# Osnovi elektronike

na modulu elektroenergetika

# Osnovi elektronike

Osnovna literatura:

1. **Prezentacije sa predavanja**
2. **V. Litovski, Osnovi elektronike, Akademska misao, 2006, ISBN: 86-7466-227-7**
3. **M. Dimitrijević, et. al., Praktikum laboratorijskih vežbi iz Osnova elektronike, Elektronski fakultet Niš, 2012.**

# Osnovi elektronike

Dodatna literatura:


1. A. Sedra, K. Smith, *Microelectronic Circuits,* Oxford University Press, New York, Oxford 2004, ISBN 0-19-514252-7.

2. Behzad Razavi, *Fundamentals of Microelectronics,* Wiley, New York, 2013. ISBN: 978-1-118-15632-2.

3. Милош Живанов, *Електроника компоненте и појачавачка кола,* Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, 2001 ISBN 86-499-0087-9

# Osnovi elektronike

## Predispitne obaveze:

| | | |
|---|---|---|
| Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe) | 10% | |
| Domaći zadaci | 10% | |
| Kolokvijum I | | 40% |
| Kolokvijum II | | 40% |

## Način polaganja ispita:

- Polaže se pismeni i usmeni deo ispita. Uslov da se izađe na usmeni deo ispita je položen pismeni deo ispita (50% poena).
- Konačna ocena se formira kao srednja ocena sa pismenog i usmenog dela ispita.
- Predispitne obaveze nisu obavezne i mogu se nadoknaditi na ispitu.

# Osnovi elektronike

Svako predavanje završava se slajdovima na kojima su navedena:

- Tri osnovna ispitna pitanja
- Sedam standardnih ispitnih pitanja

Po završetku svih predavanja spisak svih pitanja biće dostupan na sajtovima:

- **elektronika.elfak.ni.ac.rs /studije /osnovne studije/osnovi elektronike/modul EEN**
- **MS teams – kanal osnovi elektronike EEN**

# Osnovi elektronike

Konsultacije:

ponedeljak, utorak, petak 11-12h u kabinetu 336

Možete me kontaktirati preko e-mail adrese:

**srdjan.djordjevic@elfak.ni.ac.rs**

# Sadržaj predmeta

1. Uvod (Osnovi pojačavačke tehnike)
2. Kola sa diodama
3. Kola sa bipolarnim tranzistorima
4. Kola sa MOSFET tranzistorima
5. Višestepeni pojačavači
6. Pojačavači sa direktnom spregom
7. Frekvencijski odziv pojačavača
8. Operacioni pojačavači
9. Pojačavači snage
10. Negativna povratna sprega
11. Oscilatori
12. Stabilizatori napona

# Sadržaj

1. Uvod
   a. Tipovi signala, izvori signala
   b. Zavisni generatori
   c. Četvoropoli
   d. Uloga i simbol pojačavača
   e. Ekvivaletna kola pojačavača
   f. Tipovi pojačavača prema tipu signala
   g. Frekvencijske karakteristike i linearna izobličenja
   h. Prenosna karakteristika i nelinearna izobličenja

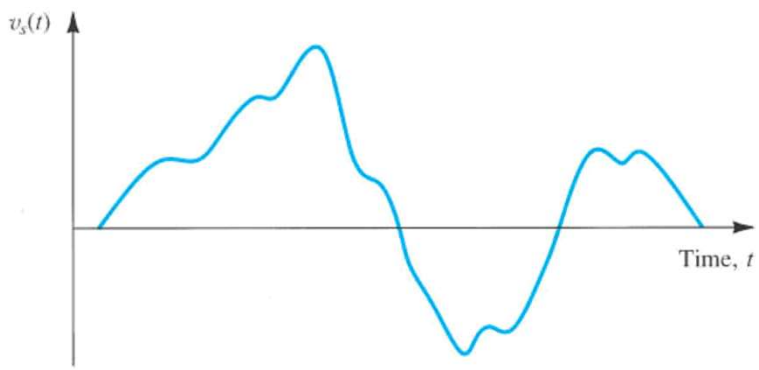
# Tipovi signala

Signali koje elektronska kola obrađuju prema načinu predstavljanja informacija mogu biti:

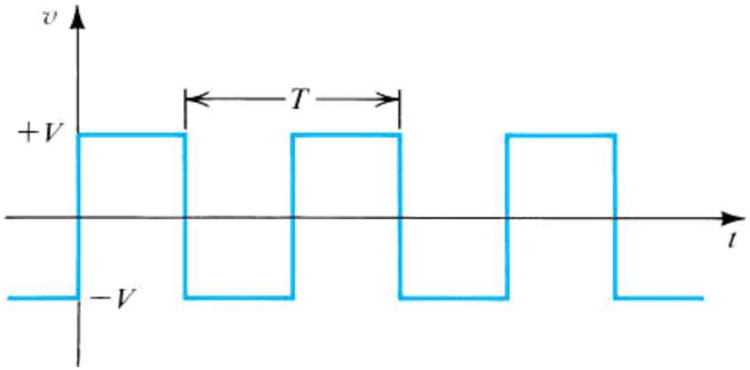
**Analogni signali** - kontinualno promenjive veličine

**Digitalni signali** - signali sa jednim ili više diskretnih nivoa

## Analogni signali




## Digitalni signali

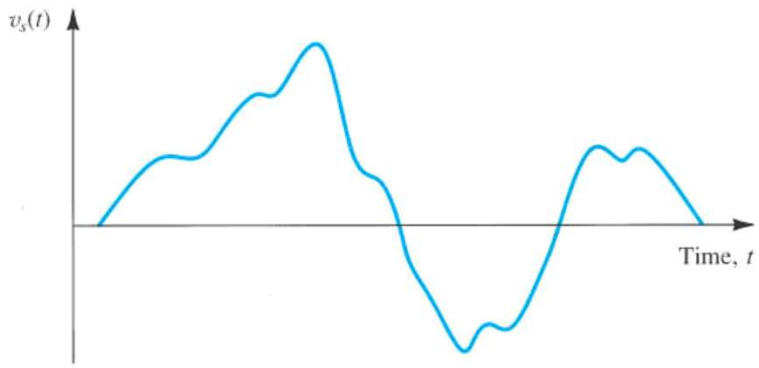


## Tipovi signala

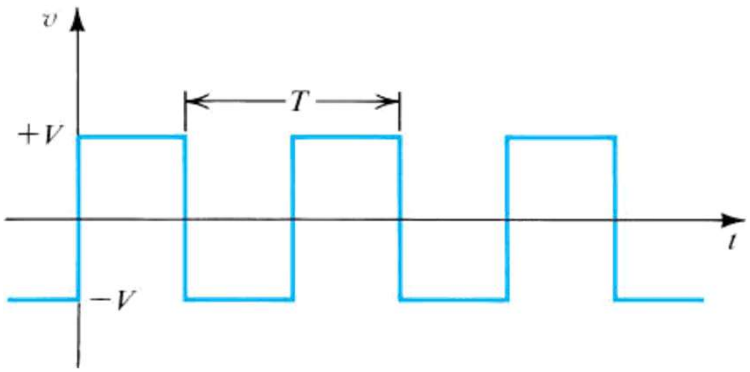
U praksi se najviše pojavljuje *binarni digitalni signal* koji ima dva diskretna amplitudska nivoa, koji se nazivaju logička nula i logička jedinica.

Analogni signal se obično primenjuje za predstavljanje nelektrične veličine kao što su temperatura, pritisak, vlažnost, intenzitet svetlosti, intenzitet zvuka.

**Analogni signali**




**Digitalni signali**



## Tipovi signala

Signali koji se pojavljuju u prirodi su analogni jer mogu da uzmu bilo koje vrednosti u određenom opsegu.

**Analogni signali** su komplikovani za obradu jer su osetljivi na šumove i izobličenja u elektronskim kolima. Pored toga memorisanje analogih električnih signala je veoma komplikovano.

**Digitalni signali** su mnogo otporniji na šumove i izobličenja. Pored toga memorisanje digitalnih signala je mnogo jednostavnije realizovati.

Da bi se omogućila obrada signala u digitalnom domenu potrebno je električni signal dobijen na senzorima najpre obraditi u analognom domenu a nakon toga *analogno-digitalnim konvertorom* konvertovati signal iz analogonog u digitalni domen.

## Izvori signala

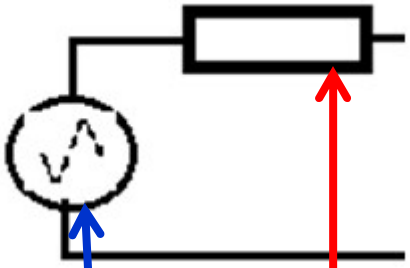
Da bi bila moguća obrada ili prenos informacija sadržanih u različitim fizičkim veličinama kao što su svetlost, zvuk, temperatura, pritisak itsl. potrebno je konvertovati neelektrične veličine u električne.

Konvertori neelektričnih veličina u električne nazivaju se **transdjuseri** (*transducers)*.

Nakon obrade signala u elektronskom kolu on se ponovo može konvertovati u istu ili neku drugu fizičku veličinu.

**Mikrofon konvertuje zvučni signal u električni (transdjuseri - *transducers*)**

=



**Za nas je to realni IZVOR SIGNALA:**

**Generator +**

**konačna izlazna otpornost**

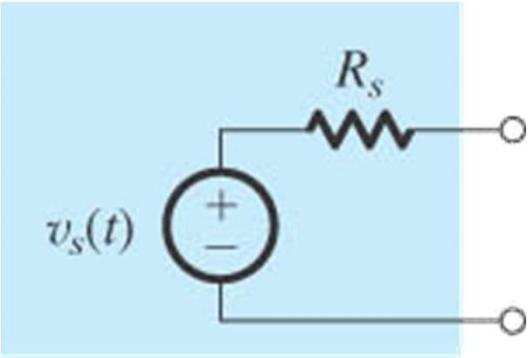
## Izvori signala

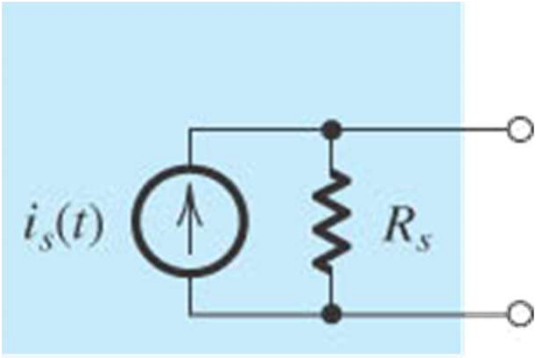
**Signal dolazi iz izvora – *generatora signala* može da se predstave kao**

**1) generator napona** **2) generator struje**

**Svaki realni generator električnog signala može se predstaviti ekvivalentim:**

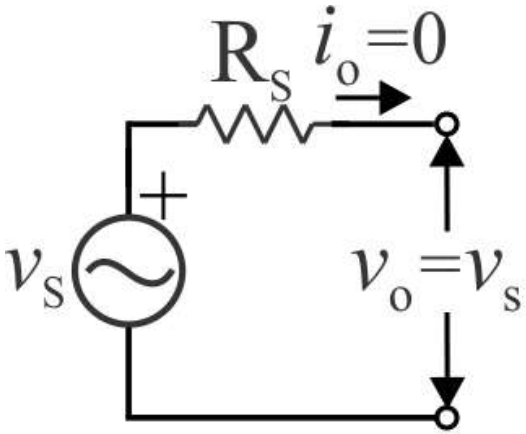
**1) naponskim generatorom** **2) strujnim generatorom.**

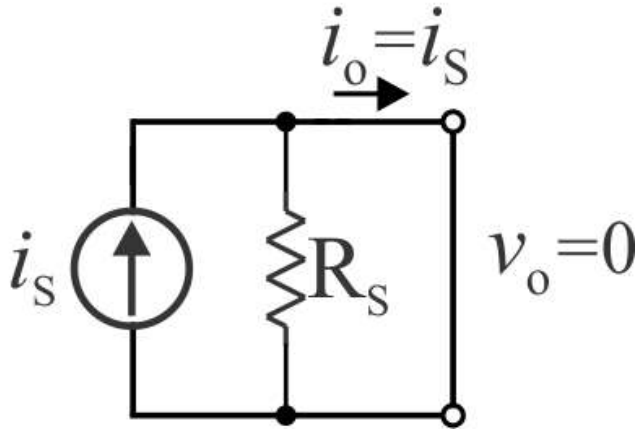



**Realni generator = idealni + unutrašnja otpornost Rs**

# Izvori signala




Tevenenova teorema

$$i_o(t) = 0$$

$$v_o(t) = v_s(t)$$

$v_o$ je napon praznog hoda

Nortonova teorema

$$v_o(t) = 0$$

$$i_o(t) = i_s(t)$$

$i_o$ je struja kratkog spoja

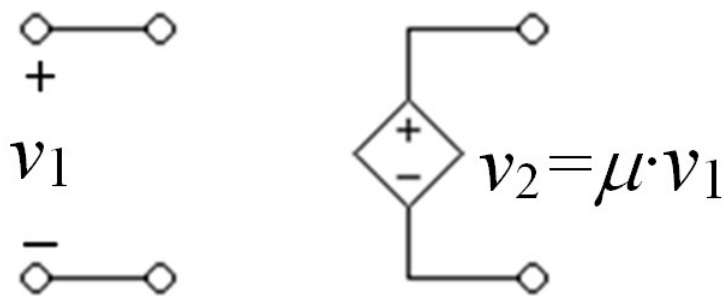
## Kontrolisani generatori

U modelima elektronskih komponenata često se koriste **zavisni ili kontrolisani generatori**.

