

Osnovi elektronike

dr Srđan Đorđević, docent

Osnovi elektronike

Literatura:

Основна литература:

1. Презентација са предавања

<http://leda.elfak.ni.ac.rs/?page=education/elektronika/elektronika.htm>

2. В. Литовски, *Основи електронике*, Академска мисао, 2006, ISBN: 86-7466-227-7

3. В. Павловић, et. al., *Практикум лабораторијских вежби из Основа електронике*, Електронски факултет Ниш, 2012.

Osnovi elektronike

Literatura:

Додатна литература:

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%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%
Kolokvijum I	20%
Kolokvijum II	20%

Ispit:

Zadaci	20%
Teorija	20%

Osnovi elektronike

Svako predavanje završava se slajdovima na kojima su navedena:

Tri Osnovna pitanja

Do deset ispitnih pitanja

Po završetku svih predavanja spisak svih pitanja biće dostupan na sajtu leda.elfak.ni.ac.rs/education

Osnovi elektronike

Konsultacije:

ponedeljak, četvrtak, petak 11-12h kabinet 336

najbolje da se najavite preko 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. Ekvivalentna kola pojačavača
- f. Tipovi pojačavača prema tipu signala
- g. Frekvencijske karakteristike i linearna izobličenja
- h. Prenosna karakteristika i nelinearna izobličenja
- i. Klasifikacija pojačavača

Pojačanje signala

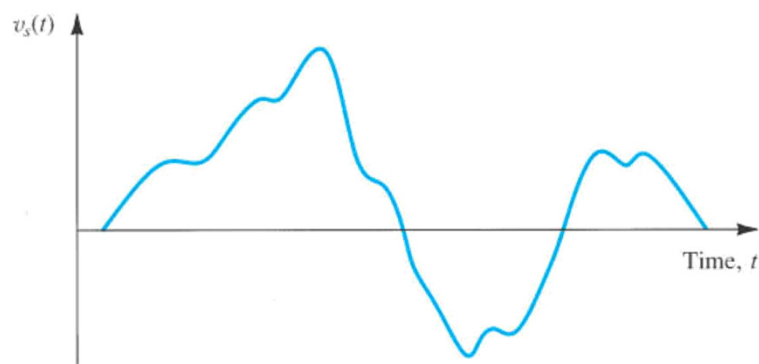
Tipovi signala

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

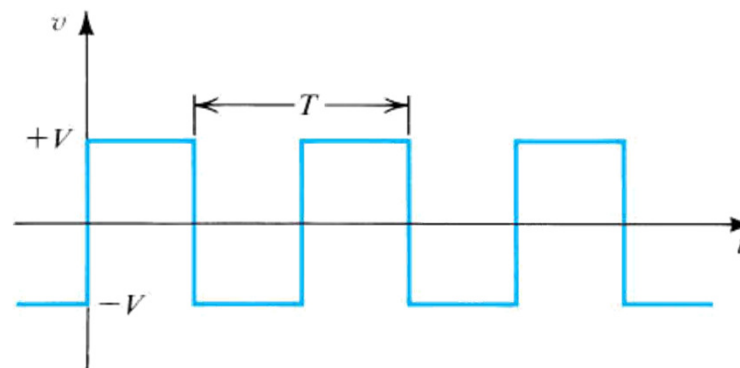
Analogni signali - kontinualno promenjive veličine

Digitalni signali - signali sa jednim ili više diskretnih nivoa

Analogni signali



Digitalni signali



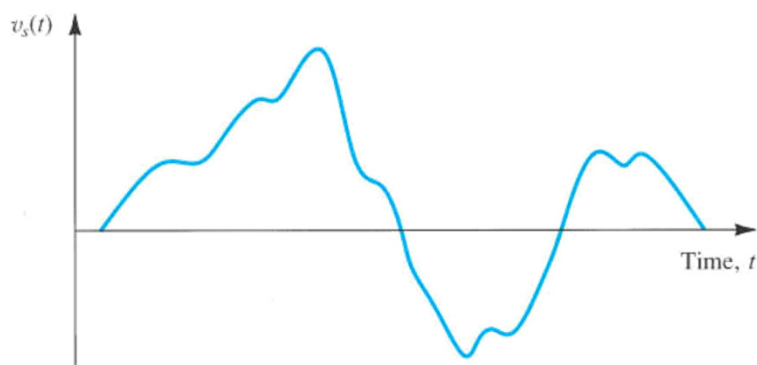
Pojačanje signala

Tipovi signala

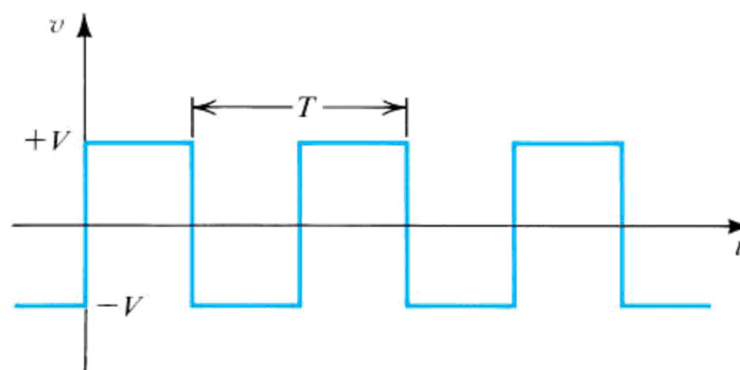
U praksi se najviše pojavljuje *binarni digitalni signal* koji ima dva diskretna amplitudska nivoa, koji se nazivaju logička nula i logička jedinica.

Analogni signal obično predstavlja veličine kao što su temperatura, pritisak, vlažnost, intenzitet svetlosti, intenzitet zvuka. Najčešće je neophodno povećati nivo signala na izlazu *transdjusera*.

Analogni signali



Digitalni signali



Pojačanje signala

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 analognih 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 sensorima najpre obraditi u analognom domenu a nakon toga *analogno-digitalnim konvertorom* konvertovati signal iz analognog u digitalni domen.

Pojačanje 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*).

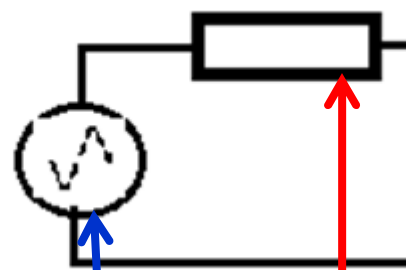
Nakon obrade signala u elektronskom kolu on se ponovo može konvertovati u istu ili neku drugu fizičku veličinu.

Pojačanje signala

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



=



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

Generator +

konačna izlazna otpornost

Pojačanje signala

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

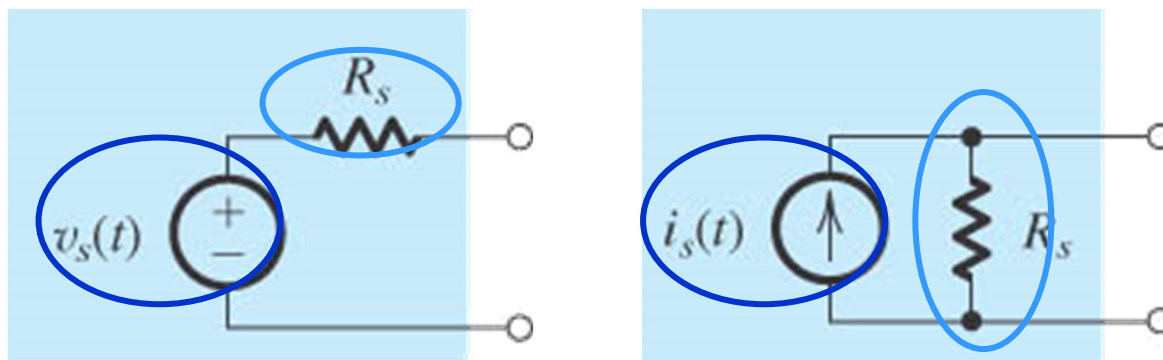
1) generator napona

2) generator struje

Svaki realni generator električnog signala može se predstaviti ekvivalentim:

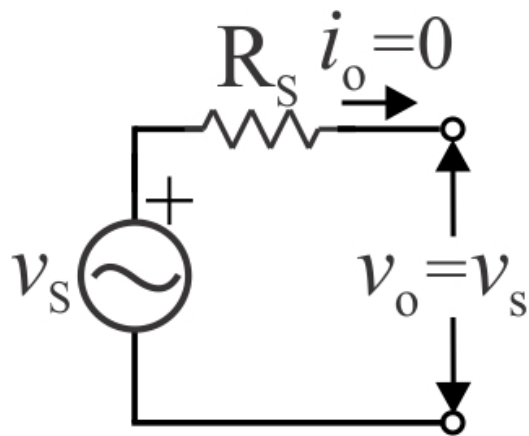
1) naponskim generatorom

2) strujnim generatorom.



Realni generator = idealni + unutrašnja otpornost

Pojačanje signala

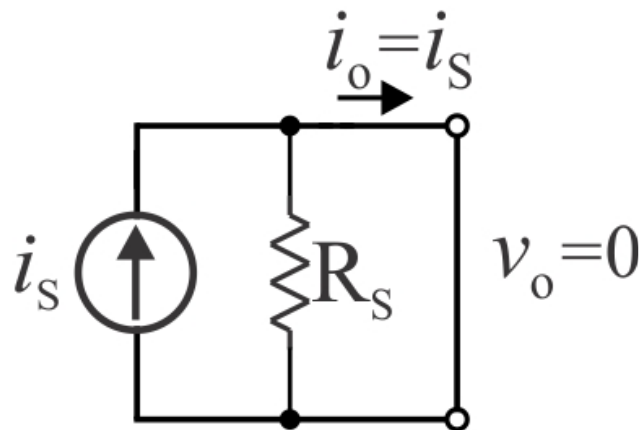


Tevenenova teorema

$$i_o(t) = 0$$

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

v_o je napon praznog hoda



Nortonova teorema

$$v_o(t) = 0$$

$$i_{iO}(t) = i_s(t)$$

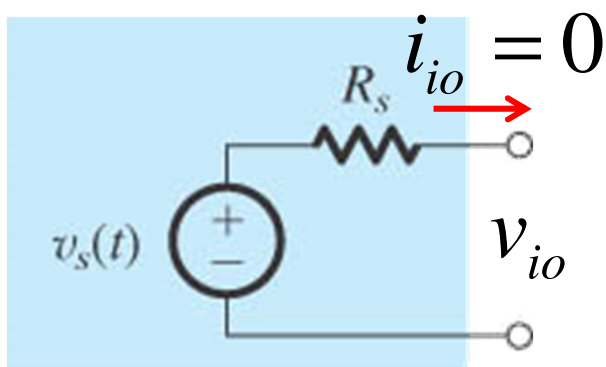
i_o je struja kratkog spoja

Pojačanje signala



Primer 1.2: Merenjem je utvrđeno da je napon praznog hoda generatora $v_{io}=10\text{mV}$ i da je struja kratkog spoja $i_{ik}=10\mu\text{A}$.

