## 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  $\Delta t$  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

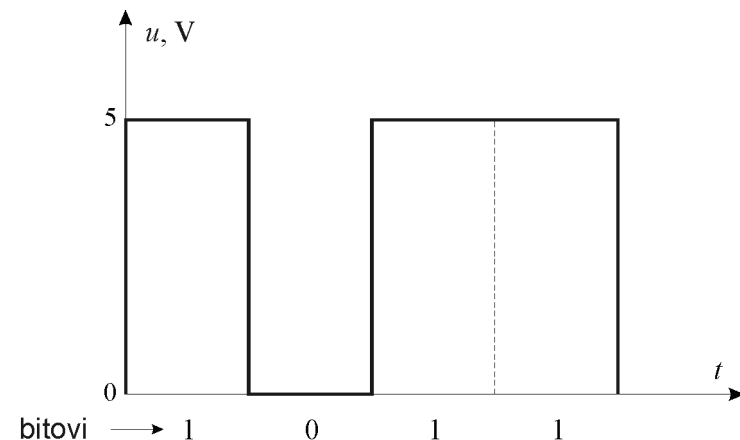


# Binarni broj u digitalnim sklopovima

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

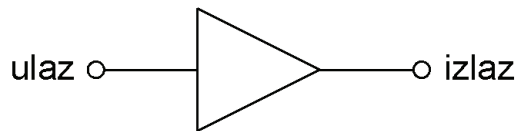
## Digitalna obrada signala

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

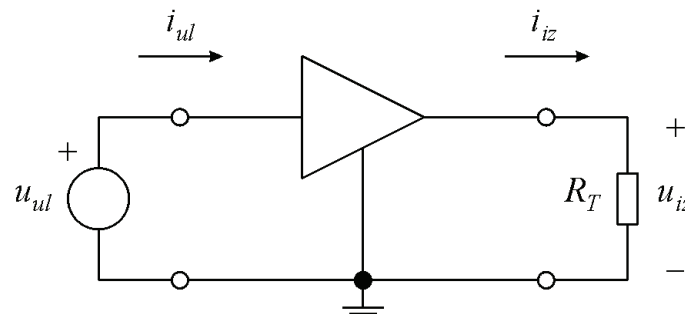
# Pojačalo

## 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

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

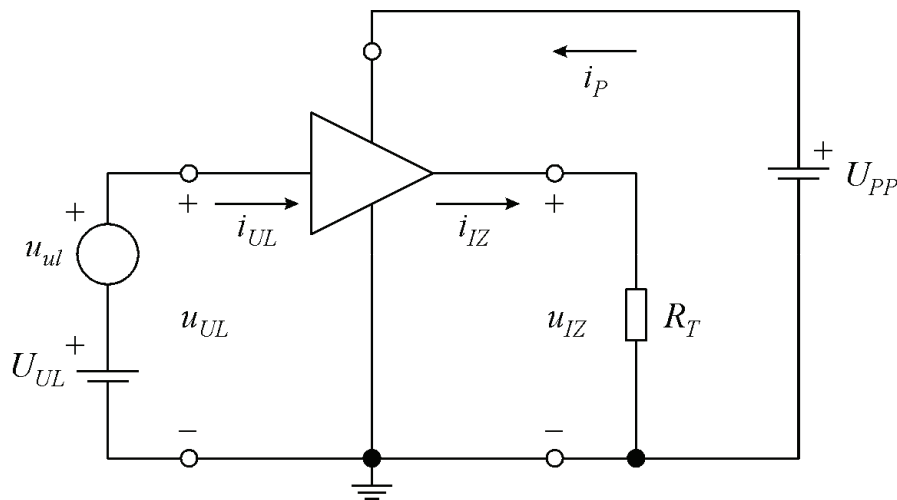
pojačanje snage

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

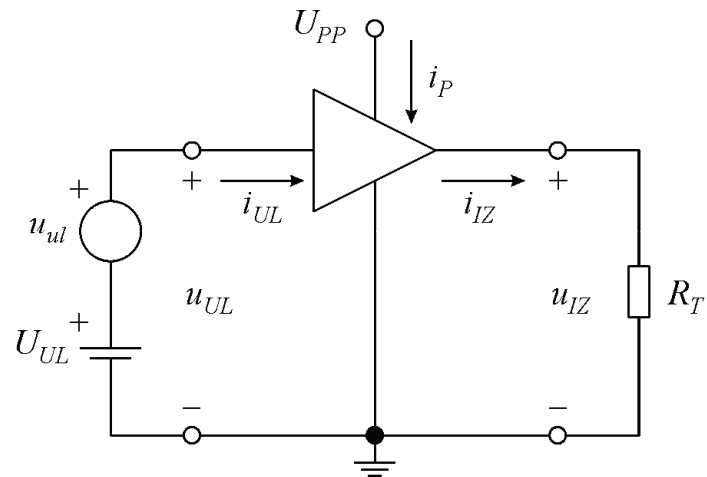
# Napajanje

Pojačalo se priključuje na istosmjerni izvor napajanja

Povećanje snage signala na trošilu - korištenjem snage izvora napajanja



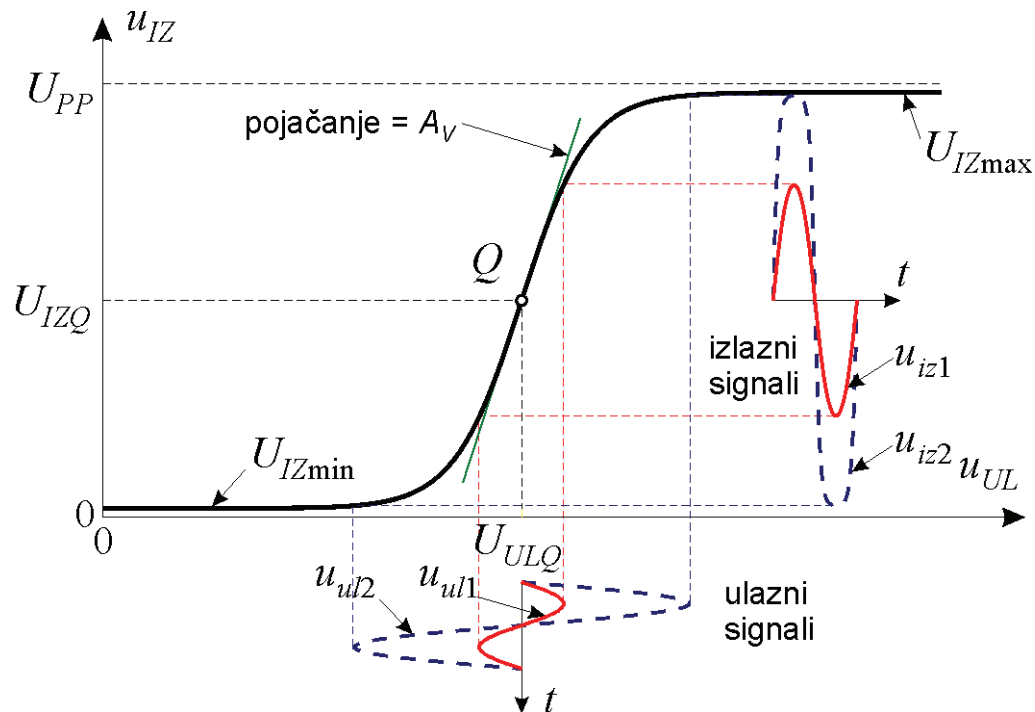
prikaz s istosmjernim  
naponskim izvorom