Kontrolisani generatori su elementi sa dva pristupa koji se na izlaznom pristupu ponašaju kao idealni generatori (naponski ili strujni) dok je ulazni pristup otvoren ili kratkospojen. Vrednost generatora na izlaznom pristupu srazmerna je naponu ili struji na ulaznom pristupu. Postoje četiri tipa kontrolisanih generatora:

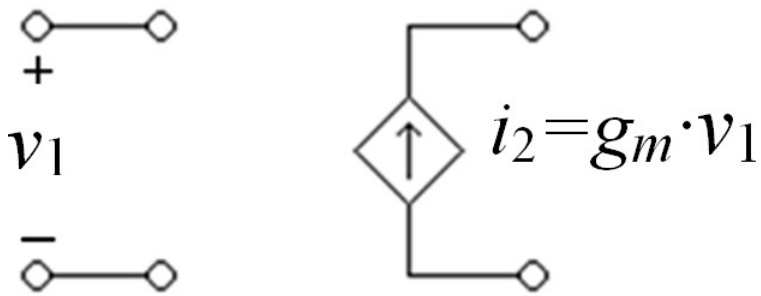
# Kontrolisani generatori

*Naponom kontrolisani naponski*




Izlazni napon kontrolisana je ulaznim naponom. Parametar $\mu$ je **naponsko pojačanje**.

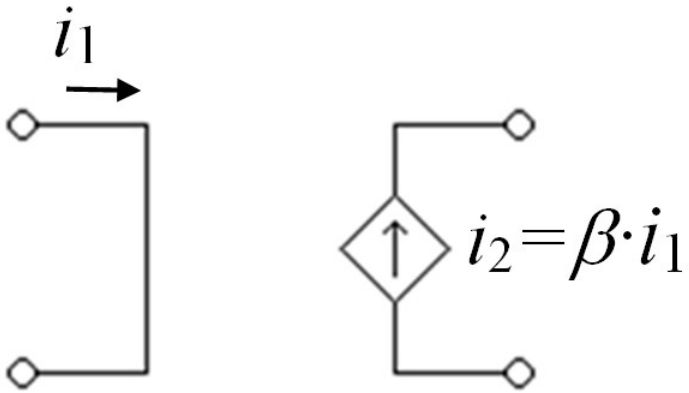
*Naponom kontrolisani strujni*




Izlazna struja kontrolisana je ulaznim naponom. Parametar $g_m$ je **prenosna provodnost** ili **transkonduktansa**.

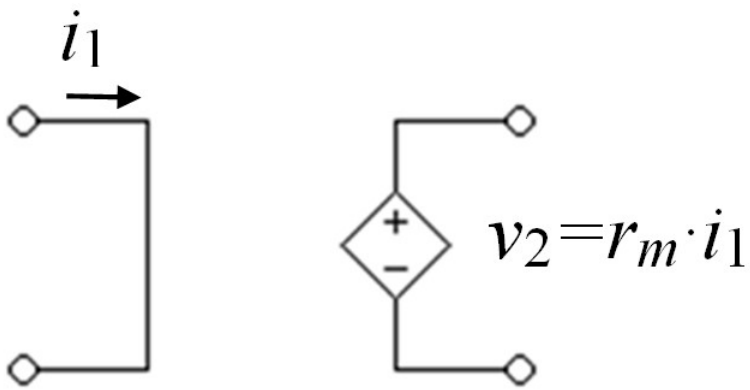
# Kontrolisani generatori

*Strujom kontrolisani strujni*




Izlazna struja kontrolisana je ulaznom strujom. Parametar $\beta$ je **strujno pojačanje**.

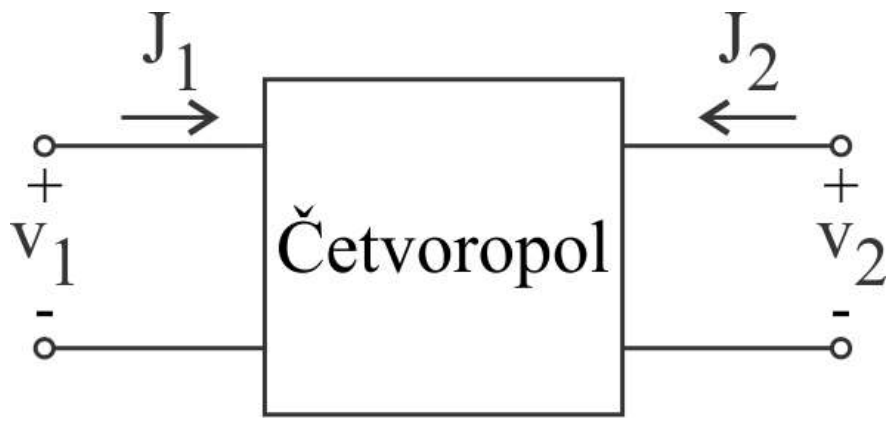
*Strujom kontrolisani naponski*




Izlazni napon kontrolisan je ulaznom strujom. Parametar $r_m$ je **prenosna otpornost** ili **transrezistansa**.

## Modeli četvoropola

*Četvoropol* je električna mreža sa dva pristupa, ulaznim i izlaznim. Kada se četvoropol poveže u električno kolo na njemu se mogu izmereti četiri veličine: ulazni naponon $v_1$, ulazna struja $J_1$, izlazni napon $v_2$, izlazna struja $J_2$. Ukoliko se zadaju dve od ove četiri veličine preostale dve zavise samo od električne mreže četvoropola. Zavisno od toga koje su dve promenjive odabrane kao nezavisne četvoropol se može okarakterisati sa *h*, *y*, *z*, *g* parametrima.



## Modeli četvoropola

Ukoliko su nezavisno promenjive naponi na pristupima četvoropol je okarakterisan "**y**" parametrima. U tom slučaju jednačine četvoropola su:

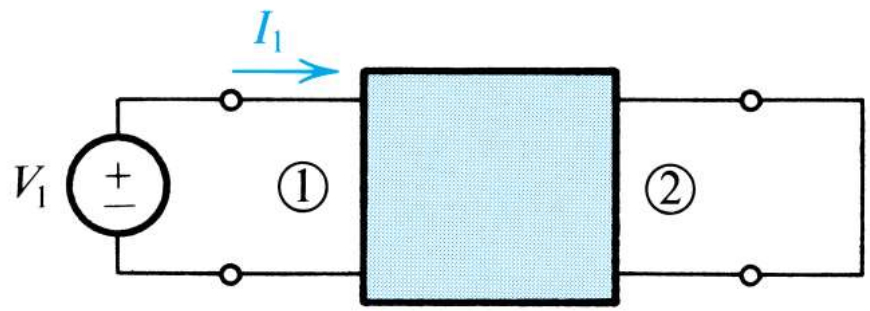
$$J_1 = y_{11} \cdot v_1 + y_{12} \cdot v_2$$

$$J_2 = y_{21} \cdot v_1 + y_{22} \cdot v_2$$

$y_{11}$ je *ulazni parametar* jer povezuje ulazne veličine $v_1$ i $J_1$.
$y_{12}$ je *povratni parametar* jer daje zavisnost ulazne veličine $J_1$ od izlazne veličine $v_2$.
$y_{21}$ je *prenosni parametar* jer daje zavisnost izlazne veličine $J_2$ od ulazne veličine $v_1$.
$y_{22}$ je *izlazni parametar* jer povezuje izlazne veličine $v_2$ i $J_2$.

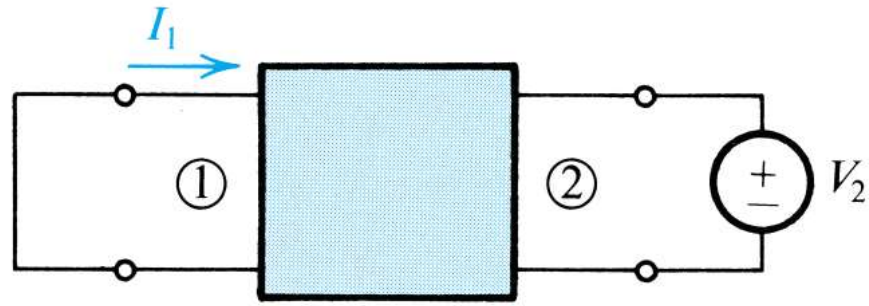
# Modeli četvoropola

Parametri četvoropola se određuju tako što se na pristupima vežu nezavisni generatori koji stvaraju zadate napone ili struje. Jedan od dva nazavisna generatora je jednak nuli.



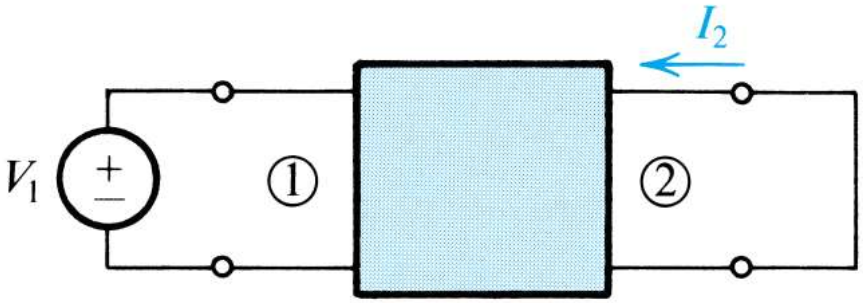

$$y_{11} = \left.\frac{I_1}{V_1}\right|_{V_2 = 0}$$

(b)

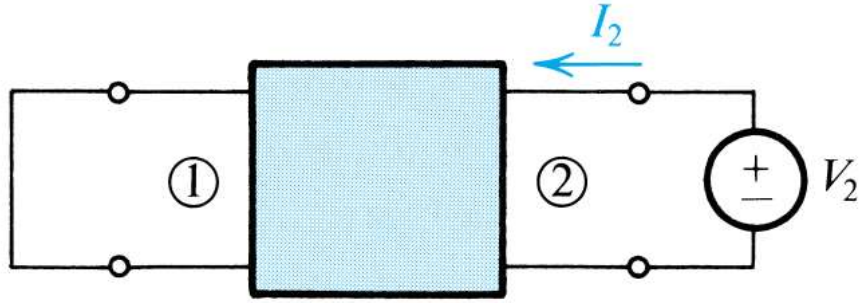



$$y_{12} = \left.\frac{I_1}{V_2}\right|_{V_1 = 0}$$

(c)




$$y_{21} = \left.\frac{I_2}{V_1}\right|_{V_2 = 0}$$




$$y_{22} = \left.\frac{I_2}{V_2}\right|_{V_1 = 0}$$

# Modeli četvoropola

Ukoliko su nezavisno promenjive ulazna struja, $J_1$, i izlazni napon, $v_2$, četvoropol je okarakterisan **hibridnim "h" parametrima**. U tom slučaju jednačine četvoropola su:

$$v_1 = h_{11} \cdot J_1 + h_{12} \cdot v_2$$
$$J_2 = h_{21} \cdot J_1 + h_{22} \cdot v_2$$

$h_{11}$ je *ulazni parametar* jer povezuje ulazne veličine $v_1$ i $J_1$. Ima dimenzije otpornosti.

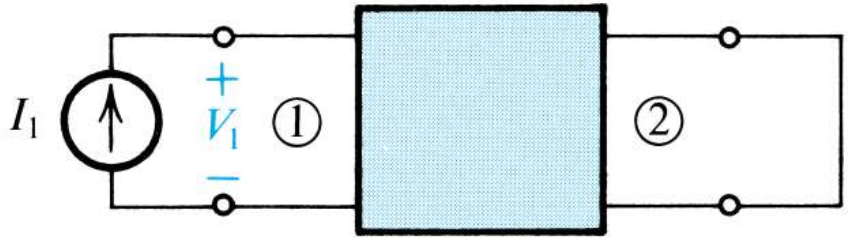
$h_{12}$ je *povratni parametar* jer daje zavisnost ulazne veličine $v_1$ od izlazne veličine $v_2$. Nema dimenzije jer je odnos dva napona.

$h_{21}$ je *prenosni parametar* jer daje zavisnost izlazne veličine $J_2$ od ulazne veličine $J_1$. Nema dimenzije jer je odnos dve struje.

$h_{22}$ je *izlazni parametar* jer povezuje izlazne veličine $v_2$ i $J_2$. Ima dimenzije odvodnosti

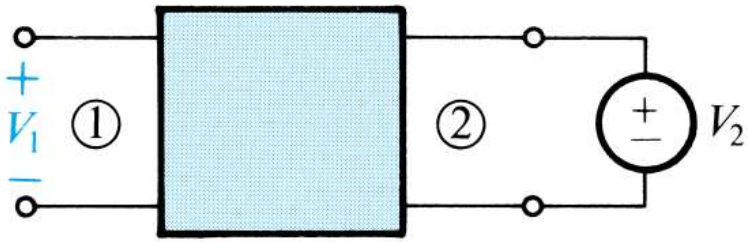
# Modeli četvoropola

Parametri četvoropola se određuju tako što se na pristupima vežu nezavisni generatori koji stvaraju zadate napone ili struje. Pri tome je uvek jedan od dva nezavisna generatora jednak nuli ($J_1$ ili *v2*).