Odrediti vrednosti parametara modela ekvivalentnog Thevenenovog generatora.



(a)

$$v_s - R_s \overset{0}{i_{io}} - v_{io} = 0$$

$$v_s - v_{io} = 0$$

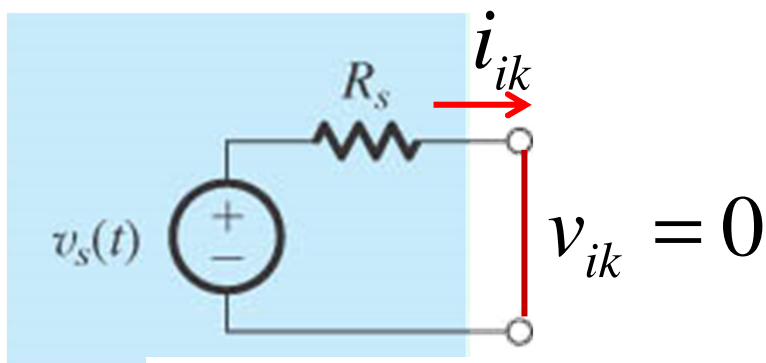
$$v_s = v_{io} = 10\text{mV}$$

Pojačanje signala



Primer 1.2: Merenjem je utvrđeno da je napon praznog hoda generatora $v_{io}=10\text{mV}$ i da je struja kratkog spoja $i_{ik}=10\mu\text{A}$.

Odrediti vrednosti parametara modela ekvivalentnog Thevenenovog generatora.



$$v_s - R_s i_{ik} - \overset{0}{\cancel{v_{ik}}} = 0$$
$$v_s - R_s i_{ik} = 0$$

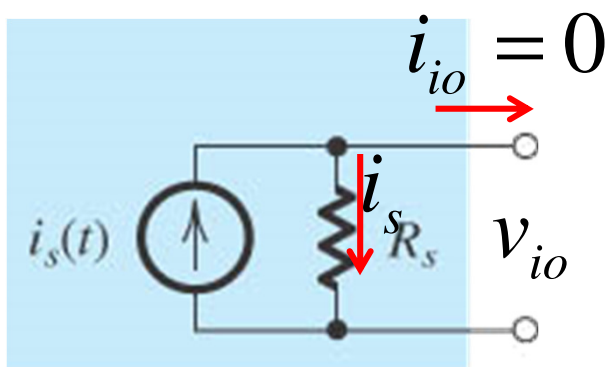
$$R_s = \frac{v_s(t)}{i_{ik}(t)} = \frac{v_{io}(t)}{i_{ik}(t)} = \frac{10\text{mV}}{10\mu\text{A}} = 1\text{k}\Omega$$

Pojačanje signala



Primer 1.3: Merenjem je utvrđeno da je napon praznog hoda generatora $v_{io}=10\text{mV}$ i da je struja kratkog spoja $i_{ik}=10\mu\text{A}$.

Odrediti vrednosti parametara modela ekvivalentnog Nortonovog generatora.



(b)

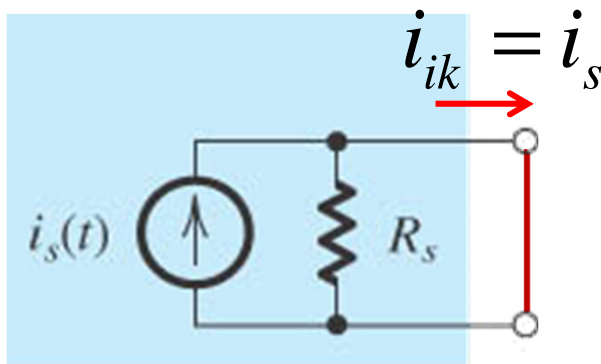
$$R_s i_s - v_{io} = 0$$
$$R_s = \frac{v_{io}(t)}{i_s(t)} = \frac{10\text{mV}}{10\mu\text{A}} = 1\text{k}\Omega$$

Pojačanje signala



Primer 1.3: Merenjem je utvrđeno da je napon praznog hoda generatora $v_{io}=10\text{mV}$ i da je struja kratkog spoja $i_{ik}=10\mu\text{A}$.

Odrediti vrednosti parametara modela ekvivalentnog Nortonovog generatora.



(b)

$$i_s = i_{ik} = 10\mu\text{A}$$

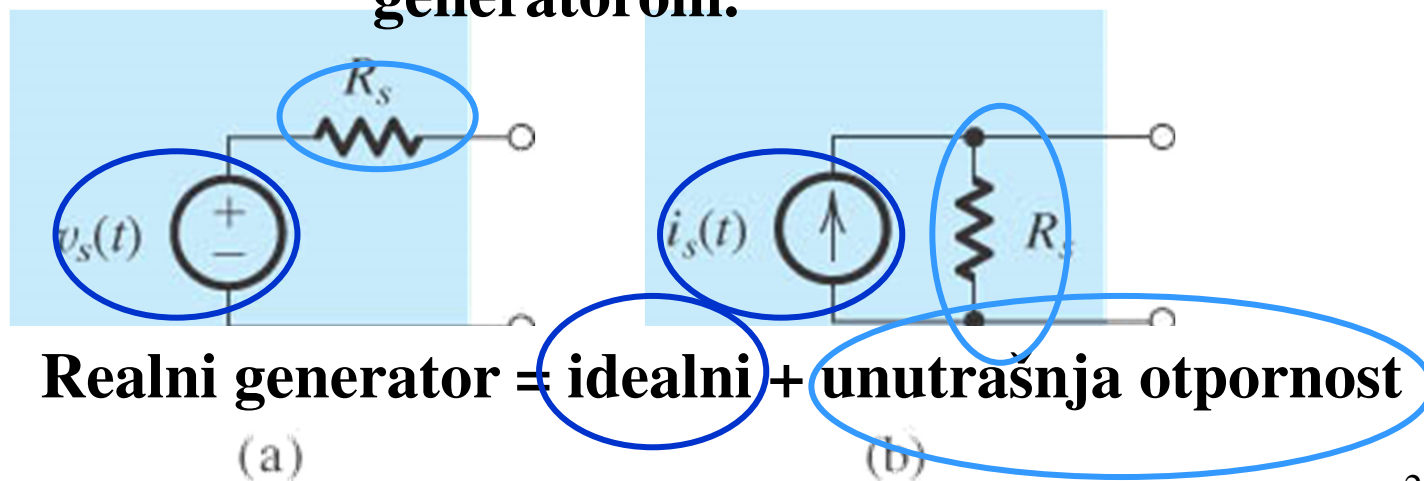
$$R_s = \frac{v_{io}(t)}{i_s(t)} = \frac{10\text{mV}}{10\mu\text{A}} = 1\text{k}\Omega$$

Pojačanje signala

Da li je iz ovog primera jasno da svaki *generator signala* može da se predstavi kao generator napona ili generator struje?

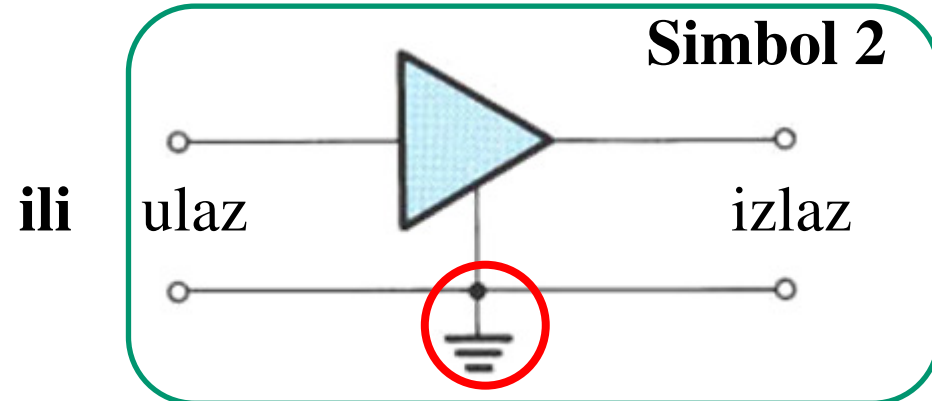
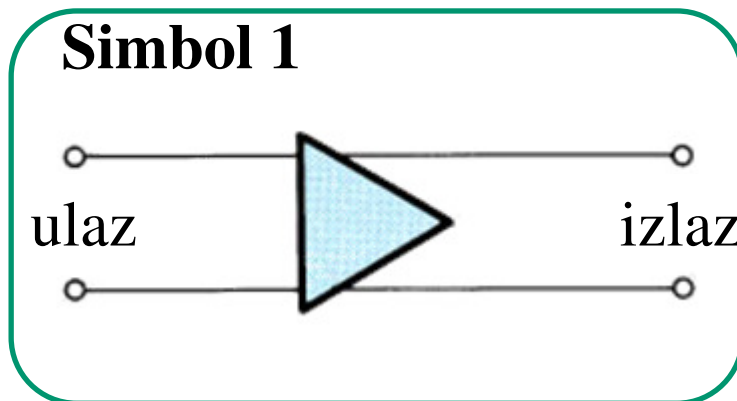
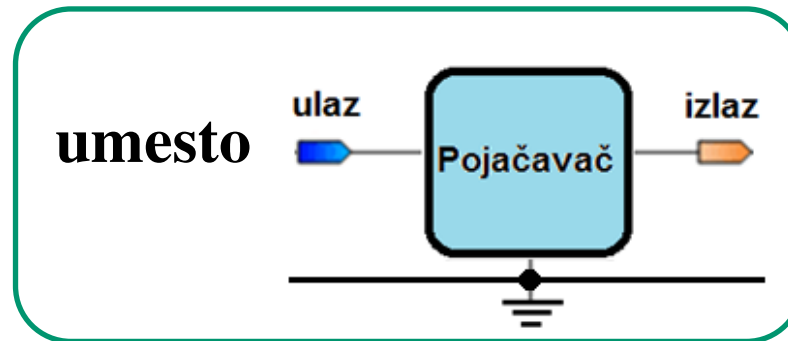
Svaki realni generator električnog signala, bilo koja dva izvoda, na kojima može da se izmere napon praznog hoda i struja kratkog spoja može se predstaviti ekvivalentim

Naponskim (Thevenen) ili Strujnim (Norton) generatorom.