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

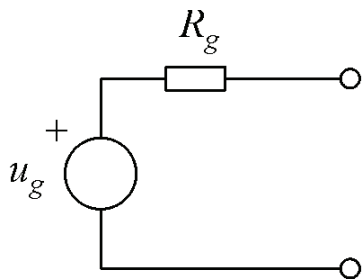
---

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

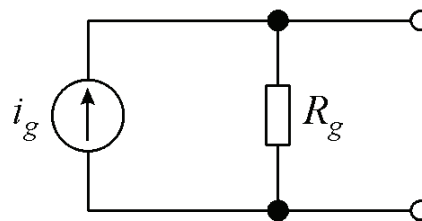


# Modeliranje pojačala – izvori signala

Realni izvori signala imaju konačni unutarnji otpor  $R_g$



naponski izvor

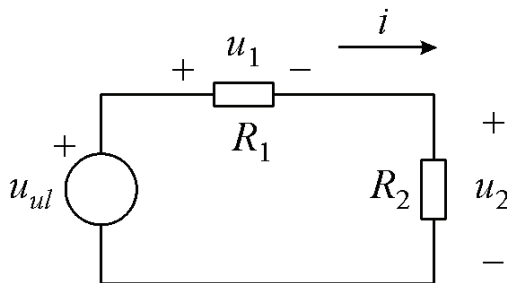


strujni izvor

Izvori su međusobno povezani  $\rightarrow u_g = i_g R_g$

# Modeliranje pojačala – naponsko djelilo

Napon se dijeli na serijskoj kombinaciji otpora



$$u_{ul} = u_1 + u_2$$

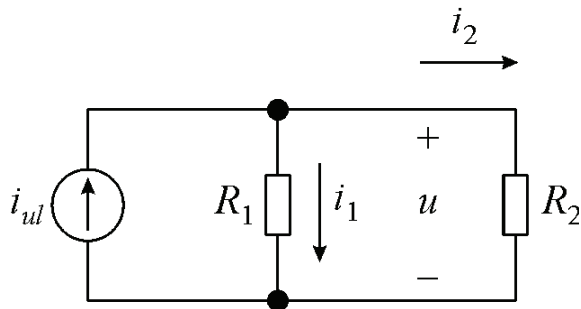
$$i = \frac{u_{ul}}{R_1 + R_2}$$

$$u_1 = R_1 i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{ul}$$

$$u_2 = R_2 i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{ul}$$

# Modeliranje pojačala – strujno djelilo

Struja se dijeli na paralelnoj kombinaciji otpora



$$i_{ul} = i_1 + i_2$$

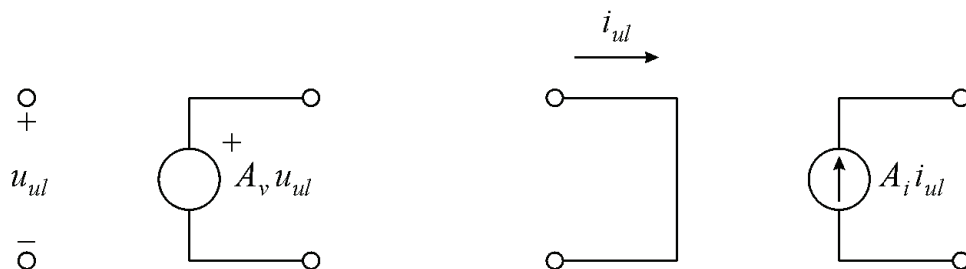
$$u = (R_1 \parallel R_2) i_{ul} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i_{ul}$$

$$i_1 = \frac{u}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_{ul}$$

$$i_2 = \frac{u}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_{ul}$$

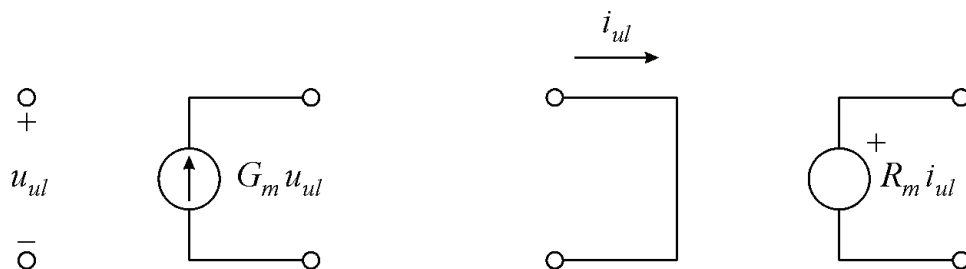
# Modeliranje pojačala – ovisni izvori

Naponi ili struje ovisnih izvora upravljani su naponom ili strujom nekog drugog elementa mreže.



naponski ovisan  
naponski izvor

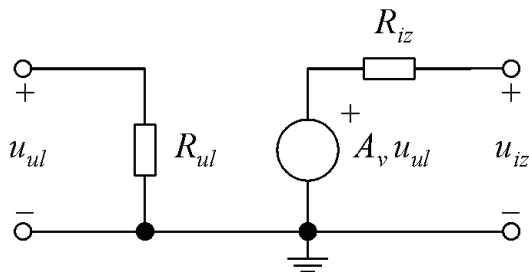
strujno ovisan  
strujni izvor



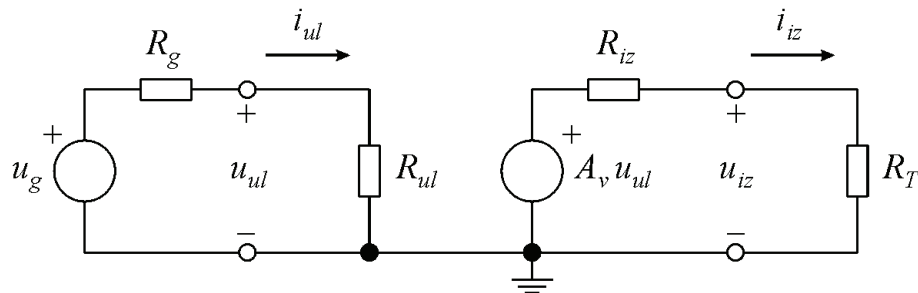
naponski ovisan  
strujni izvor

strujno ovisan  
naponski izvor

# 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

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

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

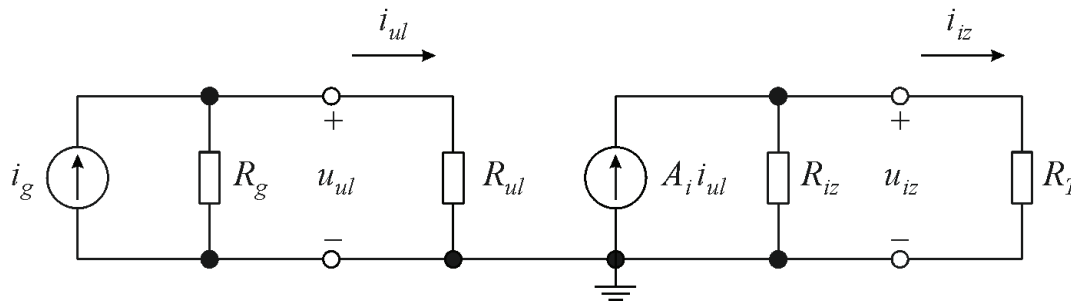
$$A_P = \frac{p_{iz}}{p_{ul}} = A_V A_I = A_V^2 \frac{R_{ul}}{R_T} = A_I^2 \frac{R_T}{R_{ul}}$$

# Primjer 1.2

---

Izlazni napon naponskog pojačala smanji se za 25% kada se na njegov izlaz priključi trošilo od  $1\text{ k}\Omega$ . Koliki je izlazni otpor pojačala?

# Strujno pojačalo



## Strujno pojačanje

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

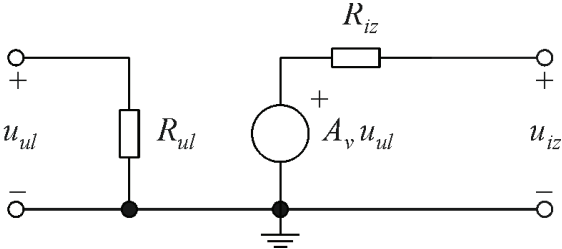
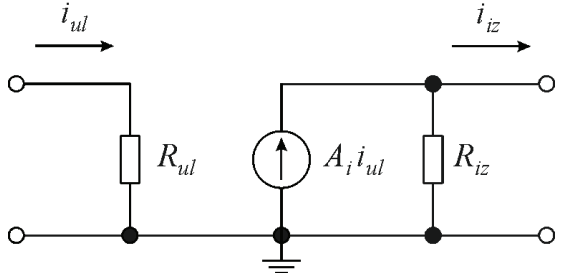
$$A_{Ig} = \frac{i_{iz}}{i_g} = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \frac{i_{ul}}{i_g} = A_i \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_T} \frac{R_g}{R_g + R_{ul}}$$

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

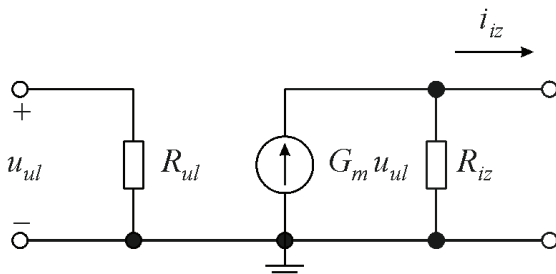
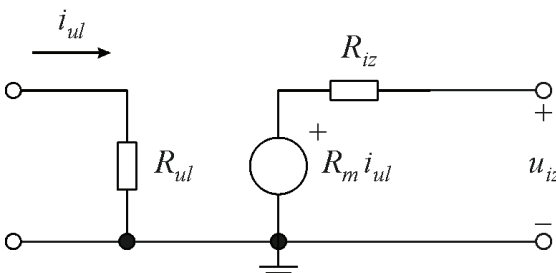
Naponsko pojačanje  $A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{i_{iz} R_T}{i_{ul} R_{ul}} = A_I \frac{R_T}{R_{ul}}$



# 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

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

# Primjer 1.3

---

Naponsko pojačanje nekog pojačala je 35 dB. Koliki je apsolutni iznos naponskog pojačanja tog pojačala?