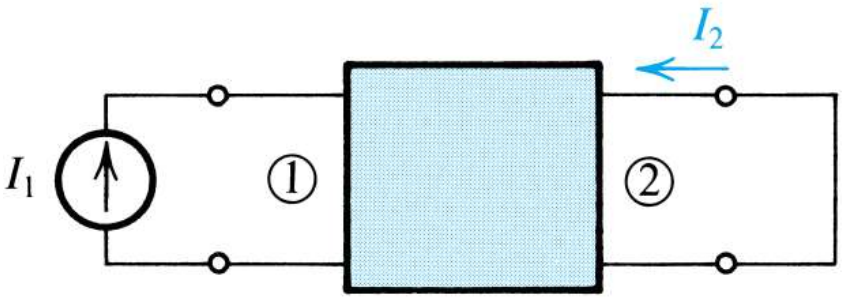

$$h_{11} = \left.\frac{V_1}{I_1}\right|_{V_2 = 0}$$

(b)

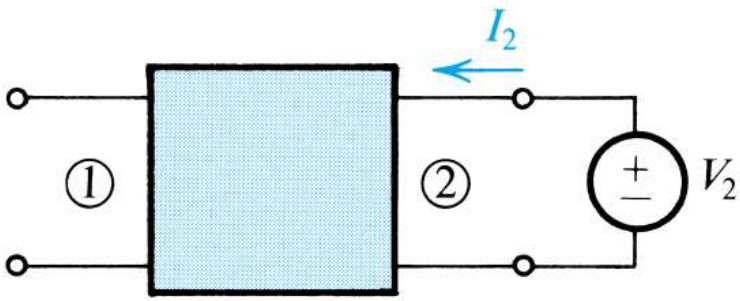



$$h_{12} = \left.\frac{V_1}{V_2}\right|_{I_1 = 0}$$

(c)




$$h_{21} = \left.\frac{I_2}{I_1}\right|_{V_2 = 0}$$

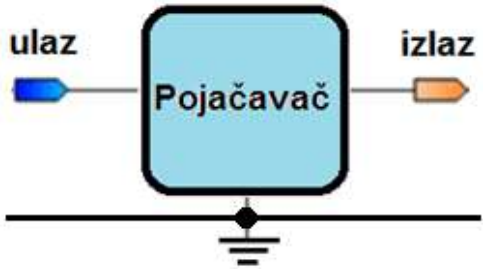



$$h_{22} = \left.\frac{I_2}{V_2}\right|_{I_1 = 0}$$

# Uloga i simbol pojačavača

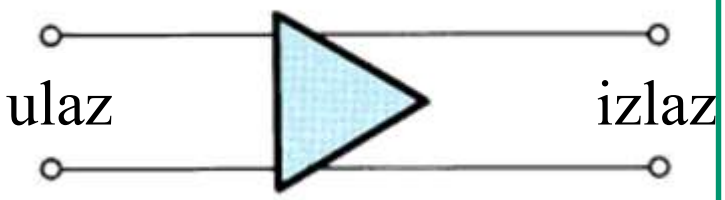
## Simbol pojačavača :

**umesto**



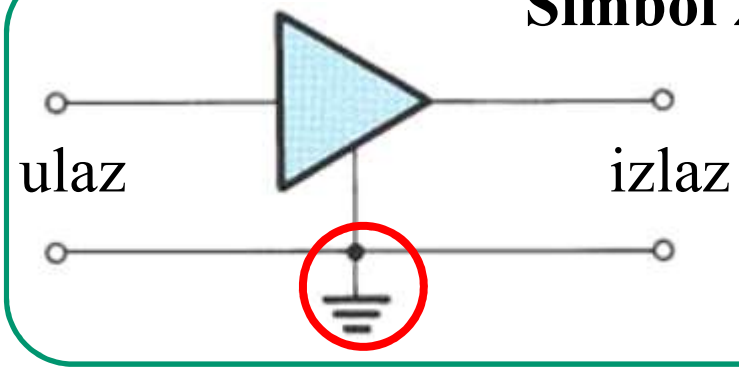

Pojačavač se simbolički predstavlja trouglom da bi se naznačio smer prostiranja signala.

**Simbol 1**




**ili**

**Simbol 2**




**Uzemljenje, masa, referentni čvor!!!**

## Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

Veličina koji se analizira na ulazu ili izlazu pojačavača može biti:

-Struja ili

- Napon.

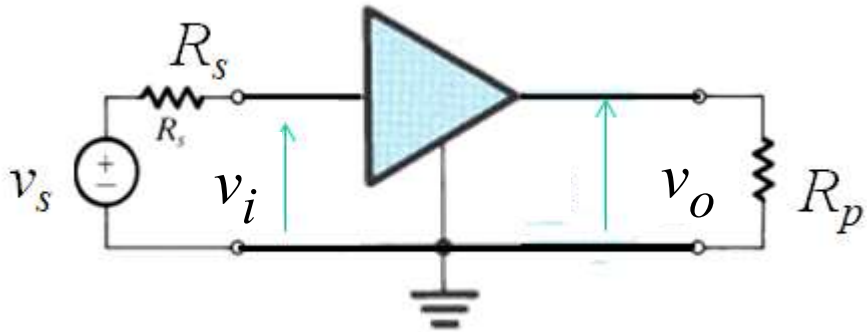
Koja će od ove dve veličine biti analizirana na ulazu a koja na izlazu zavisi od unutrašnje otpornosti izvora signala i od ulazne i izlazne otpornosti pojačavača.

# Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

## Pojačavač napona

ULAZ | IZLAZ

NAPON | NAPON



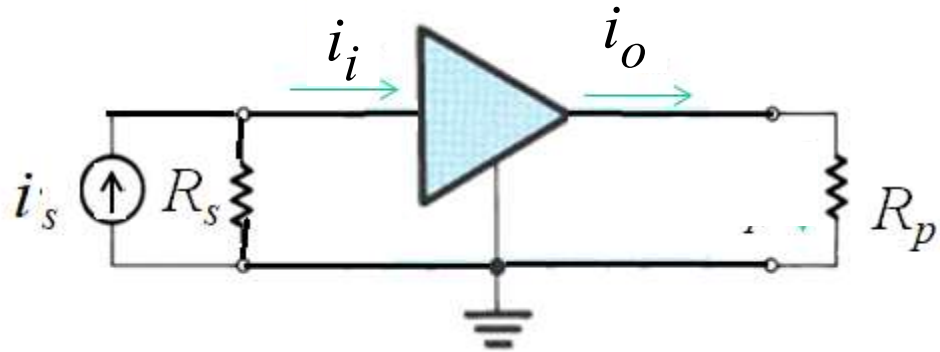

**Pojačanje napona**

$$A = A_v = \frac{v_o(t)}{v_i(t)}$$

## Pojačavač struje

ULAZ | IZLAZ

STRUJA | STRUJA




**Pojačanje struje**

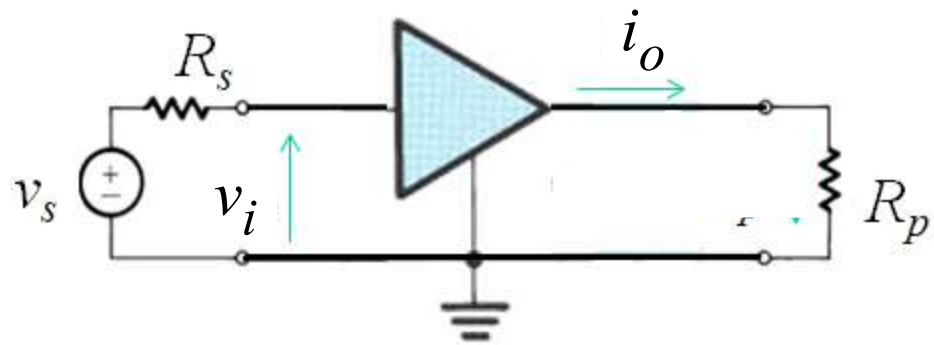
$$A_s = \frac{i_o(t)}{i_i(t)}$$

# Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

## Transkonduktansni

ULAZ | IZLAZ

NAPON | STUJA



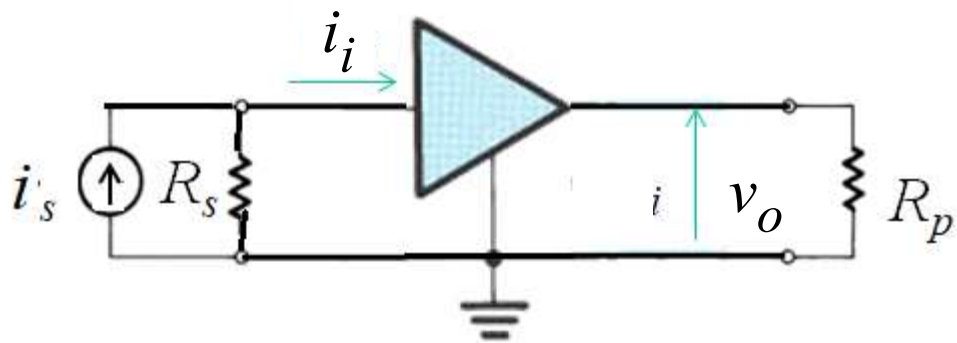

**Pojačanje napona u struju**

$$G_m = \frac{i_o(t)}{v_i(t)}$$

## Transrezistansni

ULAZ | IZLAZ

STRUJA | NAPON

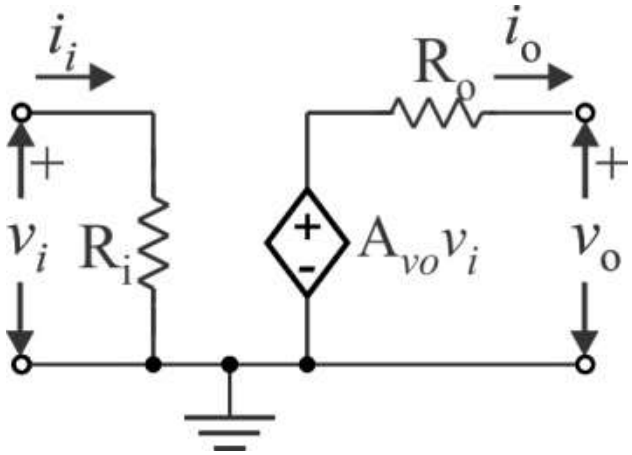



**Pojačanje struje u napon**

$$R_m = \frac{v_o(t)}{i_i(t)}$$

## Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

# Naponski: $V_i$ ➡ $V_o$



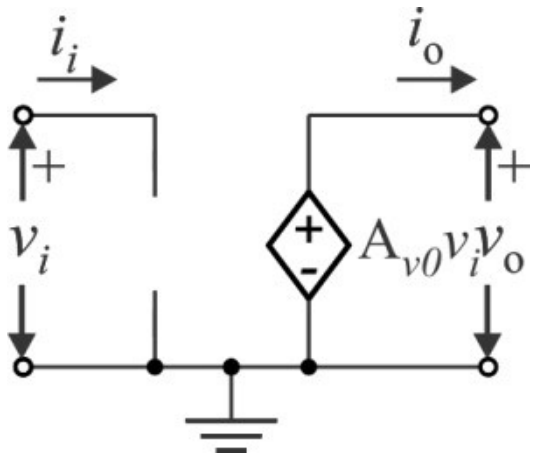

## Realni naponski pojačavač

$$A_{vo} = \left.\frac{v_o}{v_i}\right|_{i_o = 0}$$

Naponsko pojačanje otvorenog kola

$R_i$ Ulazna otpornost

$R_O$ Izlazna otpornost




## Idealni naponski pojačavač

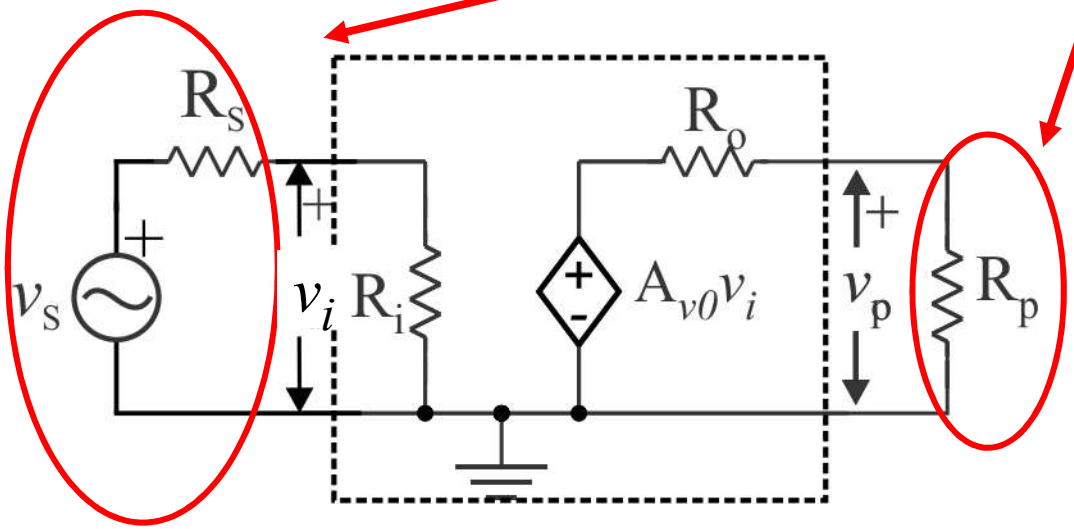
$\mathbf{R_i} \nearrow \infty$

$\mathbf{R}_o = \mathbf{0}$

$$A_v = A_{v0} = \frac{v_o}{v_i}$$

Daje maksimalno naponsko pojačanje i ono ne zavisi od unutrašnje otpornosti izvora signala niti od otpornosti potrošača.