Pojačanje signala

Simbol pojačavača :



Uzemljenje, masa, referentni čvor!!!

Uloga pojačavača:

Da *pojača* ulazni signal

(napon, struja)

BEZ IZOBLIČENJA!

Kakve karakteristike treba da ima da bi obavio tu ulogu?

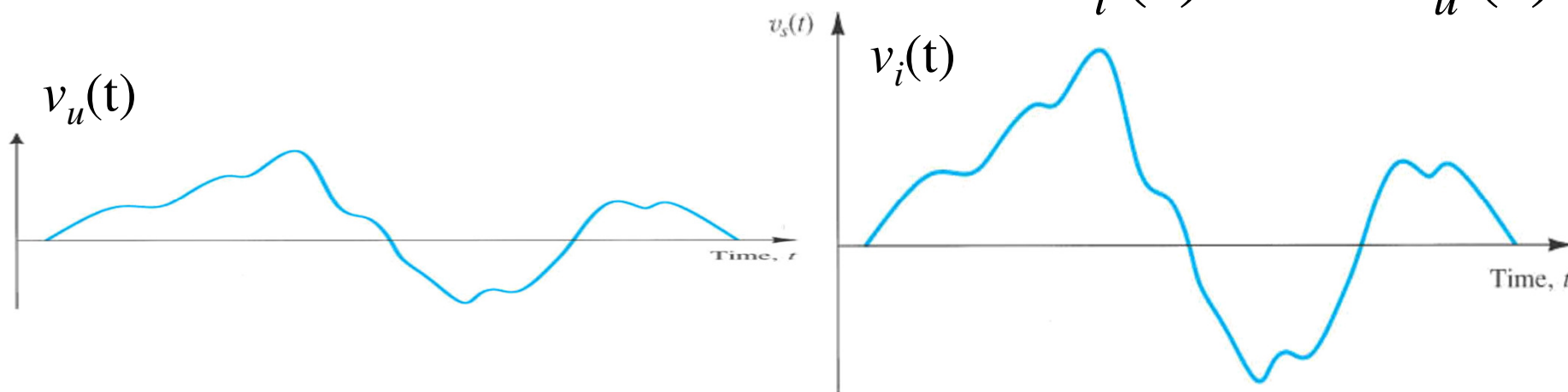
Pojačanje signala

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 $A = const.$

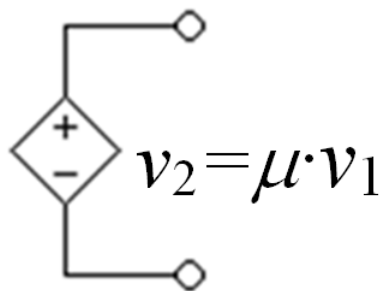
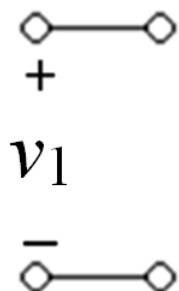
Kontrolisani generatori

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:

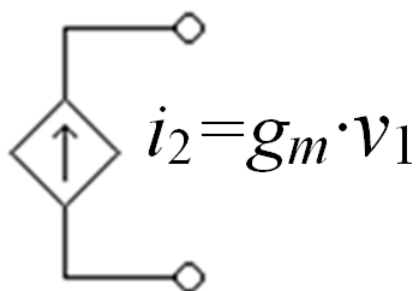
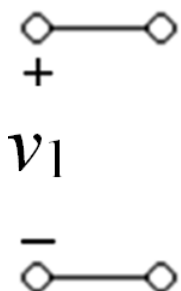
Kontrolisani generatori

Naponom kontrolisani naponski



Izlazni napon kontrolisana je ulaznim naponom. Parametar μ je naponsko pojačanje.

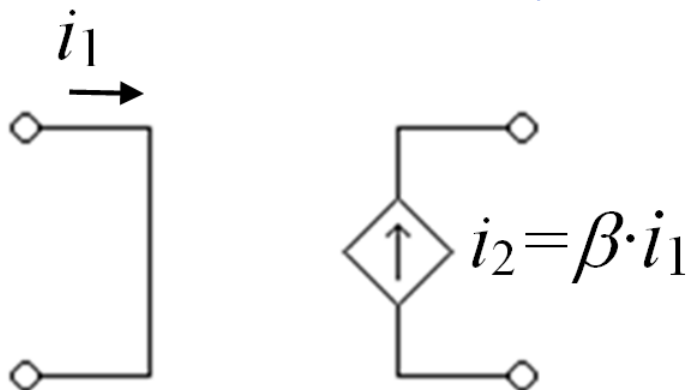
Naponom kontrolisani strujni



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

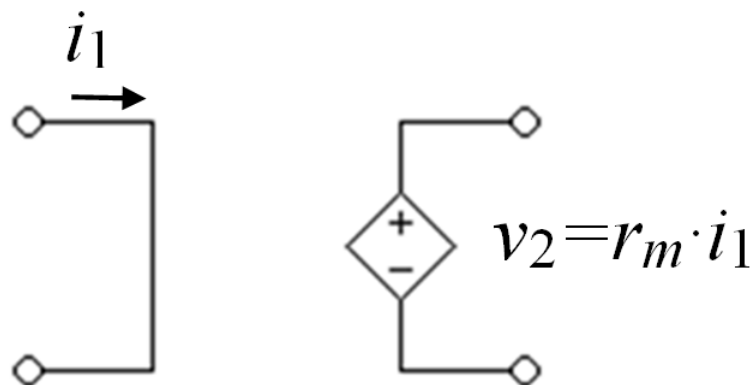
Kontrolisani generatori

Strujom kontrolisani strujni



Izlazna struja kontrolisana je ulaznom strujom. Parametar β je strujno pojačanje.

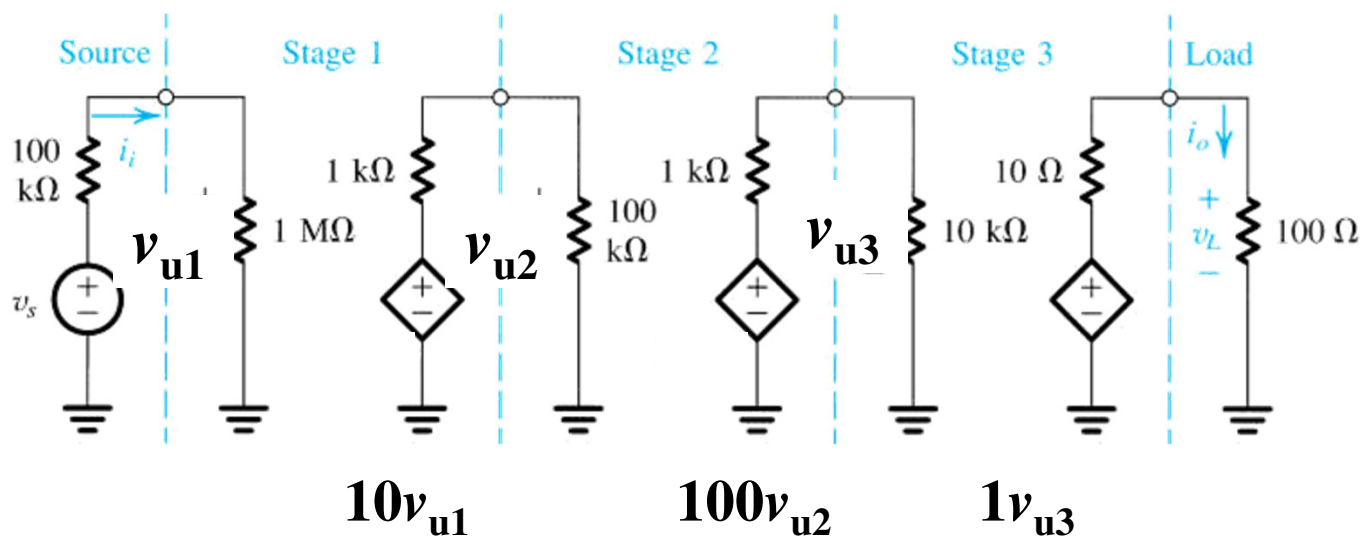
Strujom kontrolisani naponski



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

Pojačanje signala

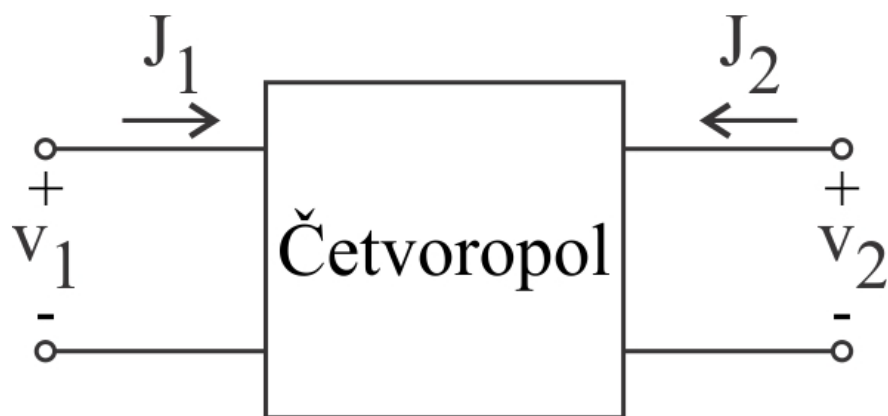
Zadatak: Izračunati ukupno naponsko i pojačanje snage trostepenog pojačavača sa slike pobuđenog izvorom čija je izlazna otpornost 100k i opterećenog potrošačem od 100Ω .