# Frekvencijska karakteristika

**Frekvencijski odziv** – odziv pojačala na sinusne signale različitih frekvencija

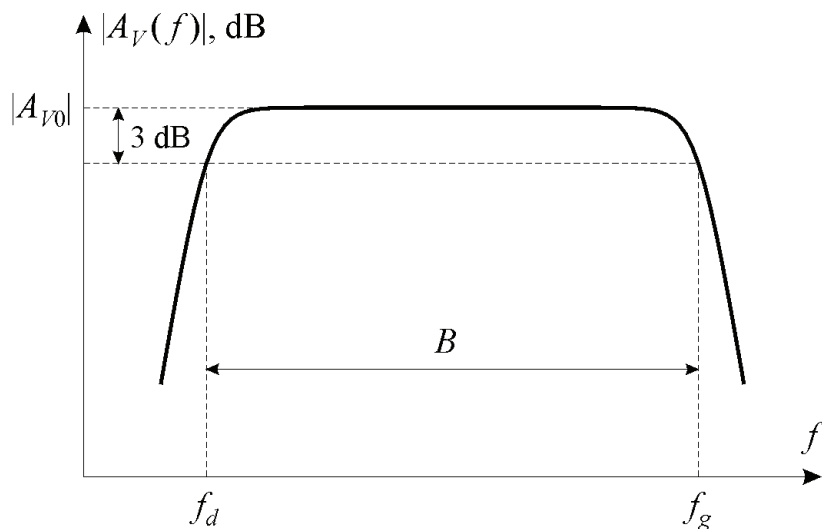
Uz linearni rad pojačala

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

**Frekvencijska karakteristika** – za svaku frekvenciju  $f$  određuje se amplituda i faza naponskog pojačanja

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

# Amplitudna frekvencijska karakteristika pojačala



granične frekvencije – pad pojačanja na

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

$f_d$  – donja granična frekvencija

$f_g$  – gornja granična frekvencija

$f_d < f < f_g$  – područje srednjih frekvencija

$f < f_d$  – područje niskih frekvencija

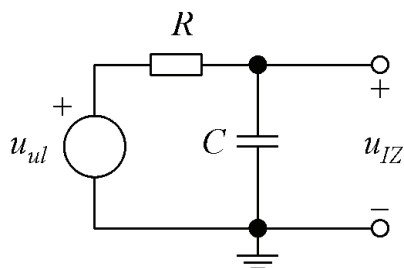
$f > f_g$  – područje visokih frekvencija

$B = f_g - f_d$  – 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

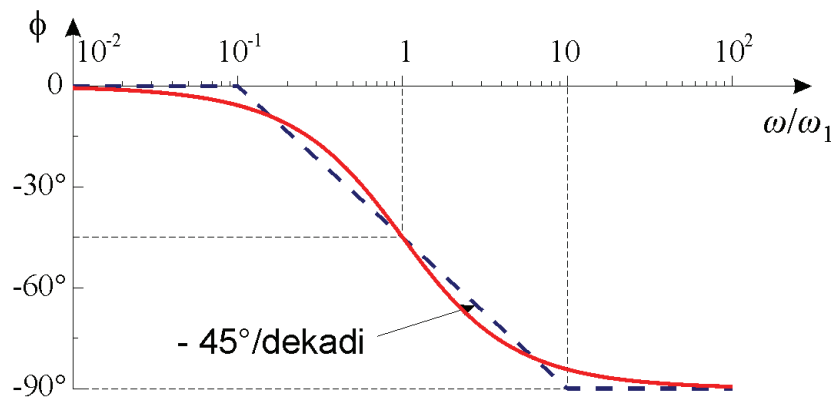
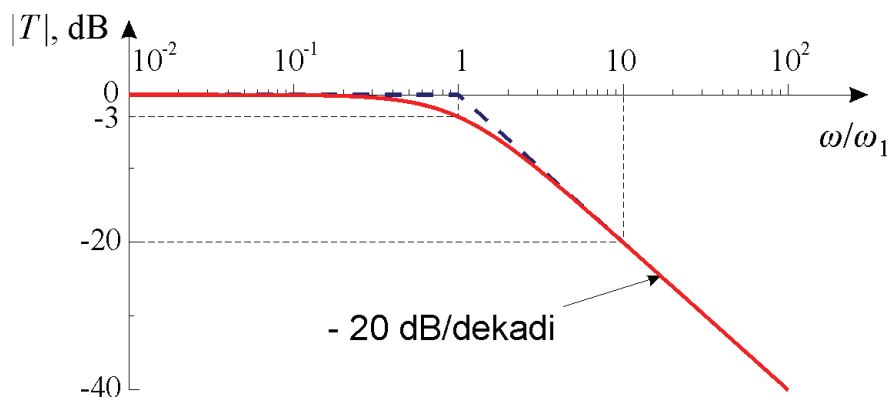
Crta se:

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

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



# Frekvencijske karakteristike RC-mreže – Bodeov dijagram



niskopropusni filter

**Amplituda** prijenosne funkcije

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

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

**Faza** prijenosne funkcije

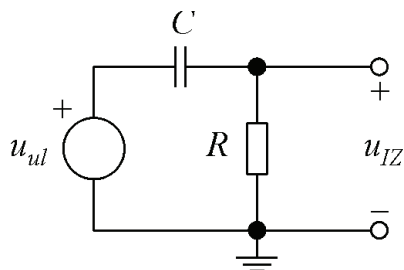
$$\phi = -\arctg (\omega / \omega_1)$$

za frekvenciju  $\omega = \omega_1$

$$|Z_c(\omega_1)| = 1/(\omega_1 C) = R$$

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

# Frekvencijska karakteristika CR-mreže



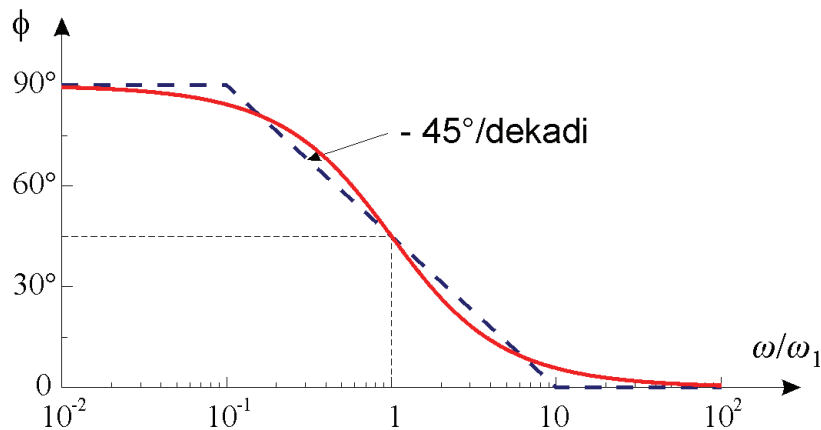
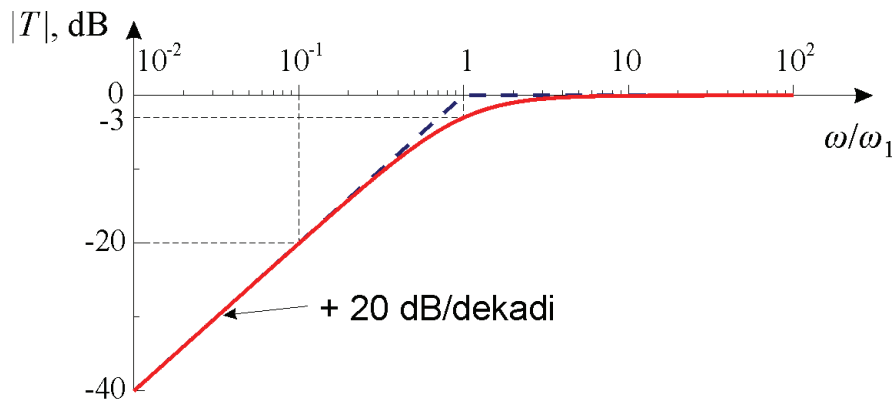
$$Z_C = 1/(j\omega C)$$