## *Realni* naponski pojačavač opterećen i pobuđen iz realnog izvora



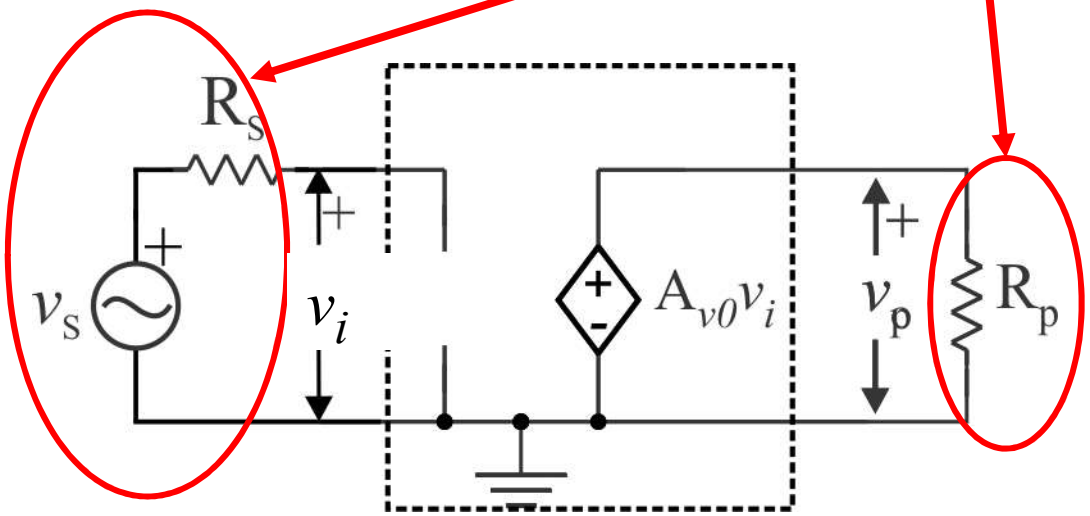

$$v_u = v_s \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$\frac{v_p}{v_u} = A_{v0} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_o}$$

$$\boxed{\frac{v_p}{v_s} = A_o \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_0}}$$

Ukupno naponsko pojačanje **ZAVISI od unutrašnje otpornosti generatora $R_s$ i otpornosti potrošača $R_p$ !!!**

## *Idealni* naponski pojačavač opterećen i pobuđen iz realnog izvora




Ukupno naponsko pojačanje, $A_v$ , je odnos izlaznog napona $v_p$ i elektromotorne sile pobudnog generatora $v_s$ .

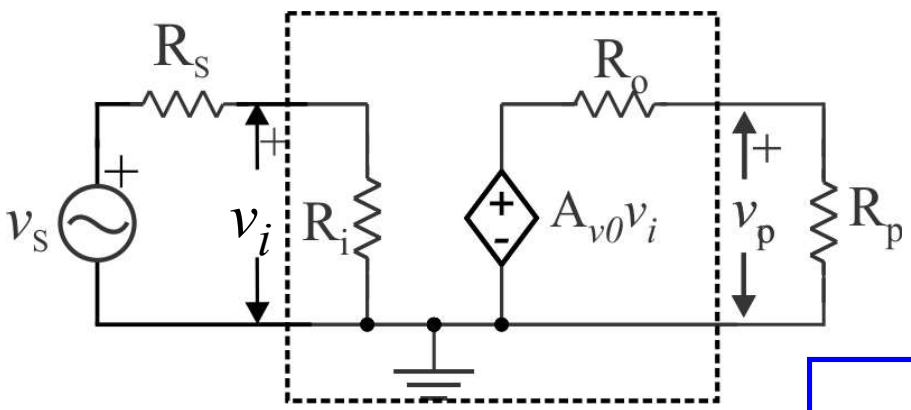
$$A_v = \frac{v_p}{v_s} = A_{vo}$$

Ukoliko pojačavač modeliramo idealnim naponskim generatorom zaključujemo da ukupno naponsko pojačanje

**NE ZAVISI od $R_s$ i $R_p$ !!!**

## Pojačanje signala

**Realni naponski pojačavač se ponaša kao idealni** ukoliko je ulazna otpornost pojačavača $\boldsymbol{R_i}$ mnogo veća od otpornosti izvora signala ***Rs*** kao i izlazna otpornost pojačavača ***Ro*** mnogo manja od otpornosti potrošača ***Rp***.




$$R_p >> R_0 \Rightarrow \quad \frac{v_p}{v_i} = A_{vo} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_o} \approx A_{vo}$$

$$R_i >> R_s \Rightarrow \quad v_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot v_s$$

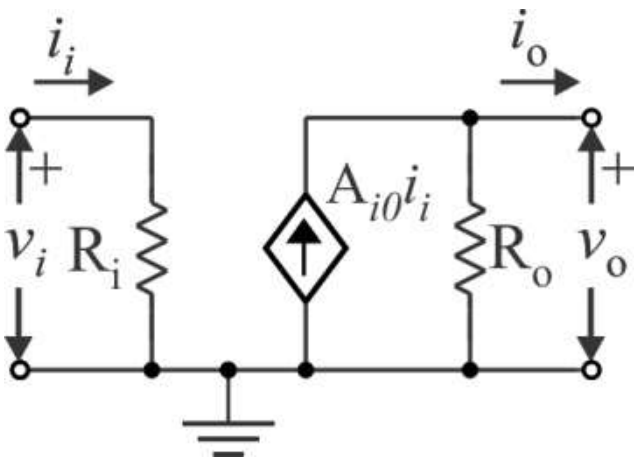
$$\boxed{R_i >> R_s \quad R_p >> R_o \Rightarrow A_v = \frac{v_p}{v_s} \approx A_{v0}}$$

Ovo praktično znači da će naposko pojačanje zavisiti samo od pojačavača i neće se menjati sa promenom spoljnih elemenata (izvora signala i potrošača).

## Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

**Strujni: $i_i$ ➡ $i_o$**

**Realni**

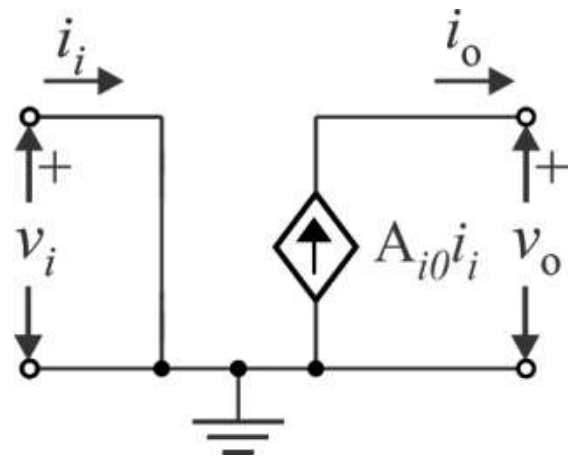



$$A_i = A_{io} = \left.\frac{i_o}{i_i}\right|_{v_o = 0}$$ Strujno pojačanje kratkospojenog kola

$R_i$ Ulazna otpornost

$R_O$ Izlazna otpornost

**Idealni**




$$\mathbf{R}_i = \mathbf{0}$$
$$\mathbf{R}_o \nearrow \infty$$

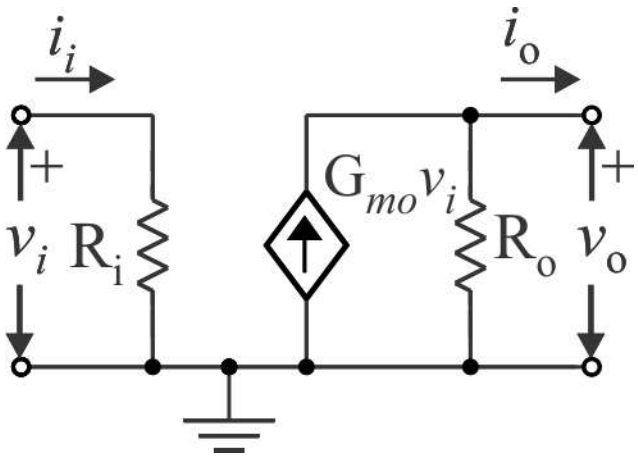
$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = A_{io}$$

Daje maksimalno strujno pojačanje i ono ne zavisi od unutrašnje otpornosti izvora signala niti od otpornosti potrošača.

# Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

## Transkonduktansni: $v_i$ ➡ $i_o$ (napon u struju)

### Realni

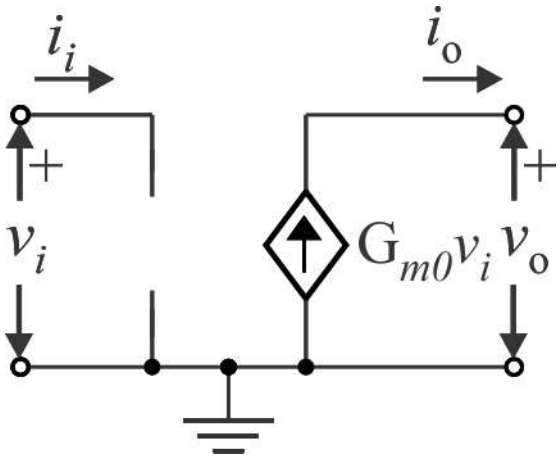



$$G_m = G_{mo} = \left.\frac{i_o}{v_i}\right|_{v_o = 0}$$ Transkonduktansa kratkospojenog kola

$R_i$ Ulazna otpornost

$R_O$ Izlazna otpornost

### Idealni




$\mathbf{R}_i \nearrow \infty$

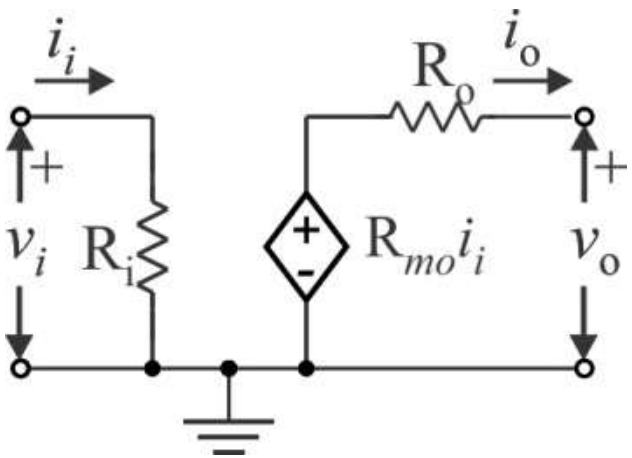
$\mathbf{R}_o \nearrow \infty$

$$G_m = \frac{i_o}{v_i} = G_{m0}$$

Daje maksimalno pojačanje i ono ne zavisi od unutrašnje otpornosti generatora niti od otpornosti potrošača.

# Transrezistansni: $I_u$ ➡ $V_i$ (struja u napon)

## Realni

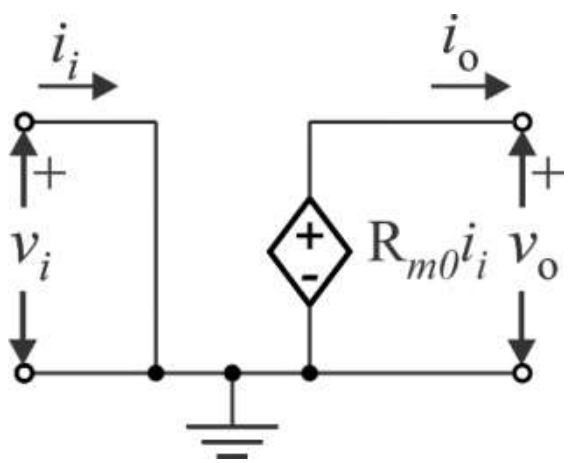



$$R_m = R_{mo} = \left.\frac{v_o}{i_i}\right|_{i_o = 0}$$ Transrezistansa otvorenog kola

$R_i$ Ulazna otpornost

$R_O$ Izlazna otpornost

## Idealni




$\mathbf{R}_i = 0$

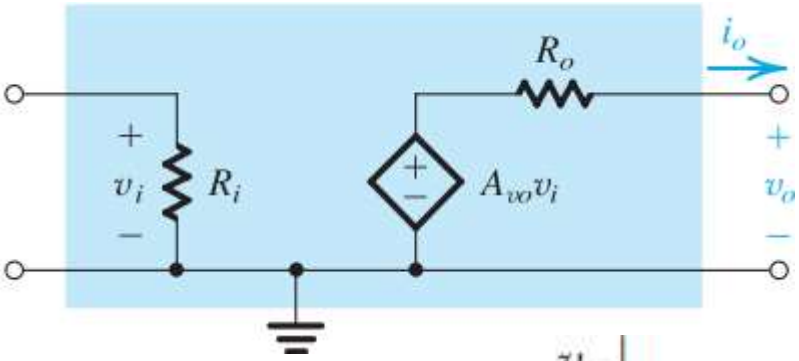
$\mathbf{R}_o = 0$

$$R_m = \frac{v_o}{i_i} = R_{mo}$$

Daje maksimalno pojačanje i ono ne zavisi od unutrašnje otpornosti generatora niti od otpornosti potrošača.