(743,6 V/V; 57,4 dB; $66,9 \cdot 10^8$ W/W; 98,3dB)

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 .

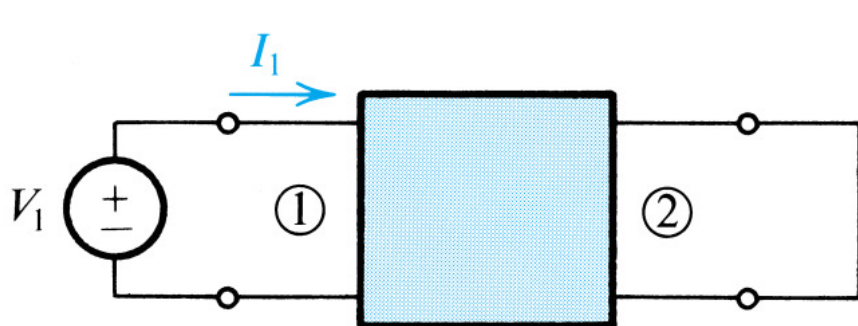
y_{12} je *povratni parametar* jer daje zavisnost ulazne veličine J_1 od izlazne veličine v_2 .

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 .

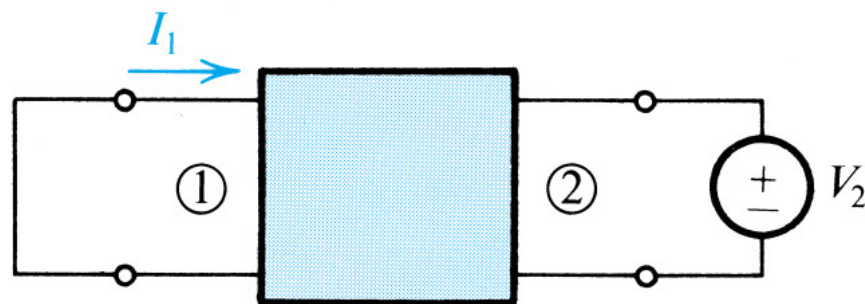
Modeli četvoropola

Parametri četvoropola se određuju tako što se na pristupima vežu nezavisni generatori koji stvaraju zadate napone ili struje.



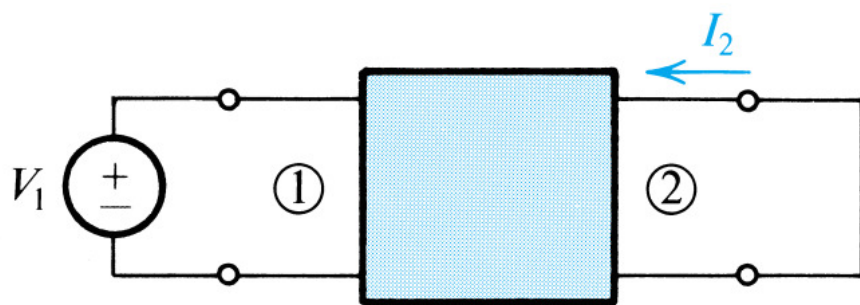
$$y_{11} = \frac{I_1}{V_1} \Big|_{V_2=0}$$

(b)

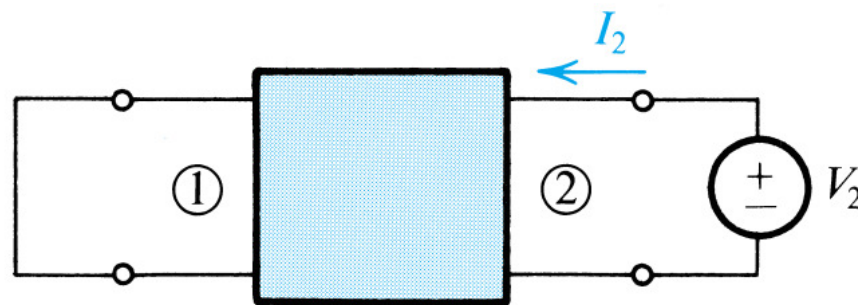


$$y_{12} = \frac{I_1}{V_2} \Big|_{V_1=0}$$

(c)



$$y_{21} = \frac{I_2}{V_1} \Big|_{V_2=0}$$



$$y_{22} = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{V_1=0}$$

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.

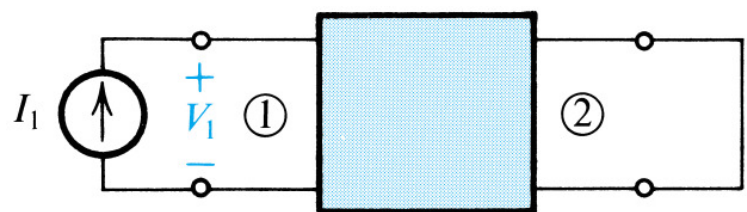
h_{12} je *povratni parametar* jer daje zavisnost ulazne veličine J_1 od izlazne veličine v_2 . Nema dimenzije jer je odnos dva napona.

h_{21} je *prenosni parametar* jer daje zavisnost izlazne veličine J_2 od ulazne veličine v_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

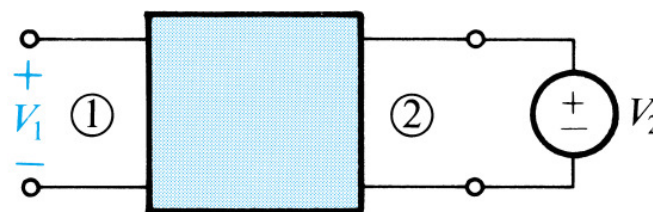
Modeli četvoropola

Parametri četvoropola se određuju tako što se na pristupima vežu nezavisni generatori koji stvaraju zadate napone ili struje.



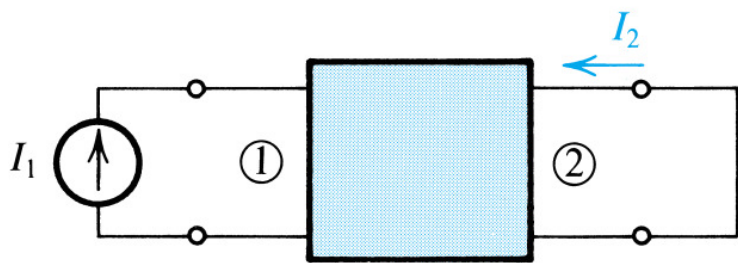
$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0}$$

(b)

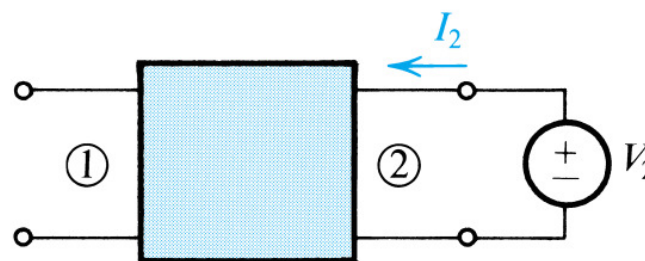


$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0}$$

(c)



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



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

Pojačanje 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.