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

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

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

# Frekvencijske karakteristike CR-mreže – Bodeov dijagram



visokopropusni filter

Amplituda prijenosne funkcije

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

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

Faza prijenosne funkcije

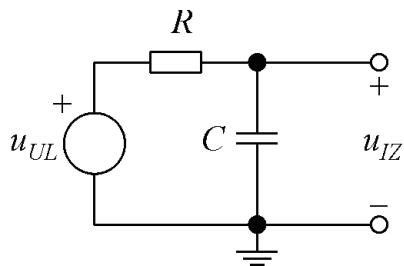
$$\phi = 90^\circ - \arctan(\omega / \omega_1)$$

za frekvenciju  $\omega = \omega_1$

$$|Z_c(\omega_1)| = 1/(\omega_1 C) = R$$

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

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



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

Laplaceova transformacija

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

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

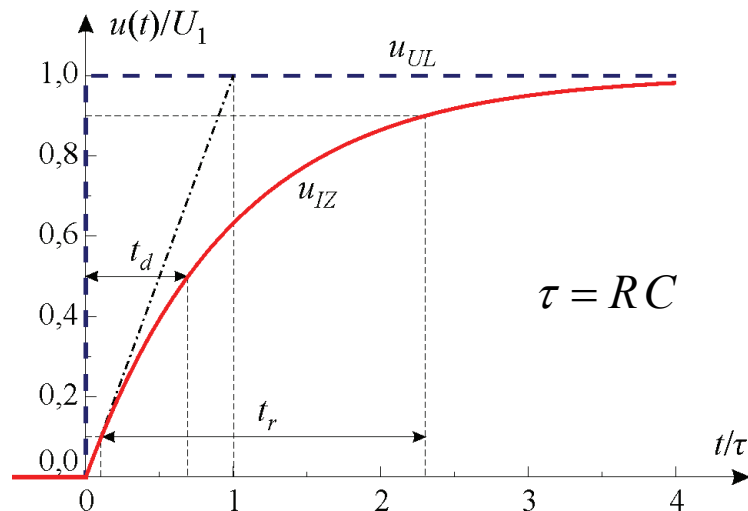
$$T(s) = \frac{U_{iz}(s)}{U_{ul}(s)} = \frac{\frac{1}{s C}}{R + \frac{1}{s C}} = \frac{1}{1 + s R C} = \frac{1}{1 + s \tau}$$

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

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

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

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

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

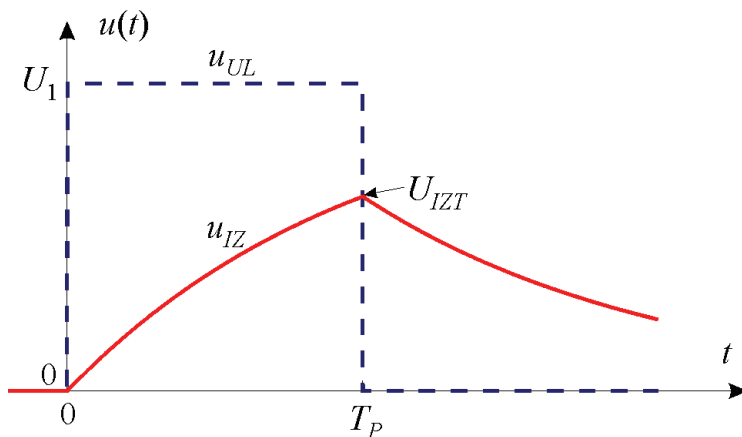
opći oblik napona na kapacitetu

$$u_{IZ}(t) = u_C(t) = U_{CP} + (U_{CK} - U_{CP})[1 - \exp(-t/\tau)]S(t)$$

$U_{CP} \rightarrow$  početni napon

$U_{CK} \rightarrow$  konačni napon

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

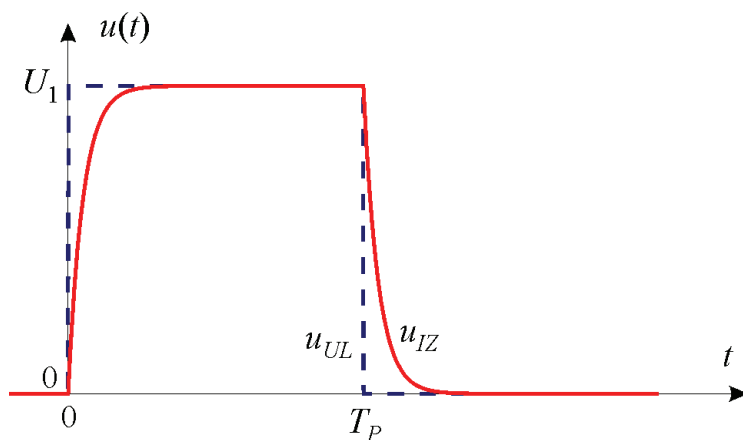


$$0 < t < T_P \quad u_{IZ}(t) = U_1 [1 - \exp(-t/\tau)]$$

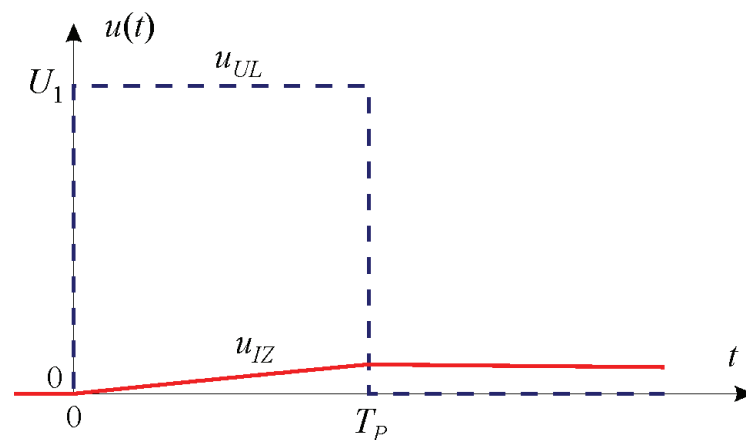
$$u_{IZ}(T_P) = U_1 [1 - \exp(-T_P/\tau)] = U_{IZT}$$

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

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



$$\tau \ll T_P$$



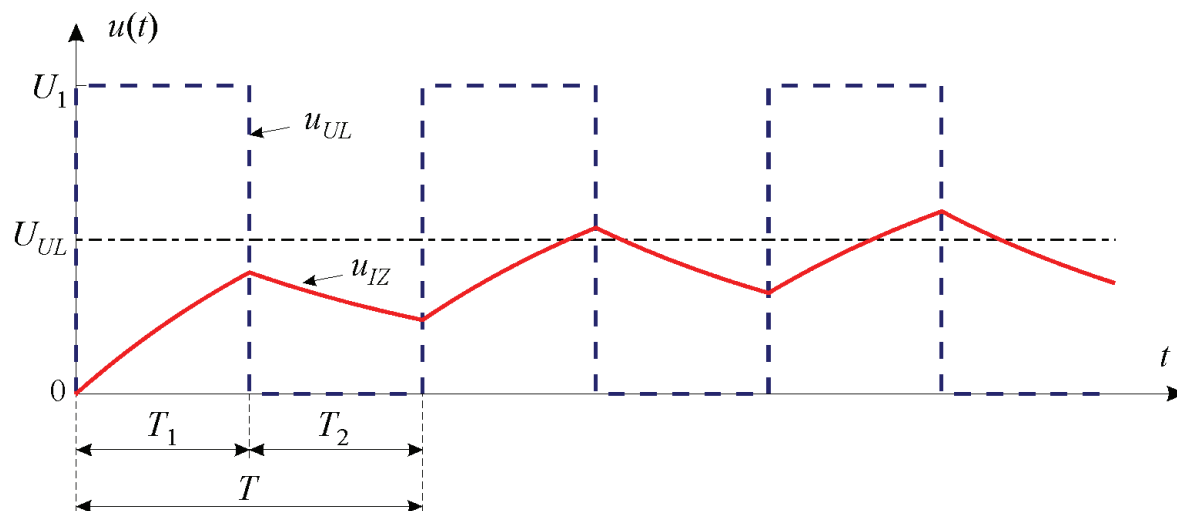
$$\tau \gg T_P$$

gornja granična frekvencija  $\rightarrow \omega_g = 1/(RC) = 1/\tau$

za  $\omega_g \gg 1/T_P \rightarrow$  veći dio spektra u području srednjih frekvencija – mala izobličenja

za  $\omega_g \ll 1/T_P \rightarrow$  veći dio spektra u području visokih frekvencija – izobličenja