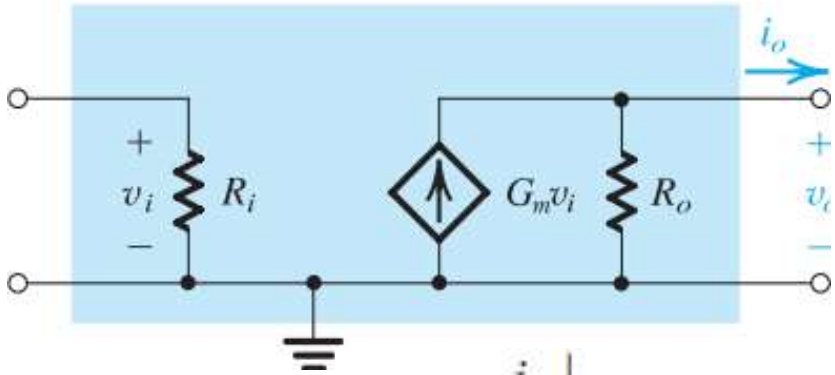
# Modeli pojačavača

## Naponski pojačavač



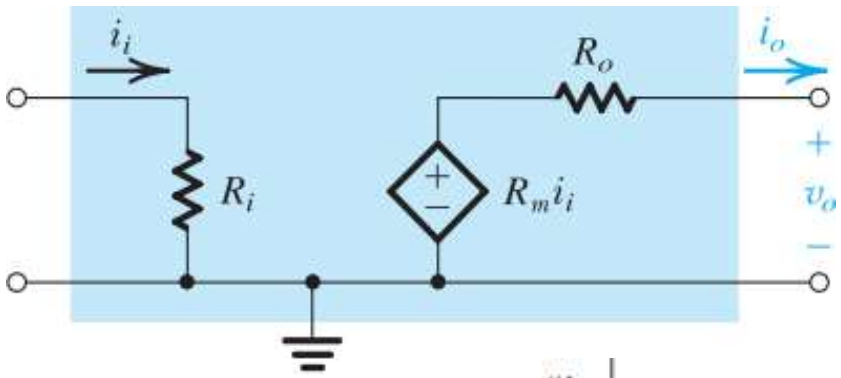

$$A_{vo} \equiv \left.\frac{v_o}{v_i}\right|_{i_o=0} \quad \text{(V/V)}$$

## Transkonduktansni pojačavač



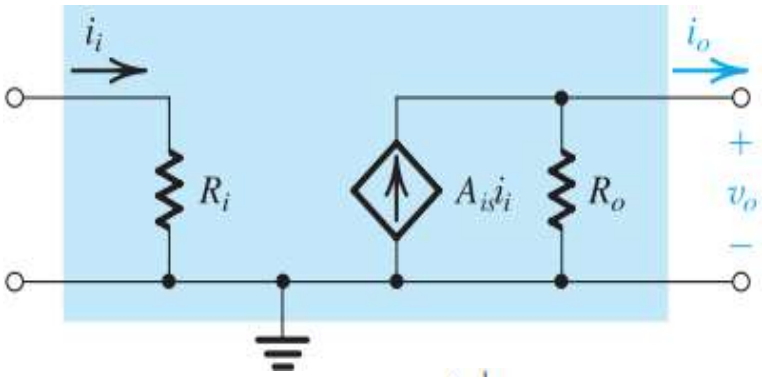

$$G_m \equiv \left.\frac{i_o}{v_i}\right|_{v_o=0} \quad \text{(A/V)}$$

## Transrezistansni pojačavač




$$R_m \equiv \left.\frac{v_o}{i_i}\right|_{i_o=0} \quad \text{(V/A)}$$

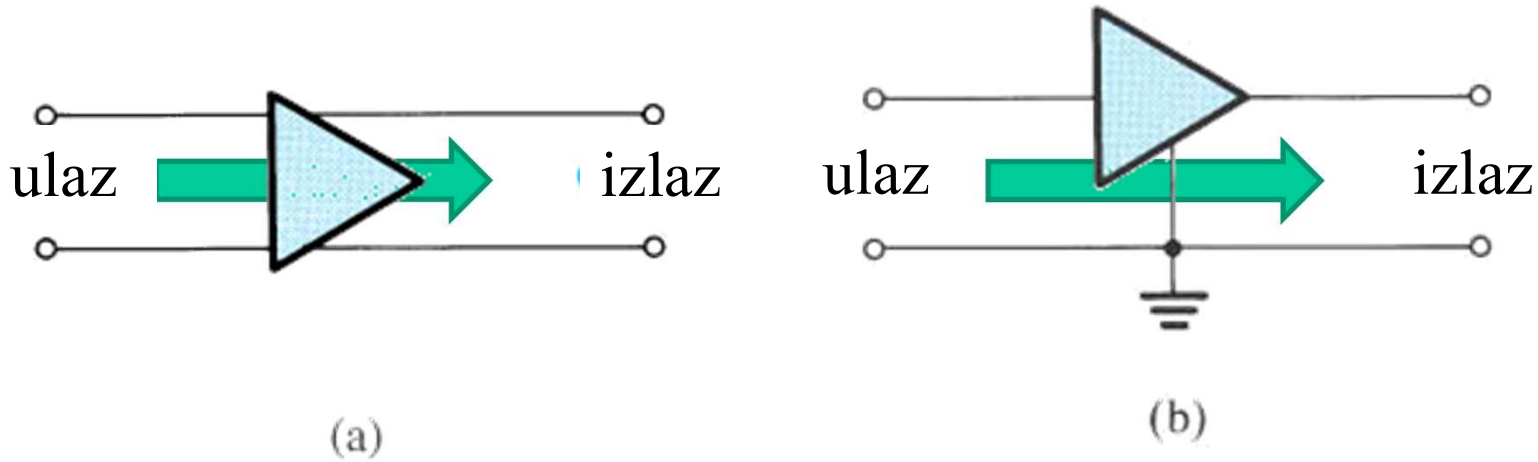
## Strujni pojačavač




$$A_{is} \equiv \left.\frac{i_o}{i_i}\right|_{v_o=0} \quad \text{(A/A)}$$

## Pojačanje signala

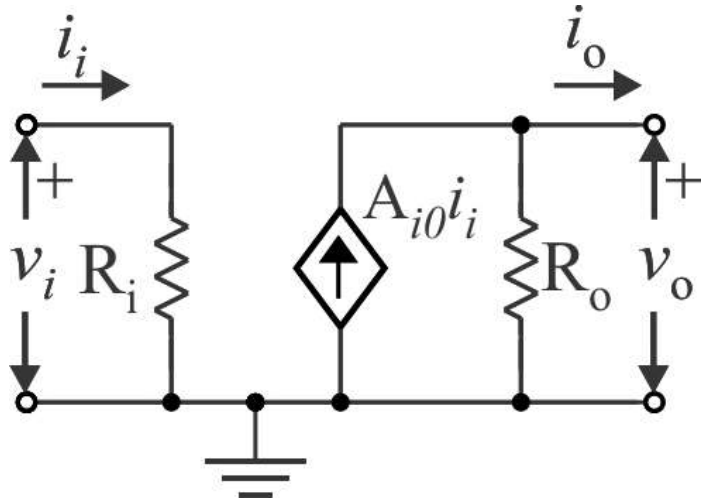
Svi prikazani modeli su *unilateralni:* prenose signal samo u jednom pravcu - sa ulaza prema izlazu. To se vidi iz modela pojačavača jer ne postoji kontrolisani generator koji vraća signal sa izlaza na ulaz, već samo generator koji prenosi signal od ulaza ka izlazu.

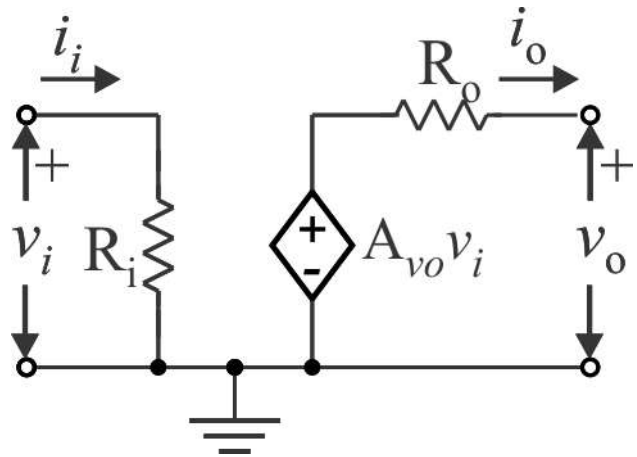


## Pojačanje signala

**Svi navedeni modeli mogu ravnopravno da se koriste za modelovanje realnog pojačavača!**

**Primer:**

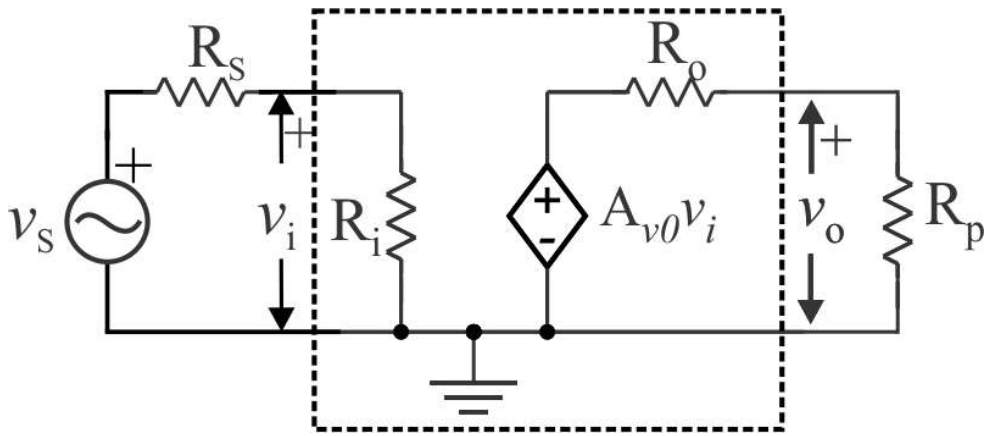



$$A_{io} = A_{VO}\frac{R_i}{R_o} \quad \Leftrightarrow \quad A_{vo} = A_{iO}\frac{R_o}{R_i}$$

## Pojačanje signala

Uslov da se na potrošaču razvije maksimalna snaga može se odrediti diferenciranjem izraza za snagu po otpornosti potrošača *Rp*.




$$\frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_o}$$

$$P = v_o i_o = \frac{v_0^2}{R_p} = \frac{\left(A_{vo} \cdot v_i\right)^2 R_p}{(R_p + R_o)^2}$$

$$\frac{dP}{dR_P} = (A_{vo} \cdot v_i)^2 \cdot \frac{(R_P + R_o)^2 - 2 \cdot R_P \cdot (R_P + R_o)}{(R_P + R_o)^4} = (A_{vo} \cdot v_i)^2 \cdot \frac{R_o^2 - R_p^2}{(R_P + R_o)^4}$$

$$\boxed{\frac{dP}{dR_p} = 0 \quad \Rightarrow \quad R_p = \mathrm{R_o}}$$

Maksimalna snaga na potrošaču dobija se kada je otpornost potrošača *Rp* jednaka izlaznoj otpornosti pojačivača *Ro*.

## Za pojačavač se mogu definisati

$$A_v = \frac{v_O(t)}{v_i(t)}$$

**Pojačanje napona** – odnos izlaznog i ulaznog napona

$$A_s = \frac{i_O(t)}{i_i(t)}$$

**Pojačanje struje –** odnos izlazne i ulazne struje

$$A_p = \frac{P_O(t)}{P_i(t)}$$

**Pojačanje snage –** odnos izlazne i ulazne snage

$$A_p = \frac{v_O i_O}{v_i i_i} = A_v A_i$$

# Izražavanje pojačanja u decibelima

$$A = \frac{v_o}{v_i} \qquad A_s = \frac{i_o}{i_i} \qquad A_P = \frac{P_o}{P_i}$$

Da bi prikaz pojačanja koje se kreću u velikom opsegu bio pregledniji koristi se logaritamska skala, odnosno pojačanje se izražava u decibelima. Ovakav prikaz zasniva se na činjenici da je logaritam monotono rastuća funkcija.

$$\boxed{a_P = 10 \cdot \log|A_P|}$$ **dB**

$$\boxed{\begin{aligned} a_v &= 20\log|A| \\ a_s &= 20\log|A_s| \end{aligned}}$$ **dB**