Pojačanje signala

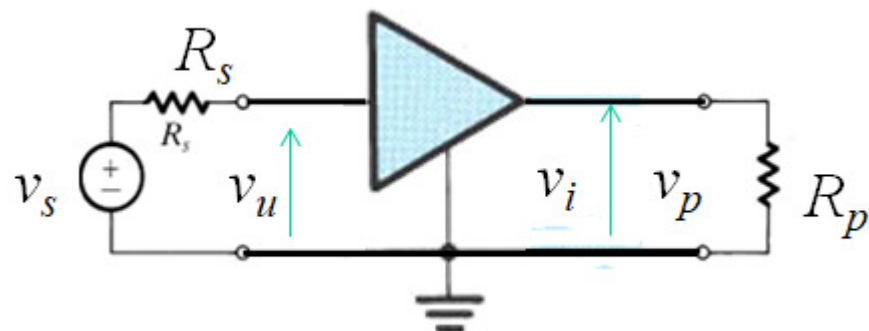
Pojačavač napona

ULAZ

IZLAZ

NAPON

NAPON



Pojačanje napona

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

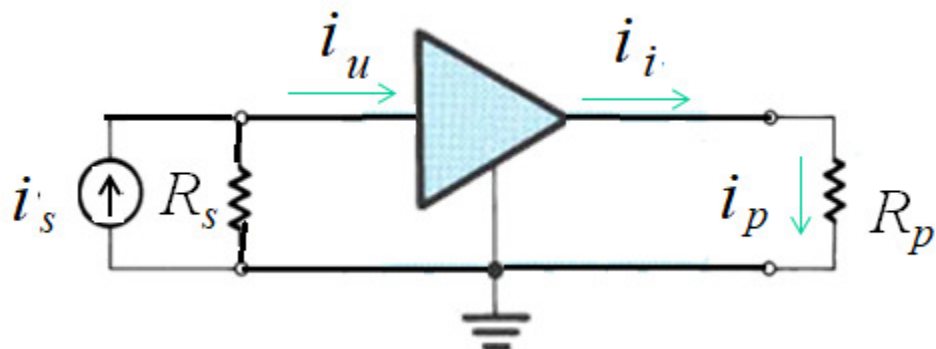
Pojačavač struje

ULAZ

IZLAZ

STRUJA

STRUJA



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

Pojačanje struje

Pojačanje signala

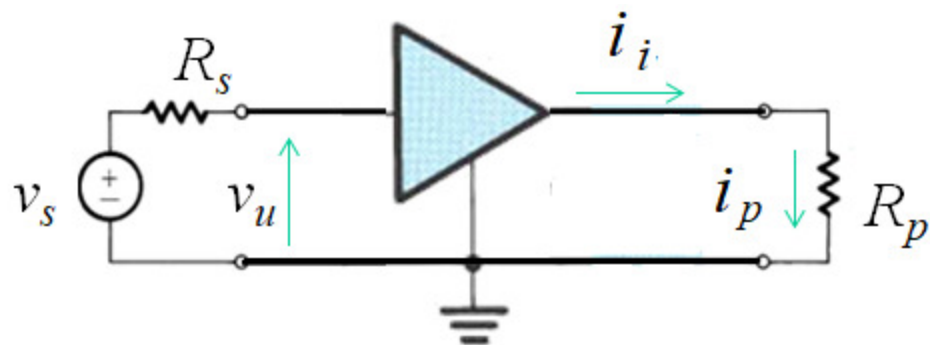
Transkonduktanski

ULAZ

IZLAZ

NAPON

STRUJA



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

Pojačanje napona u struju

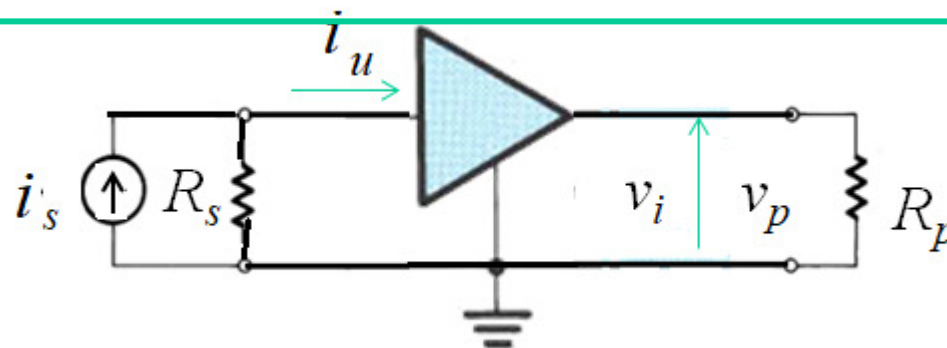
Transrezistantni

ULAZ

IZLAZ

STRUJA

NAPON



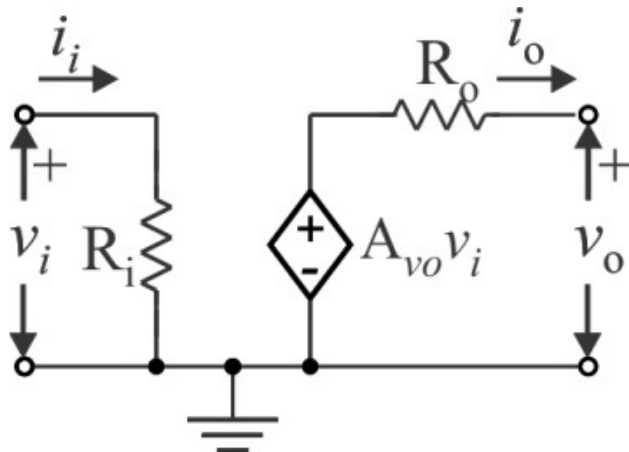
$$R_m = \frac{v_o(t)}{i_i(t)}$$

Pojačanje struje u napon

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

Naponski: $V_i \rightarrow V_o$

Realni



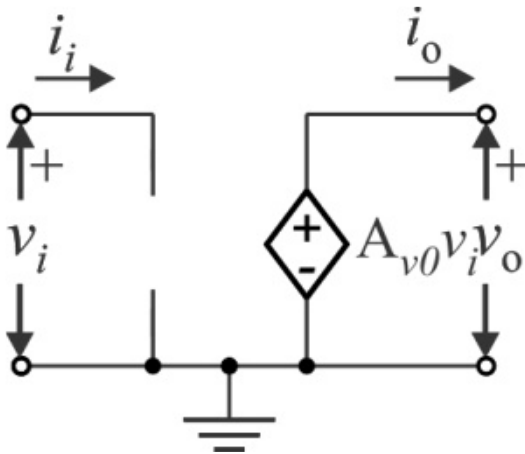
$$A_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{i_o = 0}$$

Naponsko pojačanje
otvorenog kola

R_i Ulazna otpornost

R_o Izlazna otpornost

Idealni



$$R_i \nearrow \infty$$

$$R_o = 0$$

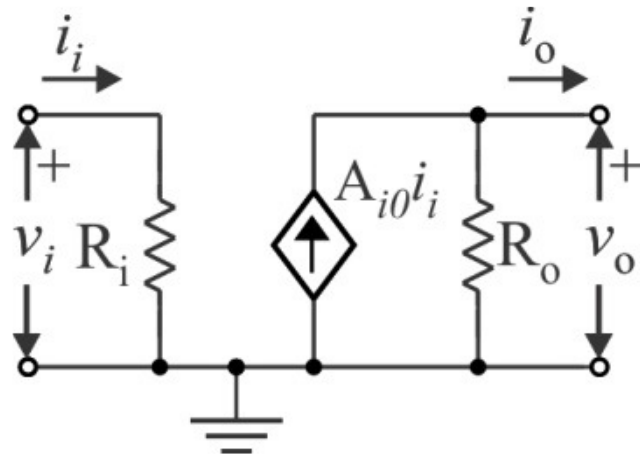
$$A_v = A_{vo} = \frac{v_o}{v_i}$$

Daje maksimalno pojačanje napona.

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

Strujni: $i_i \rightarrow i_o$

Realni



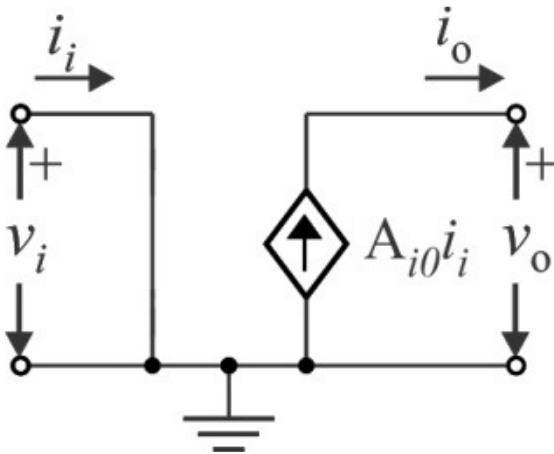
$$A_i = A_{i0} = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{v_o = 0} \quad \text{Strujno pojačanje}$$

kratkospojenog kola

R_i Ulazna otpornost

R_o Izlazna otpornost

Idealni



$$R_i = 0$$

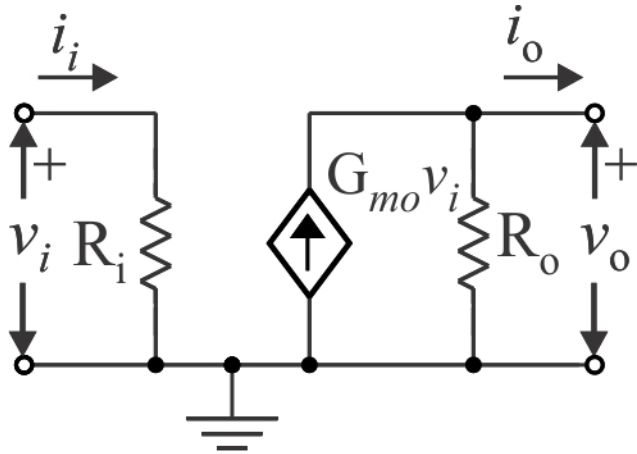
$$R_o \nearrow \infty$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = A_{i0}$$

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

Transkonduktanski: $v_i \rightarrow i_o$ (napon u struju)

Realni

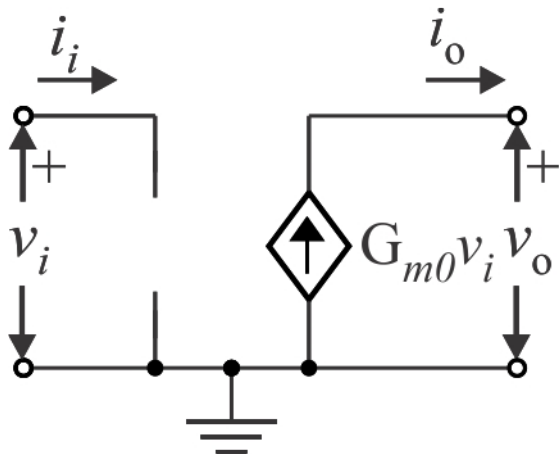


$$G_m = G_{m0} = \left. \frac{i_o}{v_i} \right|_{v_o = 0} \quad \text{Transkonduktansa kratkospojenog kola}$$