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





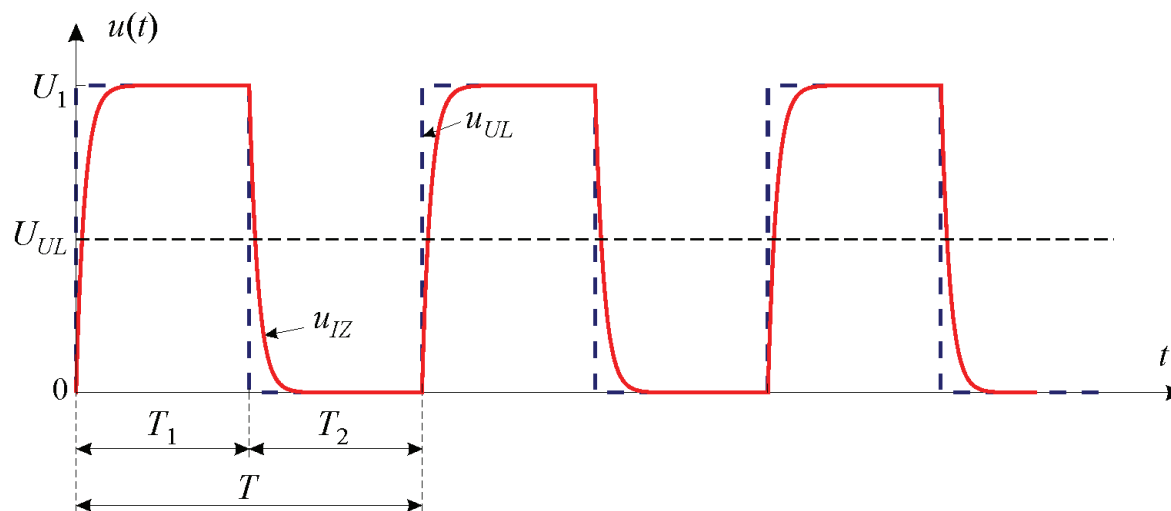
# Primjer 1.4

---

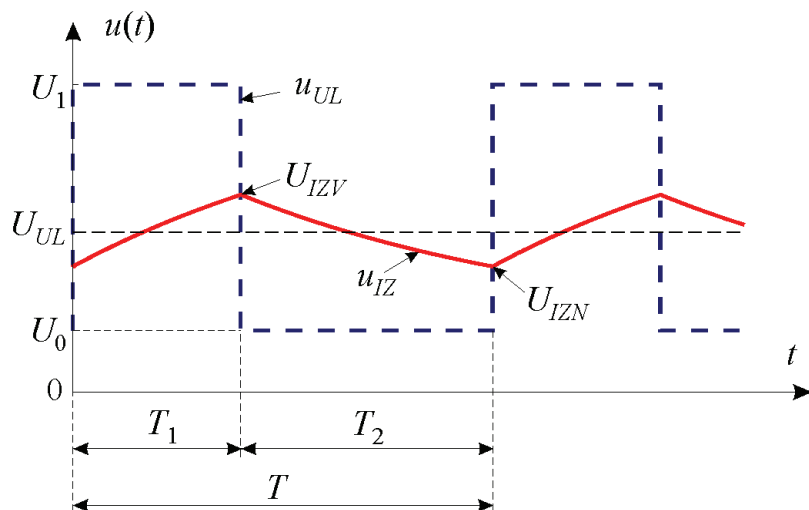
Na  $RC$ -mrežu s otporom  $R = 1 \text{ k}\Omega$  i kapacitetom  $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$  priključen je ulazni simetrični pravokutni napon visoke razine  $U_1 = 5 \text{ V}$  i frekvencije  $f = 1 \text{ kHz}$ . Istosmjerna komponenta ulaznog pravokutnog napona  $U_{UL} = 2,5 \text{ V}$ .  
Odrediti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

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

za  $\tau \ll T$



# Odziv RC-mreže na pravokutni napon – stacionarno stanje



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

$$0 < t < T_1$$

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

$$T_1 < t < T_1 + T_2$$

$$u_{IZ}(t) = U_{IZV} + (U_0 - U_{IZV}) \{1 - \exp[-(t - T_1)/\tau]\}$$

$$\begin{aligned} t = T_1 \quad U_{IZV} &= U_{IZN} + (U_1 - U_{IZN}) [1 - \exp(-T_1/\tau)] = \\ &= U_1 + (U_{IZN} - U_1) \exp(-T_1/\tau) \end{aligned}$$

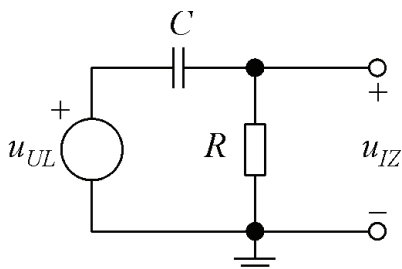
$$\begin{aligned} t = T_1 + T_2 \quad U_{IZN} &= U_{IZV} + (U_0 - U_{IZV}) [1 - \exp(-T_2/\tau)] = \\ &= U_0 + (U_{IZV} - U_0) \exp(-T_2/\tau) \end{aligned}$$

# 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.

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

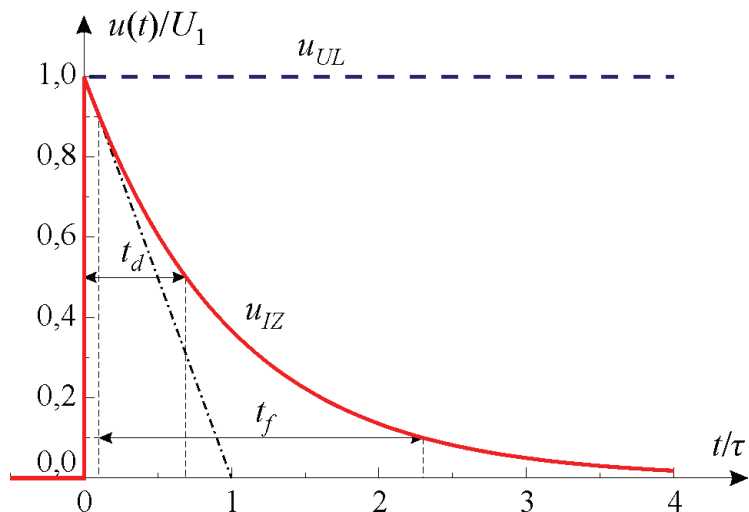


$$u_{IZ} = u_R = u_{UL} - u_C$$

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

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

# 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

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

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

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

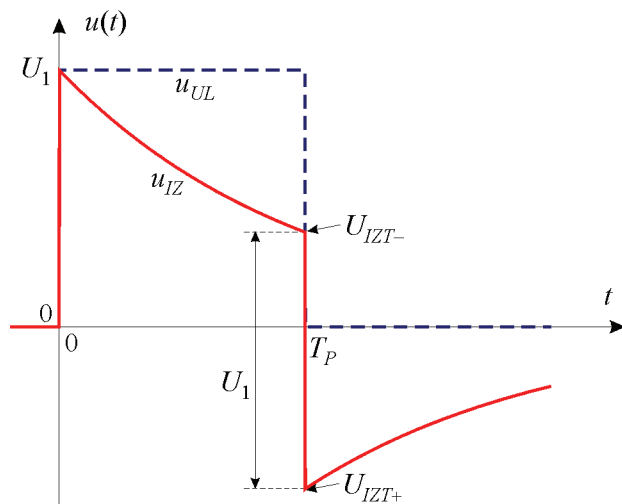
vrijeme kašnjenja

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

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

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

# Odziv CR-mreže na pravokutni impuls (1)



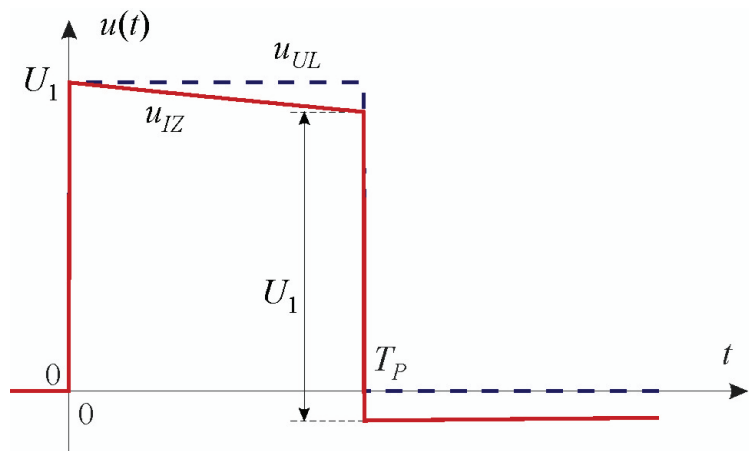
$$0 < t < T_P \quad u_{IZ}(t) = U_1 \exp(-t/\tau)$$