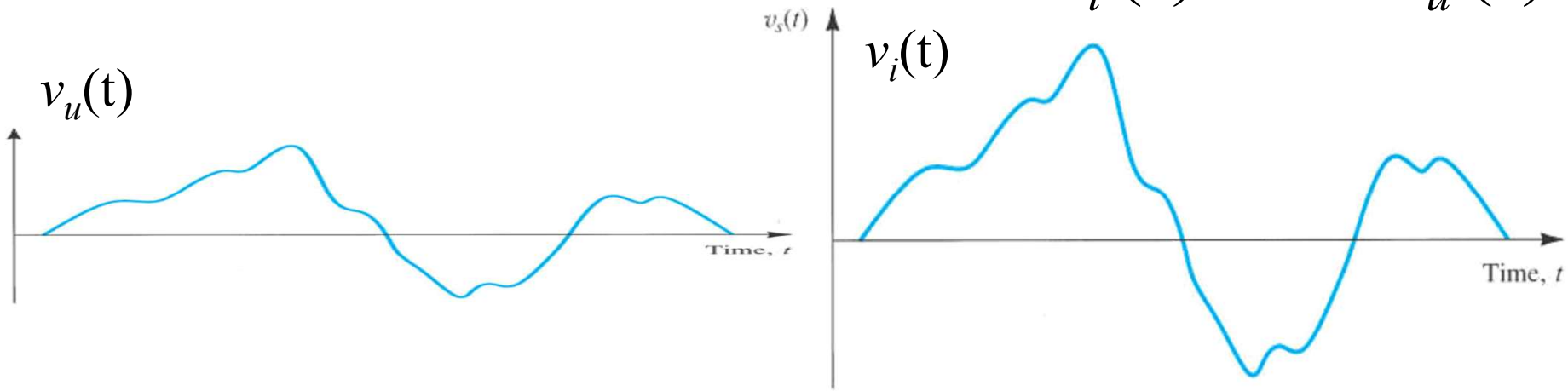
# Izobličenja

**Uloga pojačavača:**

**Da *pojača* ulazni signal *BEZ IZOBLIČENJA***

**Talasni oblik signala je isti ali uvećan A puta.**

$$v_i(t) = A \cdot v_u(t)$$




**Pojačanje *A* = *const.***

# Pojačanje signala

**Uloga pojačavača:**

**Da *pojača* ulazni signal *BEZ IZOBLIČENJA***

**Uzroci izobličenja pojačavača:**

**1. Različito pojačanje na različitim frekvencijama (neidealnost amplitudske karakteristike)**

**2. Različito kašnjenje na različitim frekvencijama (neidealnost fazne karakteristike)**

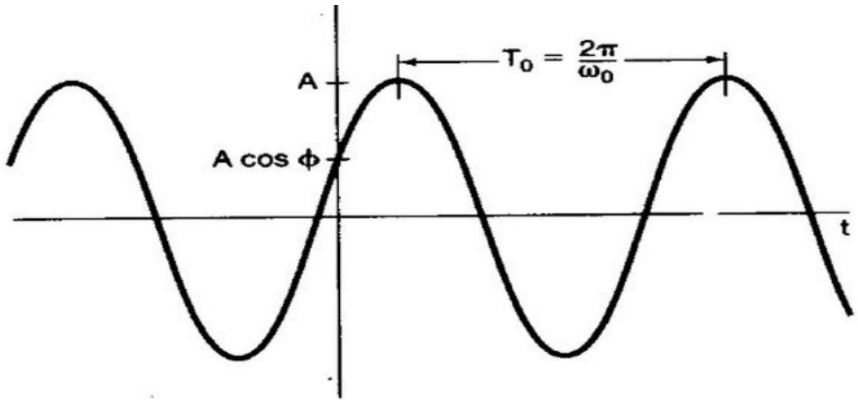
**3. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala (neidealnost prenosne karakteristike)**

## Linearna izobličenja

**Furijeova analiza** omogućava da se proizvoljni kontinualni signal izrazi kao zbir sinusnih signala različite frekvencije.

Svaka od ovih sinusoidalnih komponenti okarakterisna je sa:

- Frekvencijom, ω
- Amplitudom, $V_m$
- Početna fazom, φ



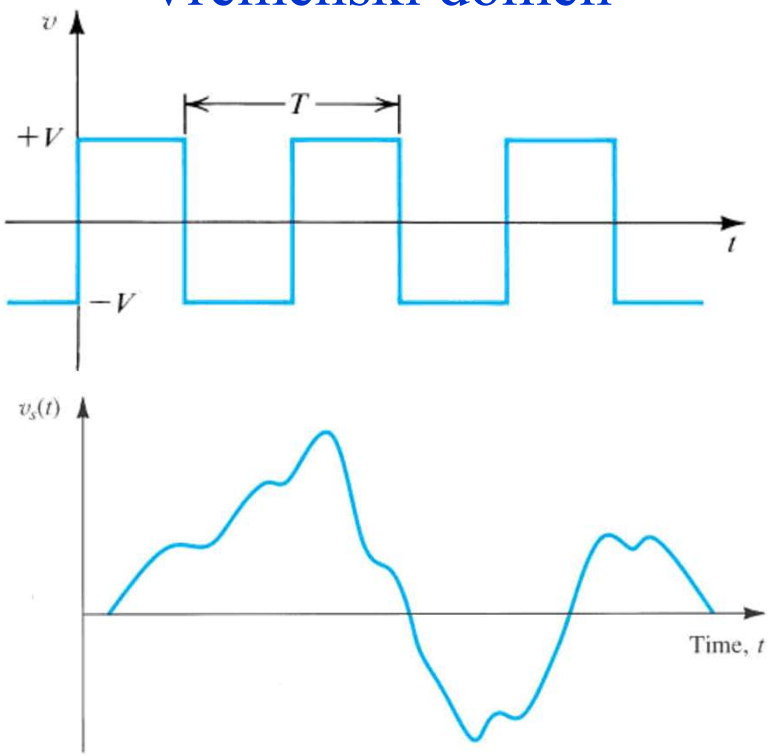

$$V = V_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Primenom Furijeove transformacije signal se iz **vremenskog domena** prikazuje u **frekvencijskom domenu**.

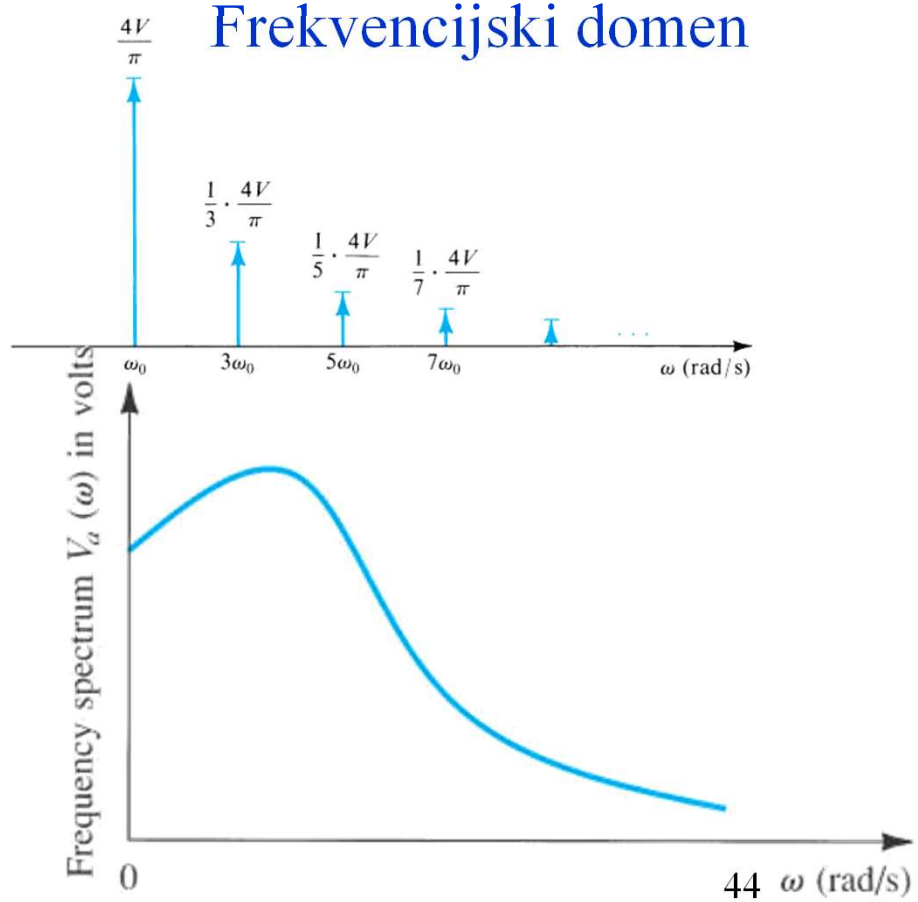
# Linearna izobličenja

Spektar periodičnog signala nije kontinualan već diskretan jer sadrži isključivo komponente čije su frekencije umnošci frekvencije signala. Neperiodični signali imaju kontinualni spektar (bezbroj sinusnih funkcija).

Vremenski domen




Frekvencijski domen



## Linearna izobličenja

Bilo koji linearni sistem je okarakterisan prenosnom funkcijom. Neophodan uslov za definisanje prenosne funkcije je da sistem bude linearan.

Ukoliko se na ulaz kola čija je prenosna funkcija T(s) dovede sinusni signal

$$v_i(t) = V_m \cdot sin(\omega t + \phi)$$

vremenska zavisnost signala na izlazu biće:

$$v_o(t) = V_m \cdot |T(j\omega)| \cdot sin(\omega t + \phi + arg\{T(j\omega)\})$$

Kada je na ulazu sinusni signal i na izlazu će se dobiti sinusni signal iste frekvencije, ω. Amplituda izlaznog signala zavisiće od modula prenosne funkcije, a faza od argumenta prenosne funkcije.

# Linearna izobličenja

S obzirom da je prenosna funkcija kompleksna veličina ona se može predstaviti preko modula i argumenta na sledeći način:

$$T(j\omega) = |T(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$

Moduo prenosne funkcije je **amplitudska karakeristika** i ona nam govori o tome koliko su se promenile amplitude pojedinih komponenti spektra.

$$A(\omega) = |T(j\omega)| = \left| \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \right|$$

Argument prenosne funkcije je **fazna karakteristika**, koja sadrži informaciju o faznom pomeraju pojedinih komponenti spektra.

$$\varphi(\omega) = \arg(T(j\omega)) = \arg\left\{ \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \right\}$$

## Linearna izobličenja

Da bi signal na izlazu bio identičan signalu na ulazu potrebno je da odziv pojačavača ima sledeći oblik:

$$v_o(t) = A \cdot v_o(t - t_0)$$

gde je A pojačanje a $t_0$ kašnjenje signala na izlazu u odnosu na ulazni signal.

Ovaj odziv može se postići ukoliko je amplitudska karakteristika ima konstantnu vrednost

$$\boxed{A(\omega) = A = const.}$$

a fazna karakteristika je linearna funkcija od frekvencije

$$\boxed{\varphi(\omega) = \arg\{T(j\omega)\} = \omega \cdot t_0}$$

## Linearna izobličenja

**Frekvencijski odziv pojačavača** je odziv na sinusne signale različitih frekvencija.

Usled prisustva reaktivnih elemenata (kondenzatora, kalemova) kao i usled činjenice da aktivne komponente poseduju parazitne kapacitivnosti pojačanje pojačavača neće biti isto na svim frekvencijama. Odavde sledi da različite frekvencijske komponente ulaznog signala neće biti identično pojačane. Izobličenja koja potiču od neidealnosti frekvencijske karakteristike pojačavača nazivaju se **linearna izobličenja** jer su posledica prisustva linearnih elemenata. Linearna izobličenja se dele na:

- **Linearna amplitudska**
- **Linearna fazna izobličenja**

# Linearna izobličenja

Idealna amplitudska karakteristika ima konstantnu vrednost unutar frekvencijskog opsega signala

$$A(\omega) = |T(j\omega)| = const$$

**Amplitudska izobličenja** nastaju u pojačavaču čija karakteristika odstupa od idealne.

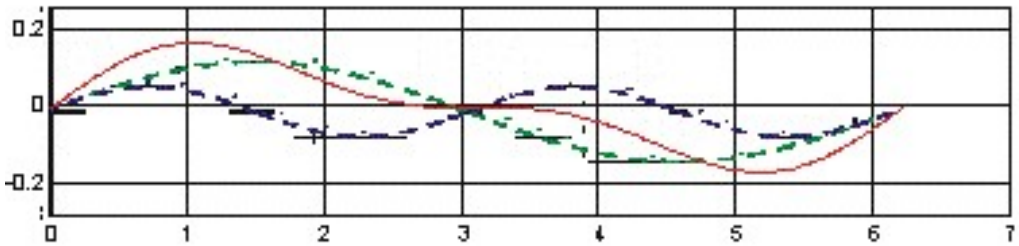
$$A(\omega) = |T(j\omega)| \neq const$$

**Fazna izobličenja** nasataju u pojačavaču čija fazna karakteristika odstupa od idealne

$$\varphi(\omega) = \arg\{T(j\omega)\} \neq \omega \cdot t_0 \pm n\pi$$

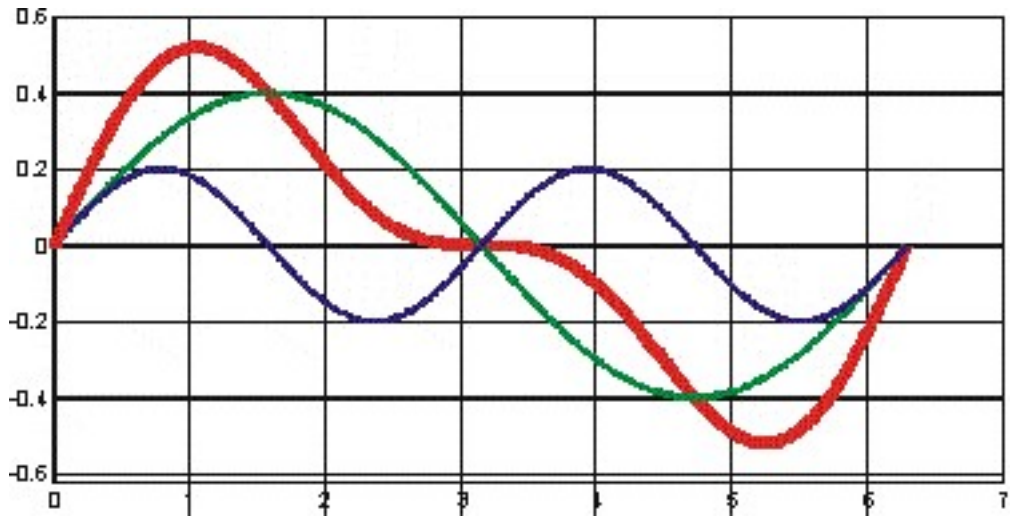
# Linearna izobličenja

**Razmotrimo primer idealizovanog pojačavača sa A=4 koji treba da pojača *složenoperiodični* signal**




Ulazni signal

$$v_u = 0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t)$$

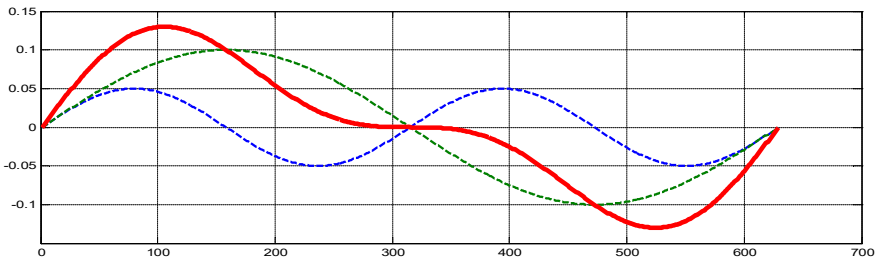



Izlaz

$$v_{iz} = A \cdot v_u =$$
$$= 4 \cdot (0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t))$$