R_i Ulazna otpornost

R_o Izlazna otpornost

Idealni



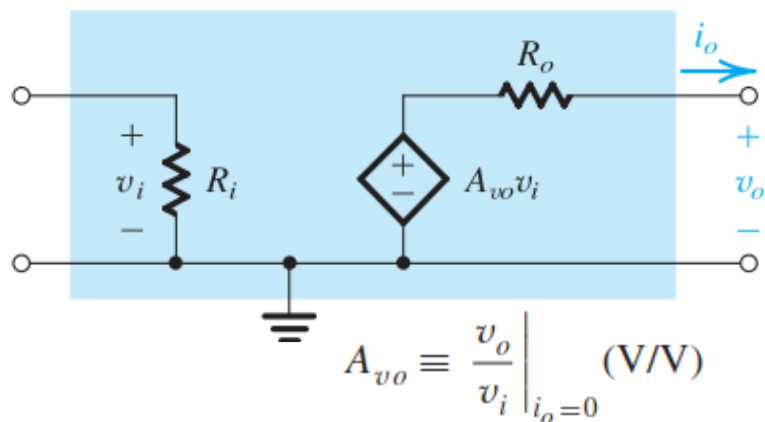
$$R_i \nearrow \infty$$

$$R_o \nearrow \infty$$

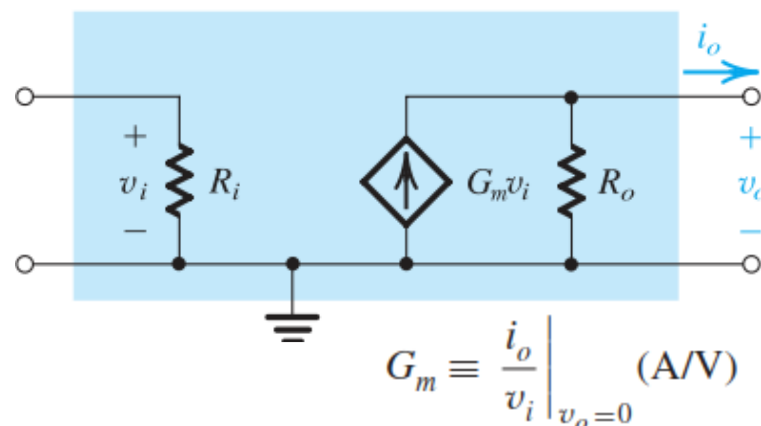
$$G_m = \frac{i_o}{v_i} = G_{m0}$$

Modeli pojačavača

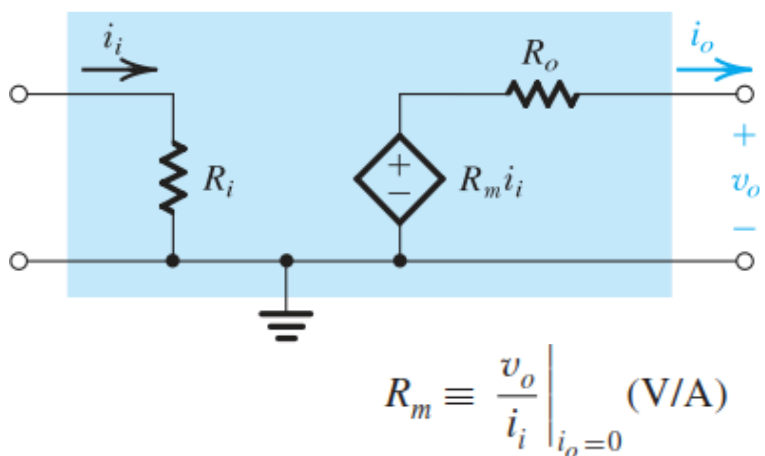
Naponski pojačavač



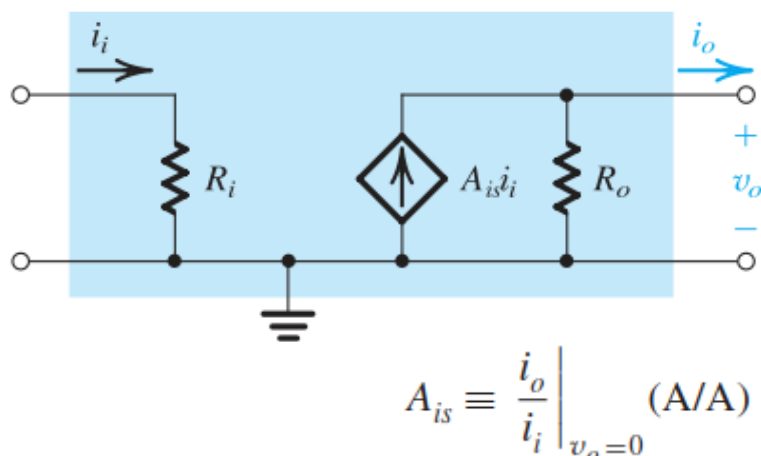
Transkonduktanski pojačavač



Transrezistanski pojačavač



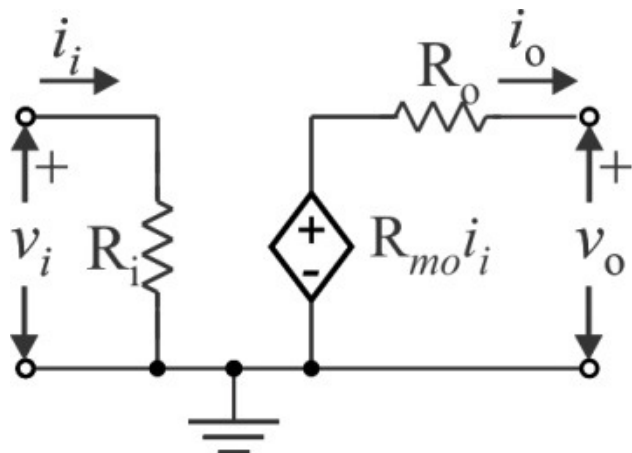
Strujni pojačavač



Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

Transrezistansni: $I_u \rightarrow V_i$ (struja u napon)

Realni

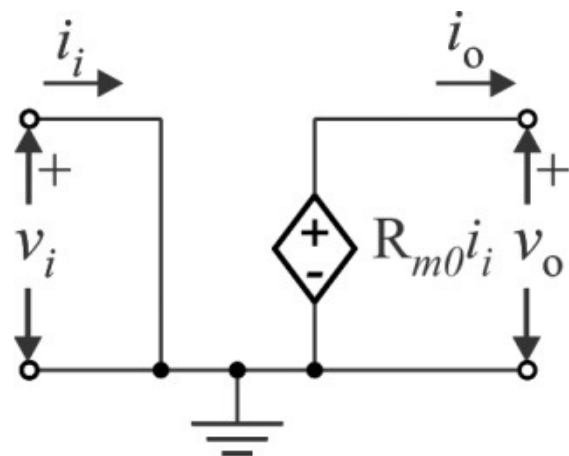


$$R_m = R_{m0} = \left. \frac{v_o}{i_i} \right|_{i_o = 0} \quad \text{Transrezistansa otvorenog kola}$$

R_i Ulazna otpornost

R_o Izlazna otpornost

Idealni



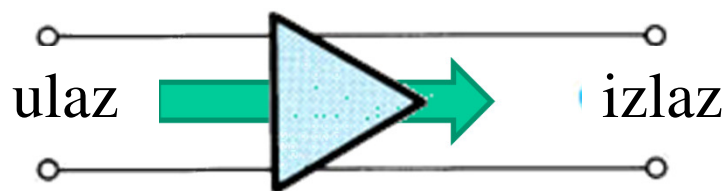
$$R_i = 0$$

$$R_o = 0$$

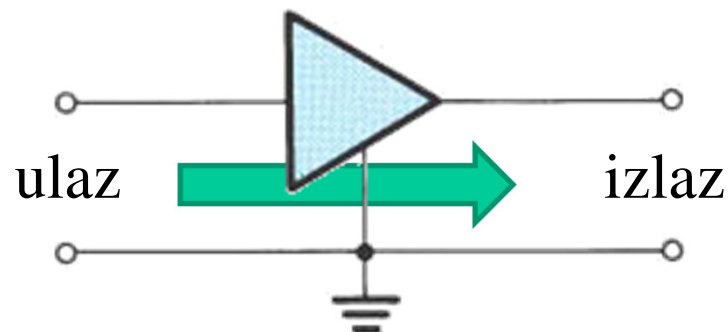
$$R_m = \frac{v_o}{i_i} = R_{m0}$$

Pojačanje signala

Svi prikazani modeli su *unilateralni*: prenose signal samo u jednom pravcu - sa ulaza prema izlazu.



(a)

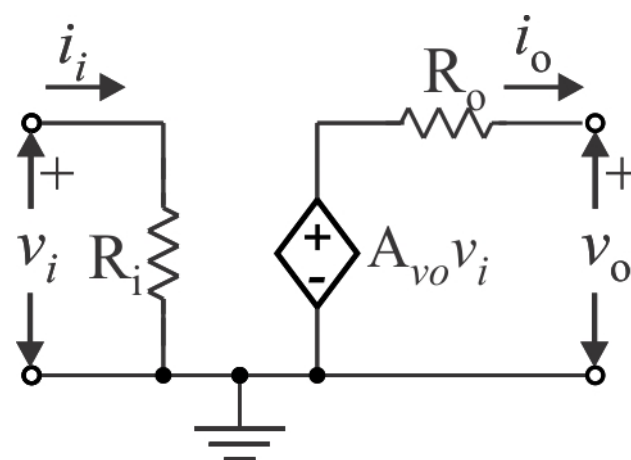
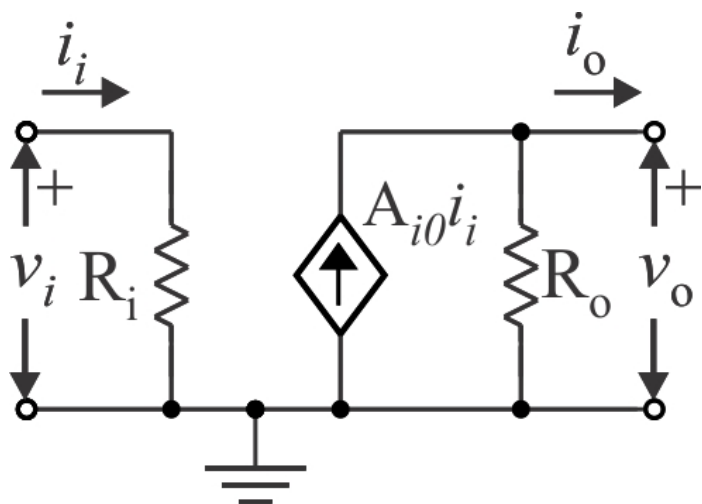