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

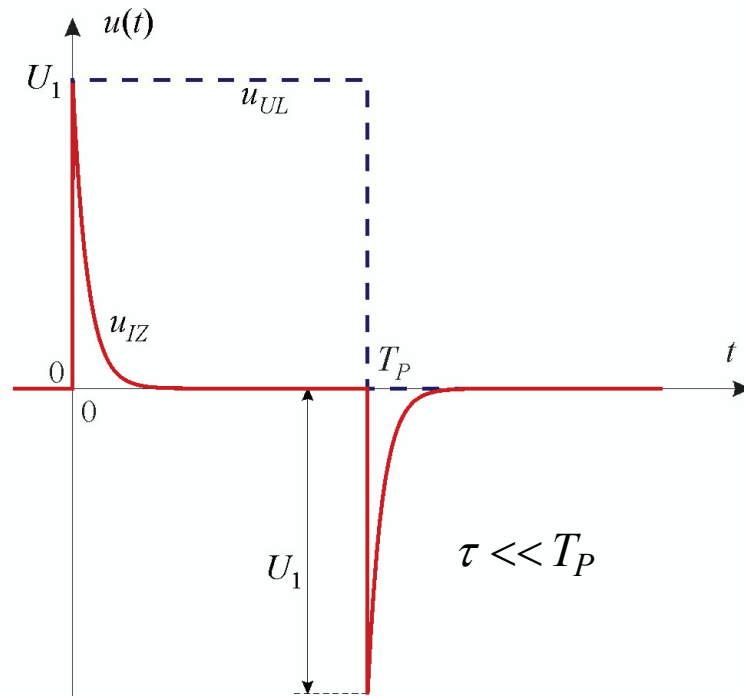
$$u_{IZ}(T_{P+}) = U_{IZT-} - U_1 = U_{IZT+}$$

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

# Odziv CR-mreže na pravokutni impuls (2)



$$\tau \gg T_P$$



$$\tau \ll T_P$$

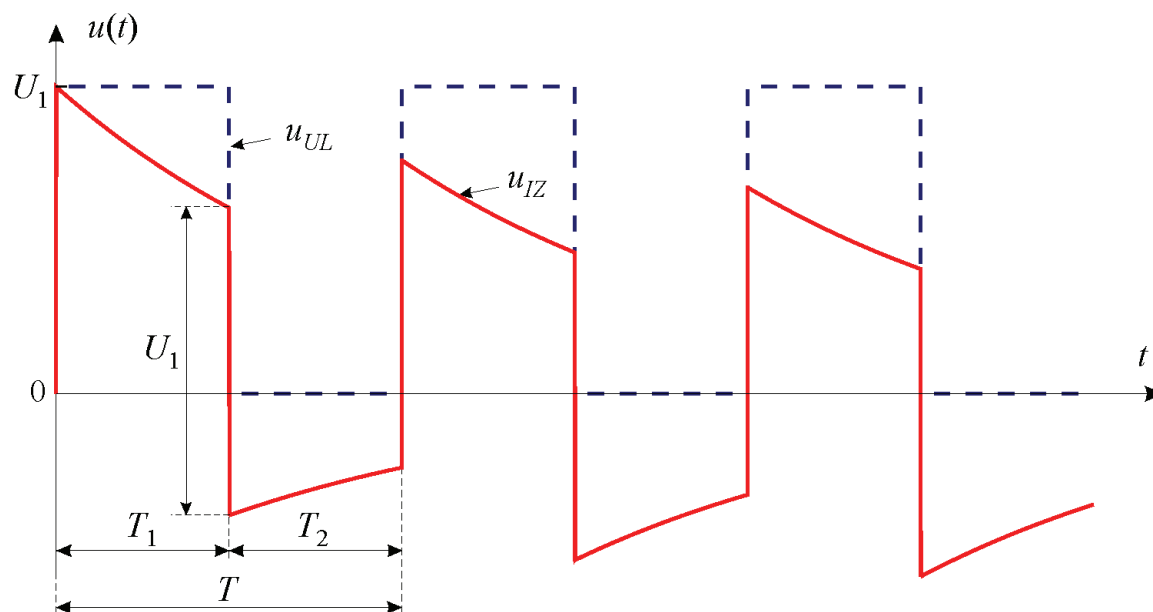
donja granična frekvencija  $\rightarrow \omega_d = 1/(RC) = 1/\tau$

za  $\omega_d \ll 1/T_P \rightarrow$  veći dio spektra u području srednjih frekvencija – mala izobličenja

za  $\omega_d \ll 1/T_P \rightarrow$  veći dio spektra u području niskih frekvencija – izobličenja