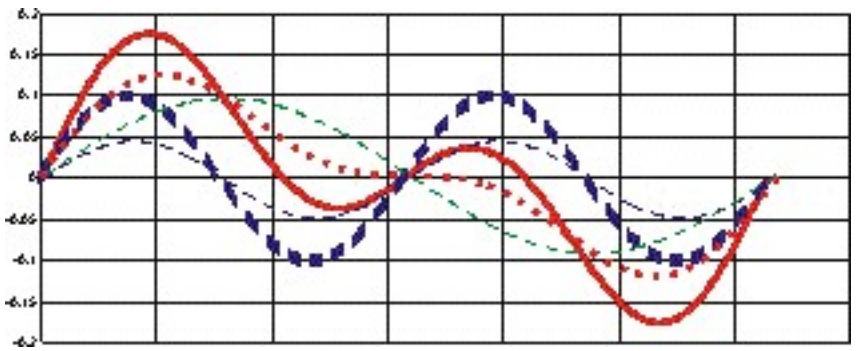
# Linearna izobličenja

## Različito pojačanje na različitim frekvencijama




Ulazni signal

$$v_u(\omega t) = 0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t)$$



Izlazni signal

$$v_i(\omega t) = 1 \cdot v_u(\omega t) + 2 \cdot v_u(2\omega t)$$

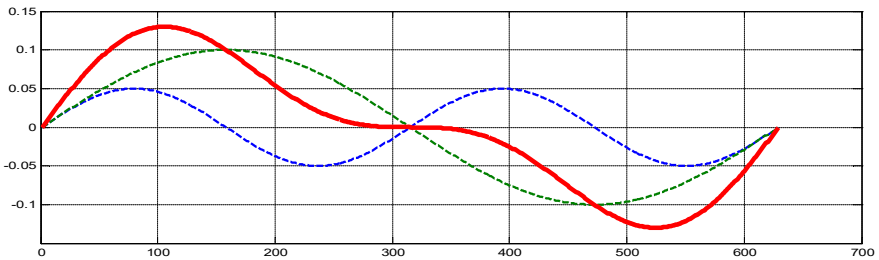
$$v_i(\omega t) = 1 \cdot \left(0.1 \cdot \sin(\omega t)\right) +$$

$$+ 2 \cdot \left(0.05 \cdot \sin(2\omega t)\right)$$

**Na izalazu linearnog pojačavača koji različito pojačava signale različitih frekvencija javljaju se linearna amplitudska izobličenja.**
**(biće reči i nešto kasnije)**

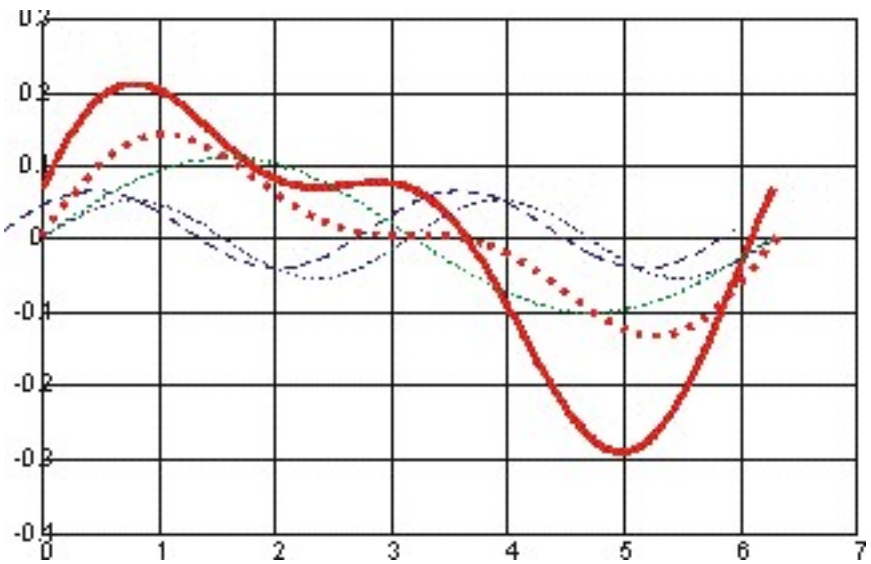
# Linearna izobličenja

## Različito kašnjenje na različitim frekvencijama




Ulazni signal

$$v_u = 0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t)$$




Izlazni signal

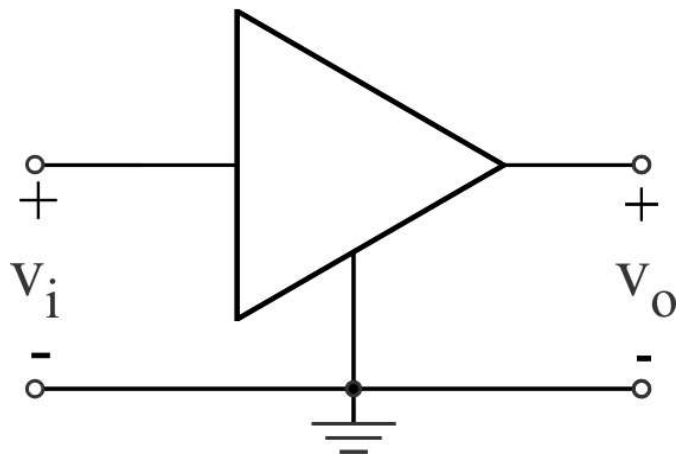
$$v_i = 2 \cdot \left(v_u(\omega t) + v_u(2\omega t + \pi/4)\right)$$

$$v_i = 2 \cdot \left(0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t + \pi/4)\right)$$

## Nelinearna izobličenja

**Prenosna karakteristika** predstavlja zavisnost izlazne veličine od ulazne veličine. Pri tome se podrazumeva da se ulazna i izlazna veličina ne menjaju sa vremenom pa se koristi termin **statička prenosna karakteristika** (dc transfer characteristic).

$$v_o = f(v_i)$$



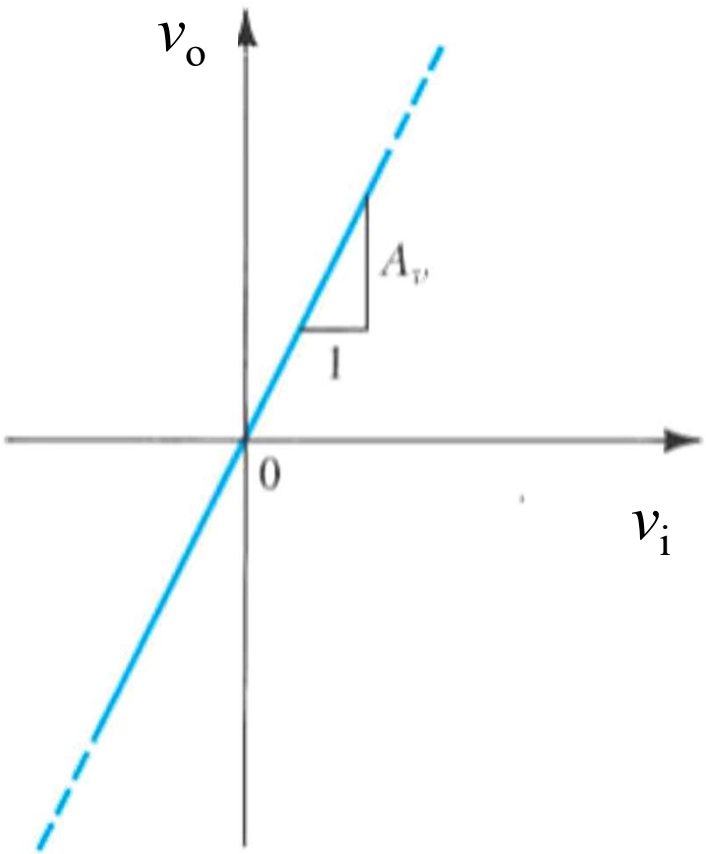
# Nelinearna izobličenja

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača je prava linija.

**Linearni pojačavač** je idealni pojačavač jer je talasni oblik izlaznog signala isti kao talasni oblik ulaznog signala.

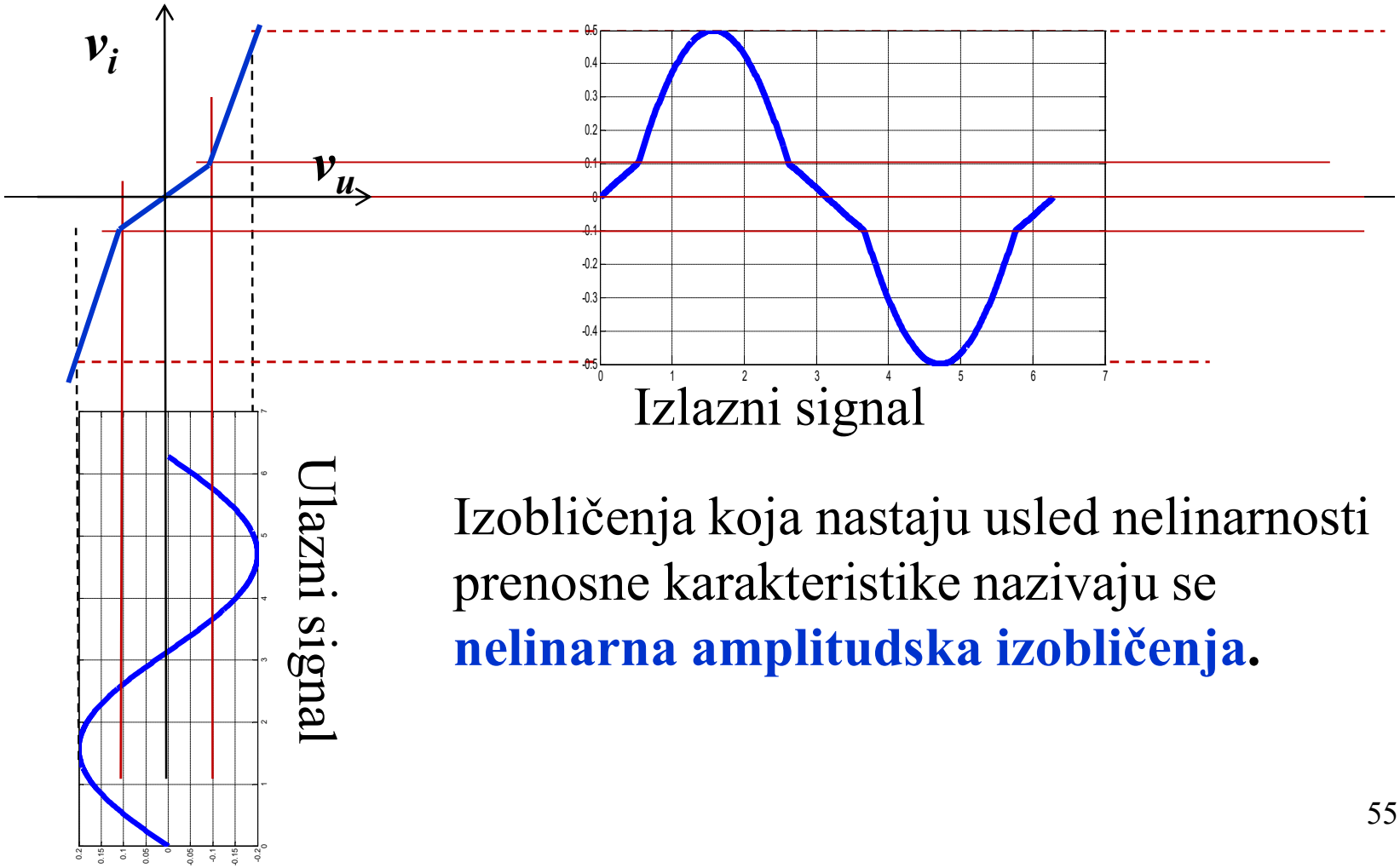
Nagib prenosne karakteristike linearnog pojačavača predstavlja pojačanje pojačavača.

$$v_o = A_v \cdot v_i$$



## Nelinearna izobličenja

Ukoliko prenosna karakteristika nije linearna talasni oblik signala na izlazu razlikovaće se od talasnog oblika signala na ulazu.