(b)

Pojačanje signala

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

Primer:

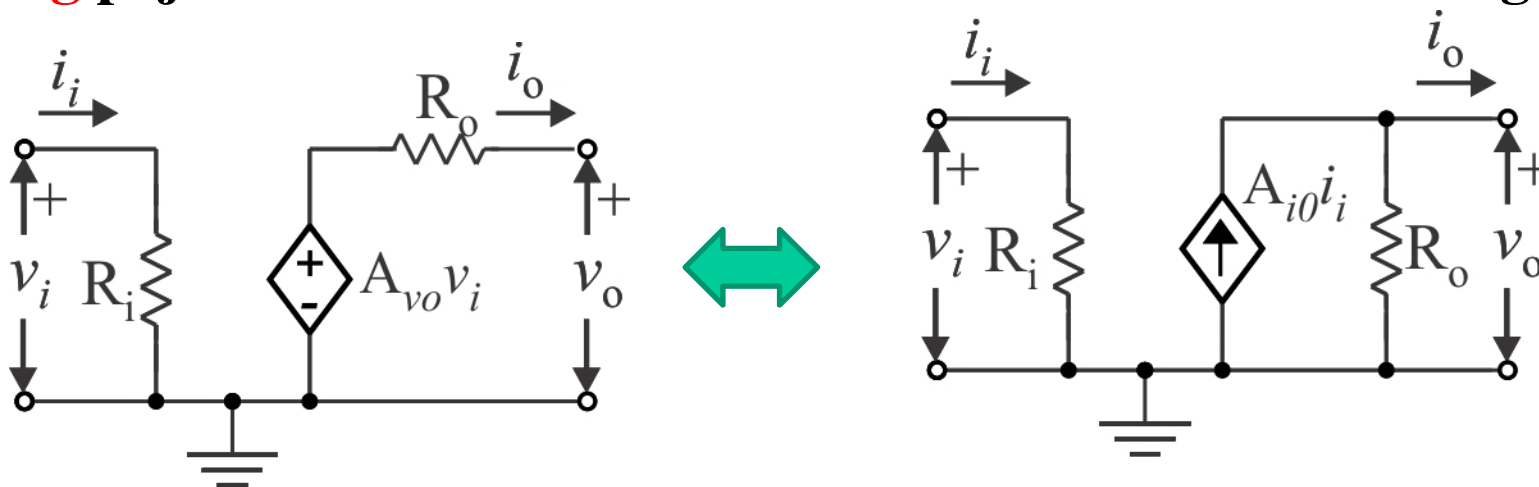


$$V_i = (A_s I_u) R_i = \left(A_s \frac{V_u}{R_u} \right) R_i$$

$$A = \frac{V_i}{V_u} = A_s \frac{R_i}{R_u}$$

Pojačanje signala

Svi navedeni modeli mogu **ravnopravno** da se koriste za modelovanje **realnog** pojačavača! Jedan model može se konvertovati u drugi.



$$V_i = A \cdot V_u \cdot \frac{R_p}{R_i + R_p}$$

$$I_u = \frac{V_u}{R_u} \Rightarrow V_u = R_u \cdot I_u$$

$$I_i = \frac{V_i}{R_p} = \frac{A}{R_i + R_p} \cdot V_u = \frac{A \cdot R_u}{R_i + R_p} \cdot I_u$$

$$A_s = \frac{I_i}{I_u} = \frac{A \cdot R_u}{R_i + R_p}$$

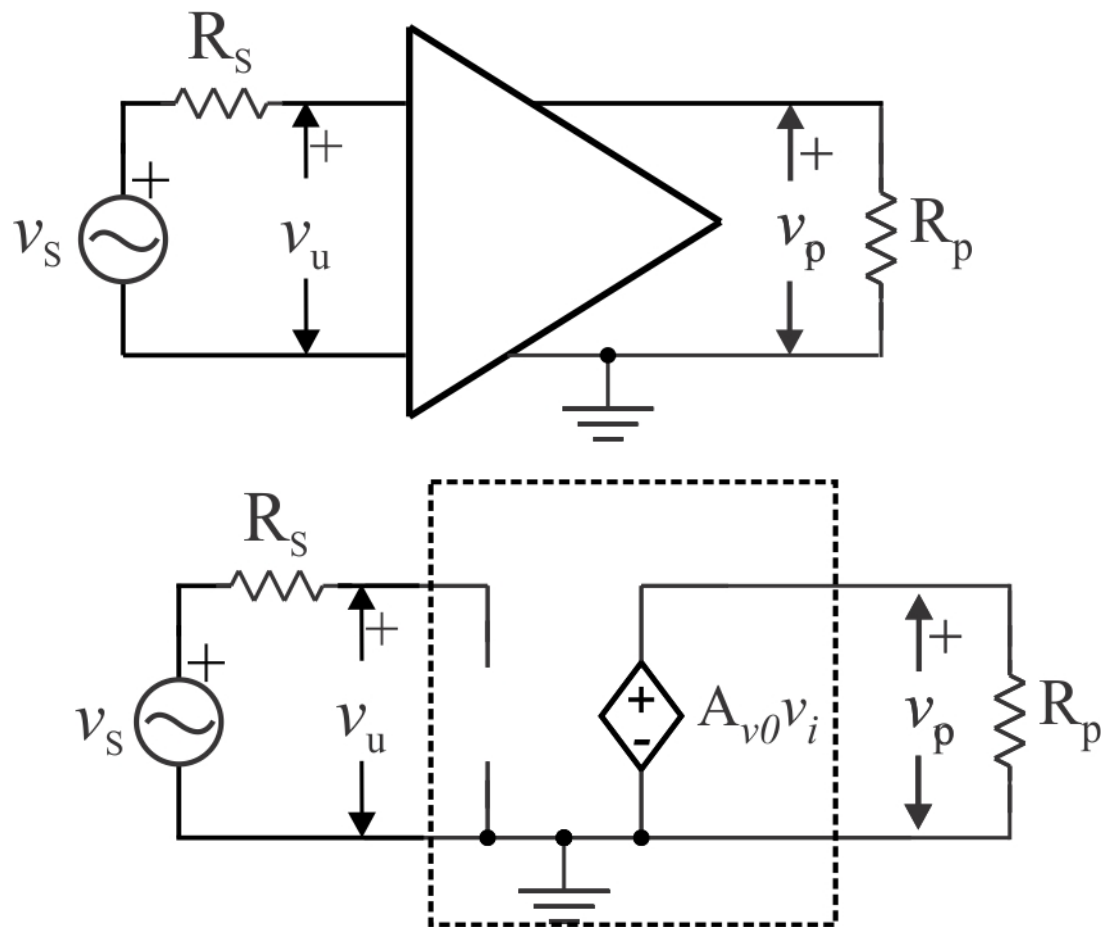
$$I_i = \frac{R_i}{R_i + R_p} (A_s \cdot I_u) = \frac{R_i}{R_i + R_p} \left(A_s \cdot \frac{V_u}{R_u} \right)$$

$$V_i = R_p I_i = R_p \frac{R_i}{R_i + R_p} \left(A_s \cdot \frac{V_u}{R_u} \right)$$

$$A = \frac{V_i}{V_u} = \frac{R_i R_p}{R_i + R_p} \cdot \frac{1}{R_u} \cdot A_s$$

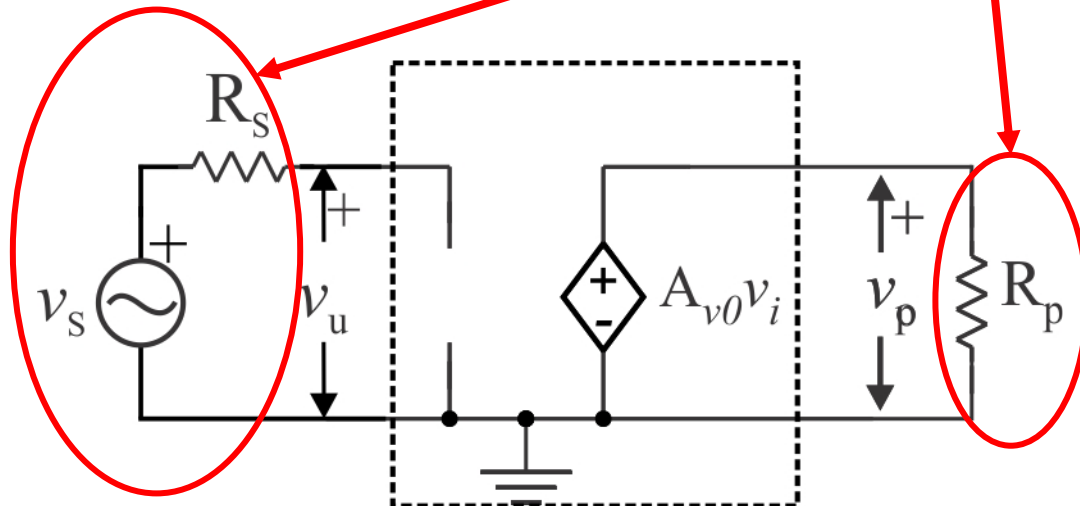
Pojačanje signala

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



Pojačanje signala

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



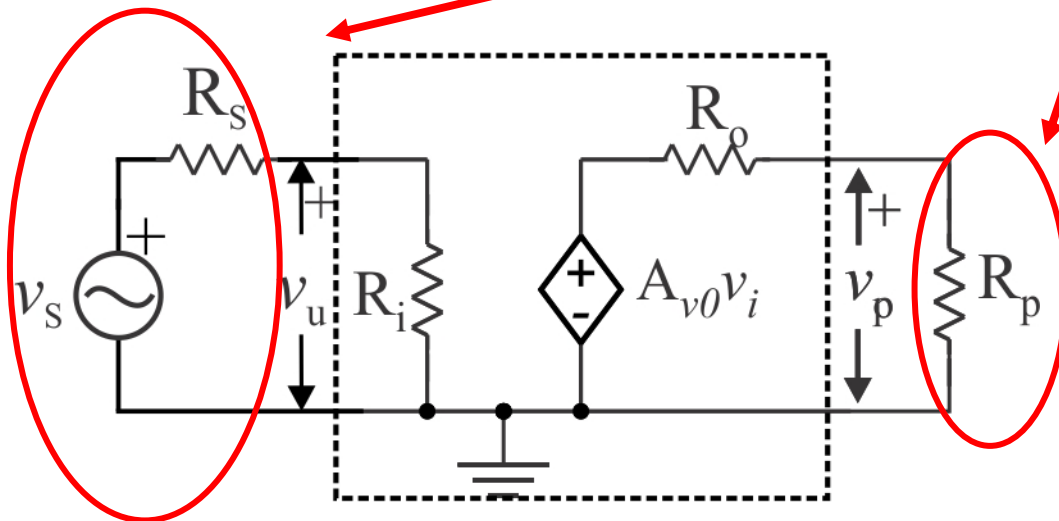
Ukupno pojačanje

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

NE ZAVISI od R_s i R_p !!!