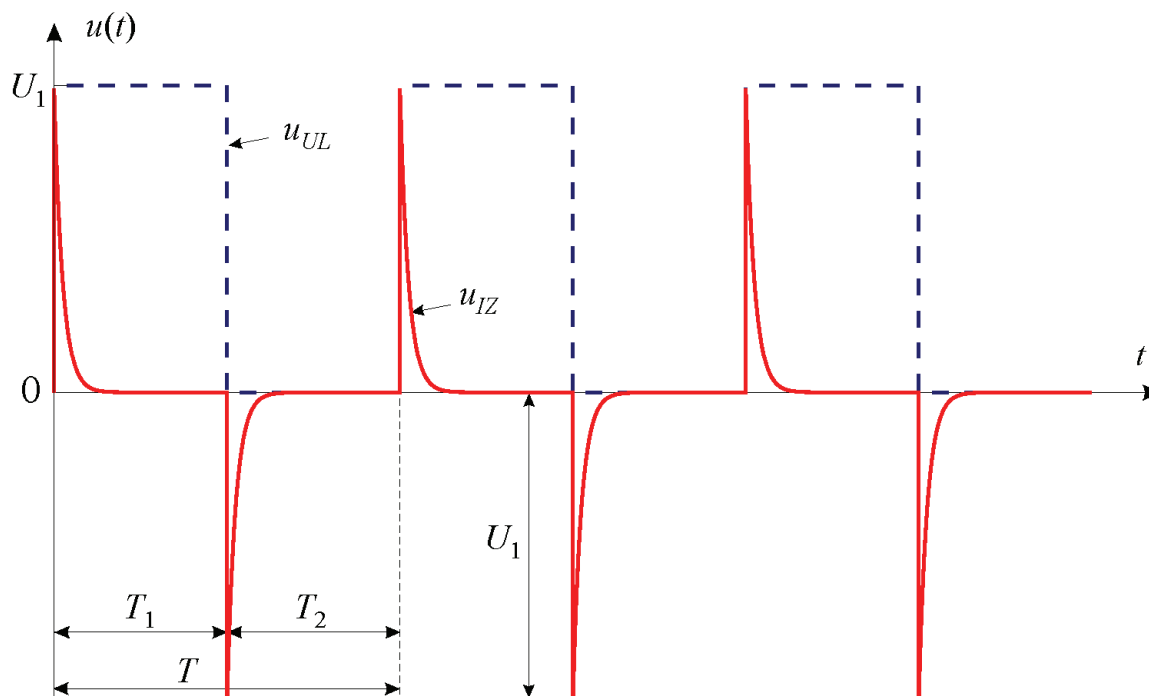


# Odziv **CR**-mreže na pravokutni napon – prijelazna pojava

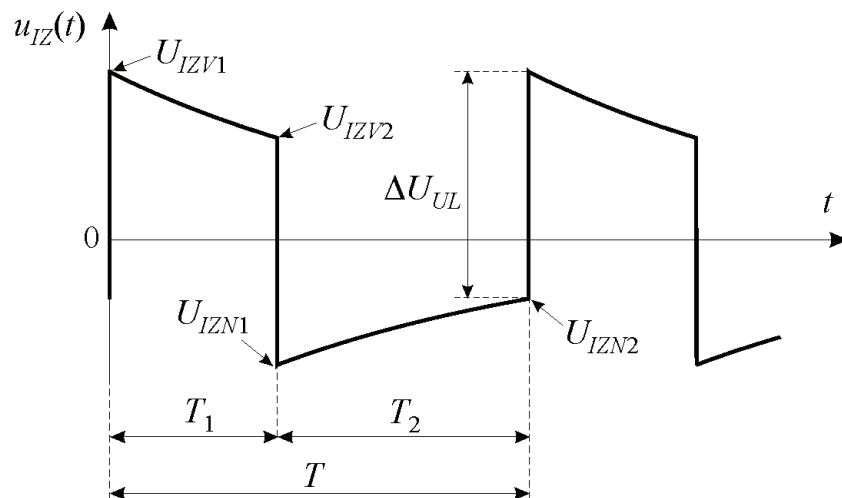


# Odziv **CR**-mreže na pravokutni napon – poseban slučaj

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

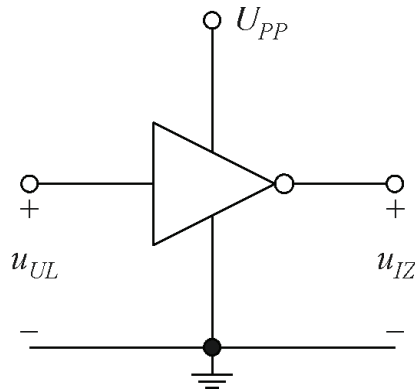
---

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.

# Invertor

## Invertor

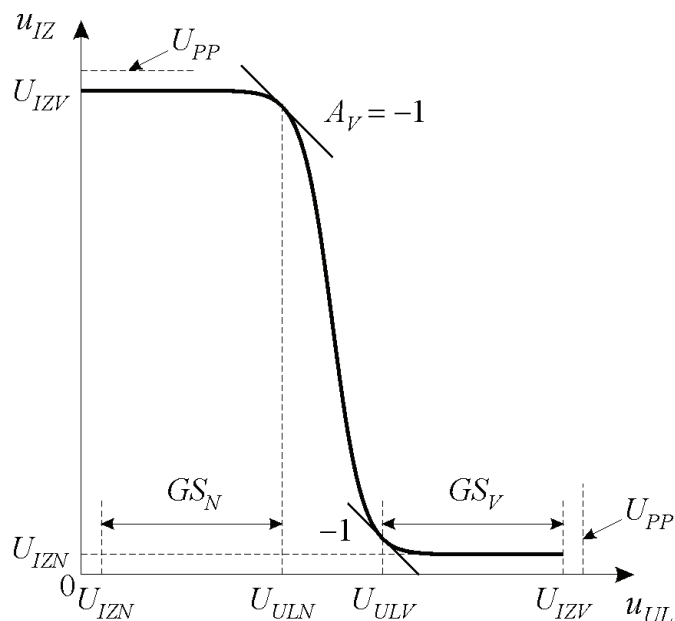
logička funkcija – invertiranje signala



$u_{UL}$  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 –  $u_{UL} < U_{ULN}$

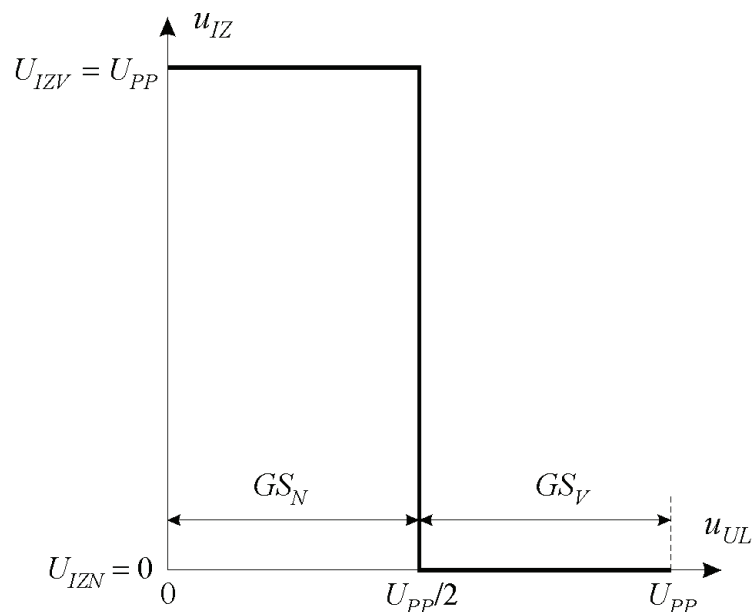
$$u_{UL} > U_{ULV}$$

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



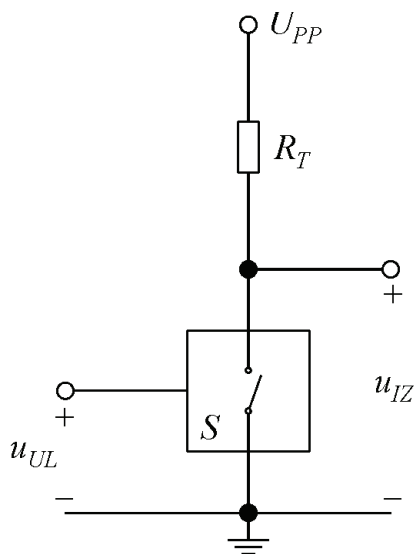
$$U_{IZV} = U_{PP}$$

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

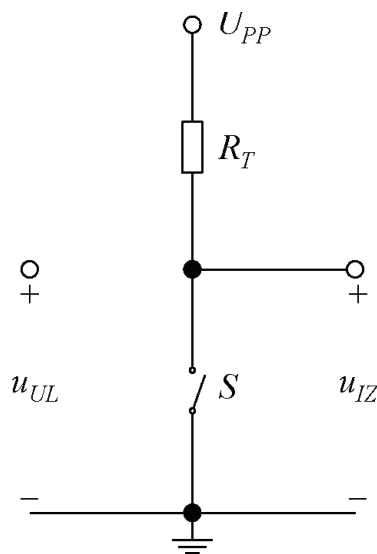
$$U_{ULN} = U_{ULV} = U_{PP} / 2$$

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

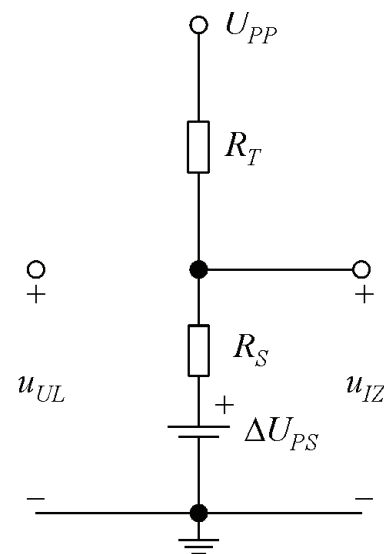
# Invertor s naponski upravljanim sklopkom



shema



model za ulazni  
napon logičke 0



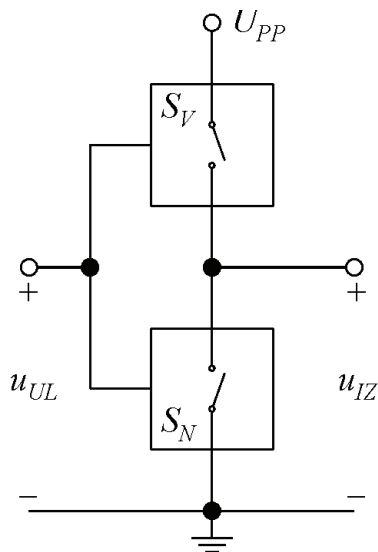
model za ulazni  
napon logičke 1

za ulazni napon logičke 0  $\rightarrow u_{IZ} = U_{PP} = U_{IZV}$

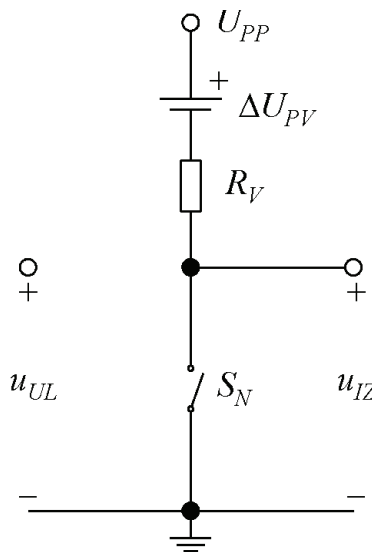
za ulazni napon logičke 1  $\rightarrow u_{IZ} = \frac{R_S}{R_T + R_S} (U_{PP} - \Delta U_{PS}) + \Delta U_{PS} = U_{IZN}$