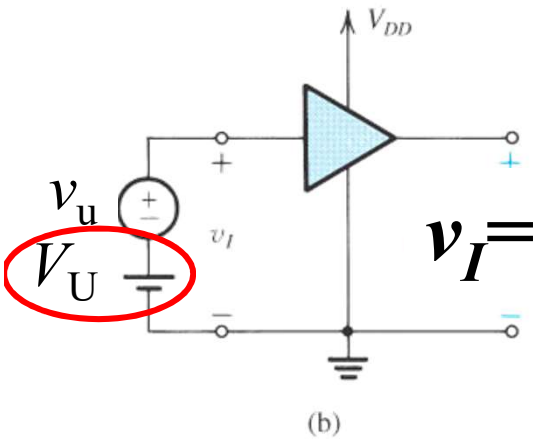



Izobličenja koja nastaju usled nelinarnosti prenosne karakteristike nazivaju se **nelinarna amplitudska izobličenja**.

# Nelinearna izobličenja

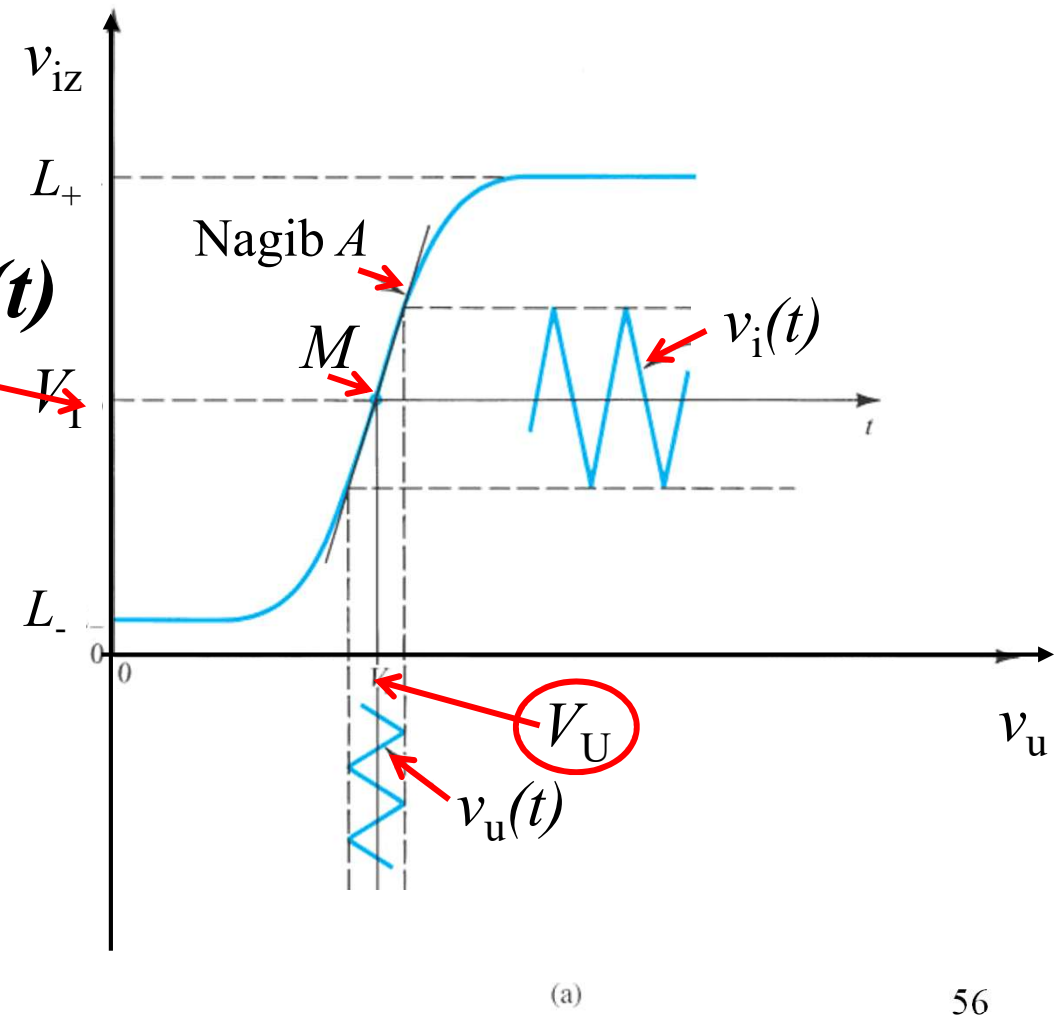
## Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

## Prenosna karakteristika realnih pojačavača je *nelinearna*




$$v_I = V_I + v_i(t)$$

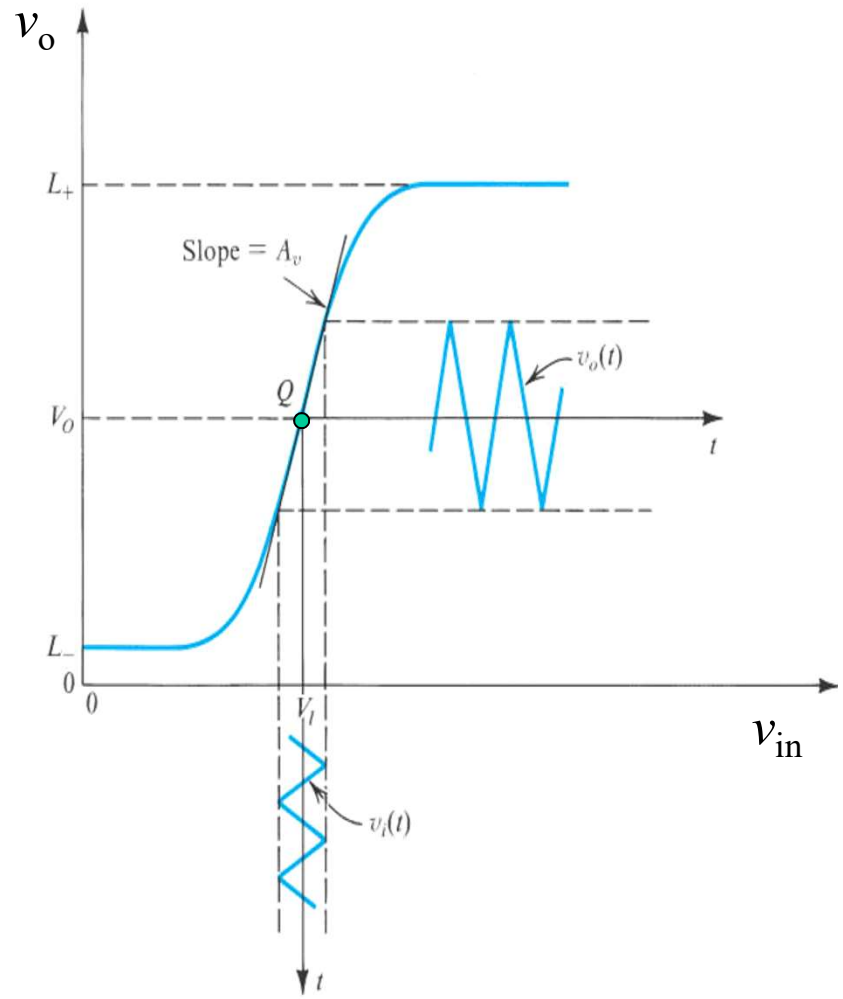
$$A = \frac{\Delta v_i}{\Delta v_u} = \frac{dv_i}{dv_u} = \frac{v_i(t)}{v_u(t)}$$



# Nelinearna izobličenja

Prenosna karakteristika realnih pojačavača može da se tretira kao linearna samo za male signale (kao na slici).

Po pravilu radna tačka (označena sa Q) se podešava tamo gde je karakteristika najlinearnija, a to je obično na sredini karakteristike i tamo gde je nagib najveći.

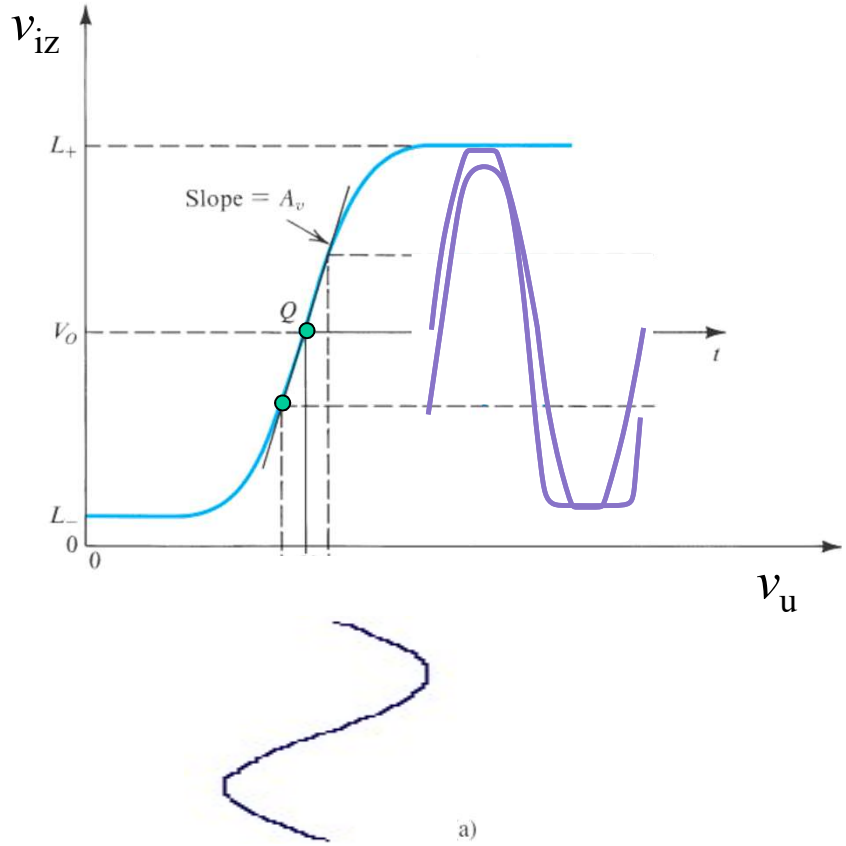



(a)

# Nelinearna izobličenja

Po pravilu radna tačka se podešava tamo gde je karakteristika najlinearnija, gde je nagib najveći a to je obično na sredini prenosne karakteristike.

Nelinearnost signala je veća kada je ulazni signal veći i radna tačka dalja od sredine prenosne karakteristike. U tom slučaju veća su nelinearna izobličenja.



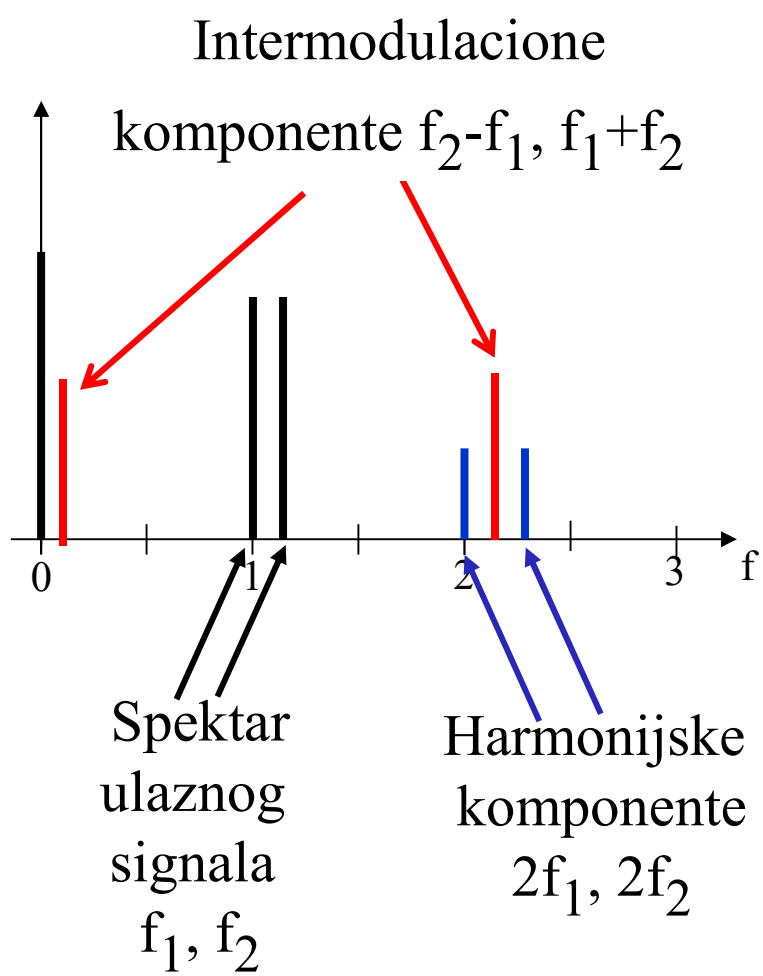
## Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodični signal

U sprektru izlaznog signala pojavljuju se komponente kojih nema u ulaznom signalu.

Nelinearna izobličenja se mogu podeliti na:

**-Harmonijska izobličenja**
(komponente spektra na frekvencijama koje su umnošci frekvencija ulaznog signala)

**- Intermodulaciona izobličenja**
(komponente spektra na frekvencijama koje odgovaraju zbiru ili razlici frevkencija ulaznog signala)



# UVOD

Osnovna pitanja

1. Kontrolisani generatori (16-18).
2. Ekvivalentna kola idealnog i realnog naponskog i strujnog pojačavača (28-30).

Ostala ispitna pitanja

1. Model četvoropola okarakterisan "h " parametrima (22,23).
2. Ekvivalentna kola idealnog i realnog strujnog pojačavača (32).
3. Ekvivalentna kola idealnog i realnog transkonduktansnog pojačavača (33).
4. Ekvivalentna kola idealnog i realnog transrezistansnog pojačavača (34).
5. Linearna izobličenja (48,49).
6. Nelinearna izobličenja i njihov uticaj na složenoperiodičan signal (54,55,59).