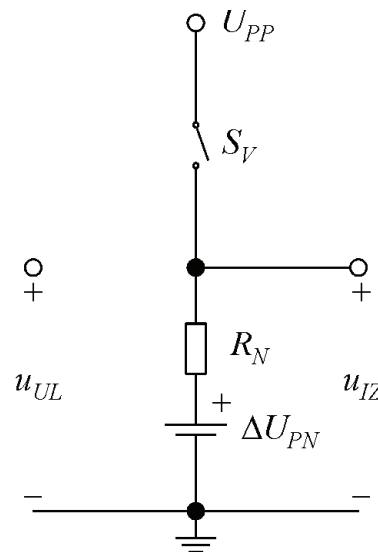
# Invertor s komplementarnim sklopkama



shema



model za ulazni  
napon logičke 0

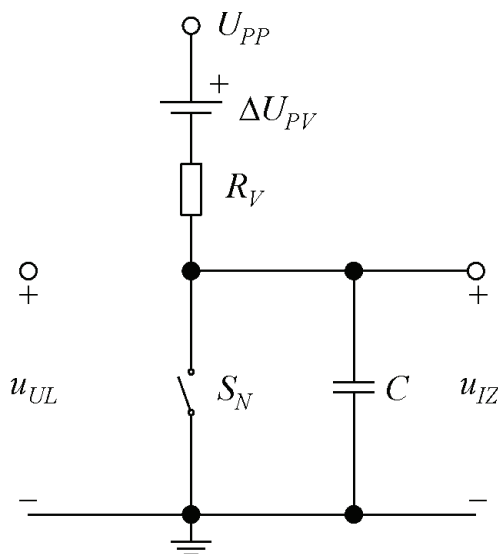


model za ulazni  
napon logičke 1

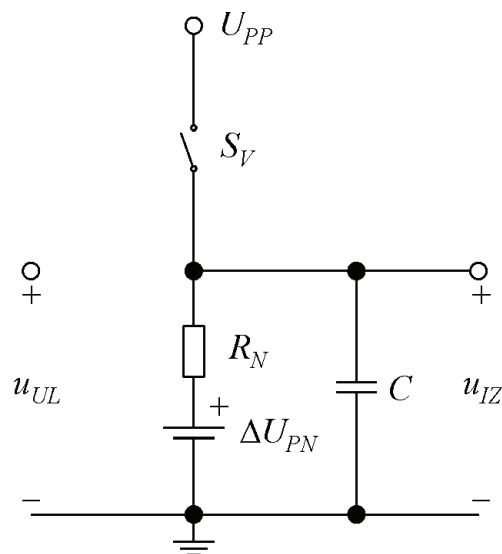
za ulazni napon logičke 0  $\rightarrow u_{IZ} = U_{PP} - \Delta U_{PV} = U_{IZV}$

za ulazni napon logičke 1  $\rightarrow u_{IZ} = \Delta U_{PN} = U_{IZN}$

# Model invertora s kapacitivnim opterećenjem



za ulazni napon logičke 0



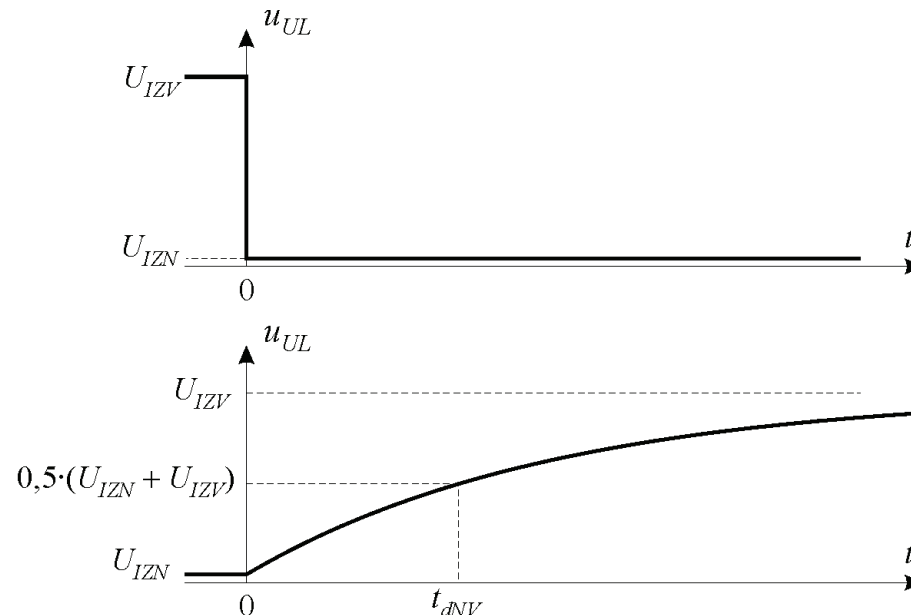
za ulazni napon logičke 1

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

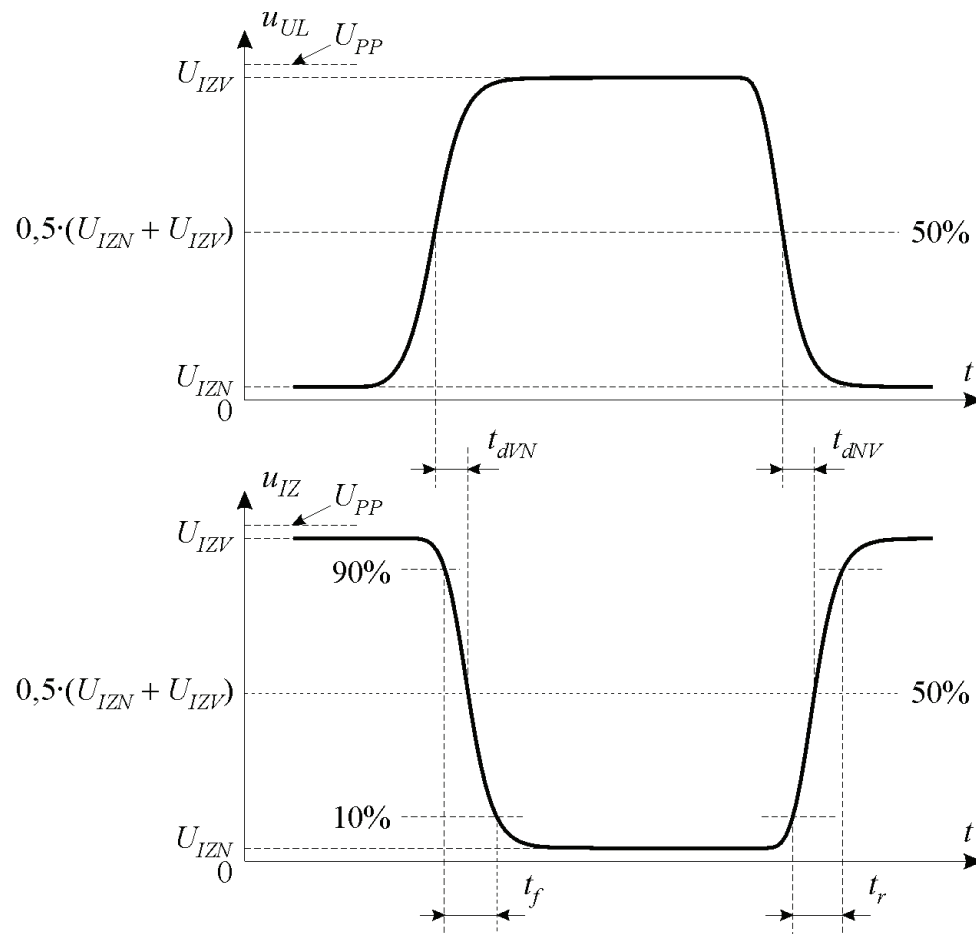
# Primjer 1.7

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:



# Vremena kašnjenja, porasta i pada realnog invertora



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