Pojačanje signala

Realni naponski pojačavač opterećen i pobuđen iz realnog izvora



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

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

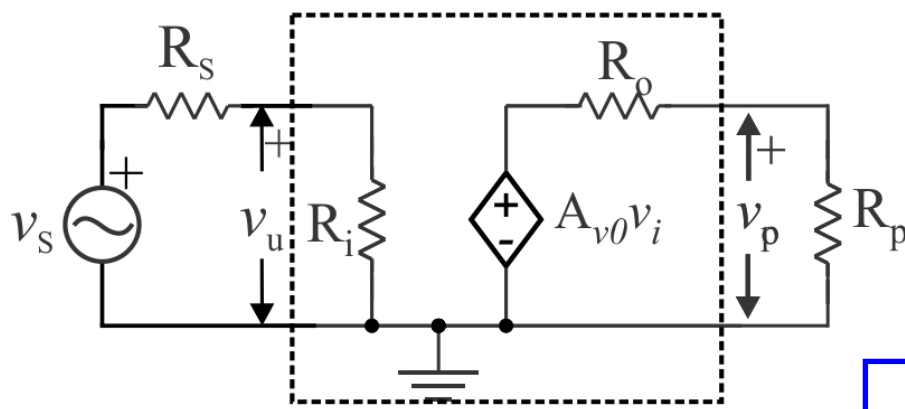
$$\frac{v_p}{v_s} = A_o \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_o}$$

Ukupno pojačanje

ZAVISI od R_s i R_p !!!

Pojačanje signala

Realni naponski pojačavač se ponaša kao idealni ukoliko je ulazna otpornost izvora signala R_s mnogo veća od unutrašnje otpornosti pojačavača R_i kao i izlazna otpornost pojačavača R_o mnogo manja od otpornosti potrošača R_p .



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

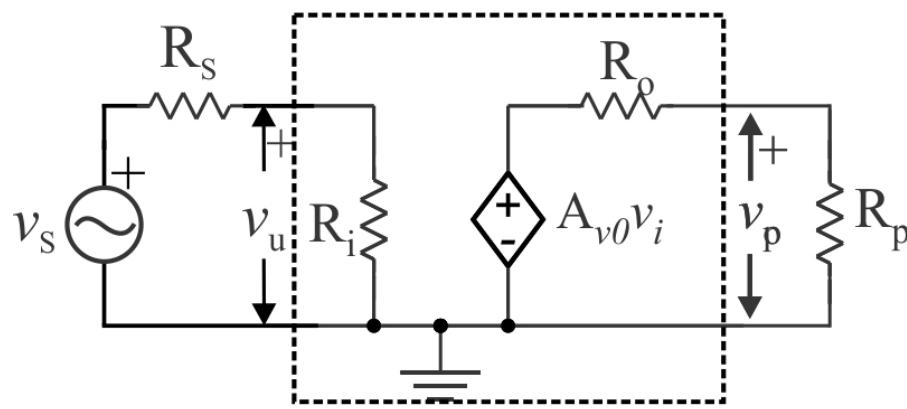
$$R_i \gg R_s \Rightarrow \frac{v_u}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot v_s \approx v_s$$

$$R_i \gg R_s \quad R_p \gg R_o \Rightarrow A_v = \frac{v_u}{v_s} \approx A_{v0}$$

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

Pojačanje signala

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



$$P = v_o i_o = \frac{v_0^2}{R_p} = \frac{(A_{vo} \cdot v_i)^2 R_p}{(R_p + R_0)^2}$$

$$\frac{v_p}{v_s} = A_{vo} \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_0}$$

$$\frac{dP}{dR_p} = 0 \Rightarrow R_p = R_0$$

Maksimalna snaga na potrošaču dobija se kada je otpornost potrošača R_p jednaka izlaznoj otpornosti pojačivača R_0 .

Za vežbu 2.1

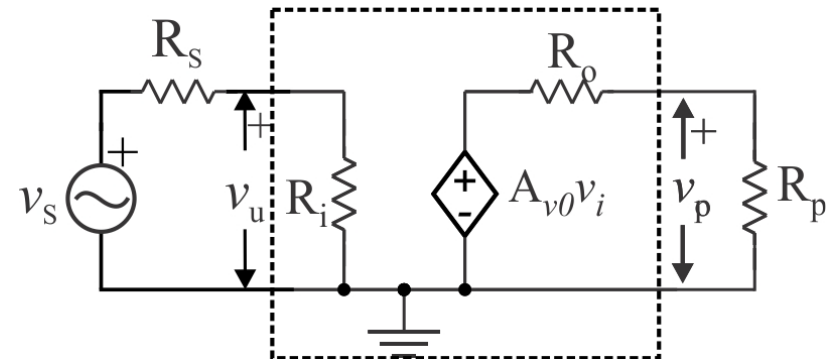
Pojačanje signala

Zadatak: Izmereno je da napon na izlazu pojačavača opadne za 20% kada mu se priključi potrošač od 1k. Kolika je izlazna otpornost pojačavača?

(250Ω)

$$V_i = \frac{R_p}{R_i + R_p} V_{i0} = 0.8 \cdot V_{i0} \Rightarrow \frac{R_p}{R_i + R_p} = 0.8$$

$$R_p = 0.8 \cdot (R_i + R_p) \Rightarrow R_i = \frac{0.2}{0.8} R_p = 0.25 R_p = 250 \Omega$$



Pojačanje signala

Primer 1: Mikrofon koji daje na izlazu napon efektivne vrednosti od 10mV i ima izlaznu otpornost od 600Ω treba priključiti na potrošač od 8Ω . Izračunati naponsko i pojačanje snage kada se priključi:

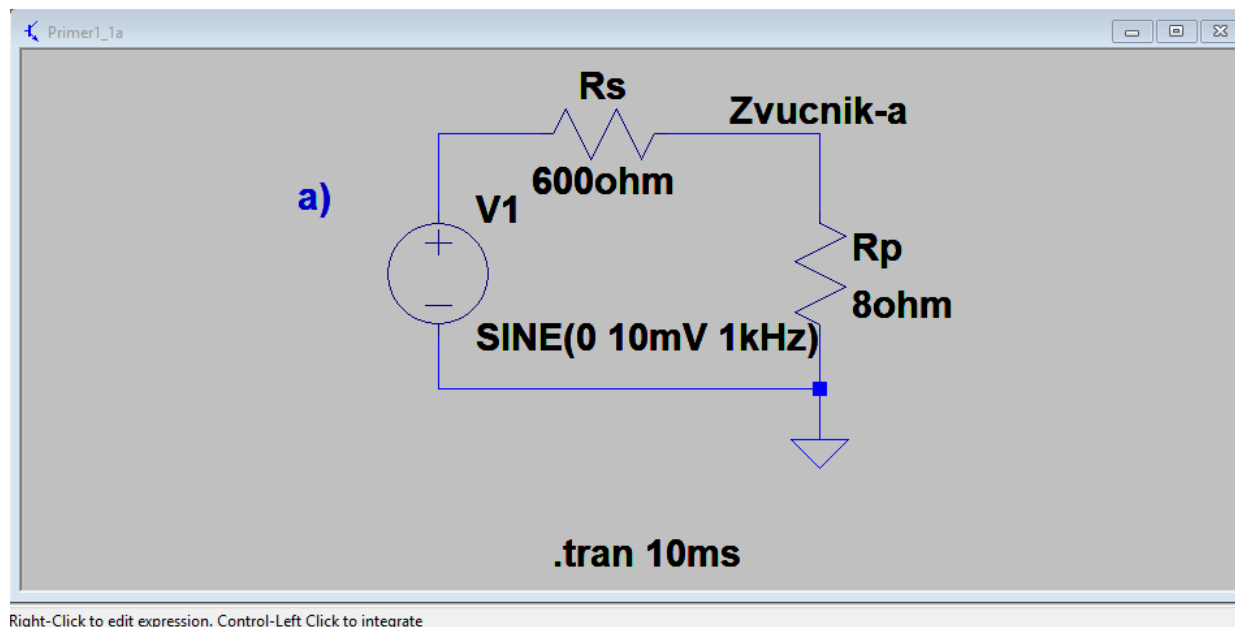
- a) direktno
- b) preko pojačavača koji daje 100 puta veći napon na izlazu ($A_o=100V/V$), sa $R_u=\infty$ i $R_{iz}=1M\Omega$
- c) preko pojačavača koji daje 100 puta veći napon na izlazu ($A_o=100V/V$), sa $R_u=10\Omega$ i $R_{iz}=1M\Omega$
- d) preko *baferskog pojačavača* koji ima $A_o=1$, $R_u=1M\Omega$ i $R_{iz}=10\Omega$

Pojačanje signala



Primer 2.1: Mikrofon koji daje na izlazu napon efektivne vrednosti od 10mV i ima izlaznu otpornost od 600Ω treba priključiti na potrošač od 8Ω . Izračunati naponsko i pojačanje snage kada se priključi:

a) direktno



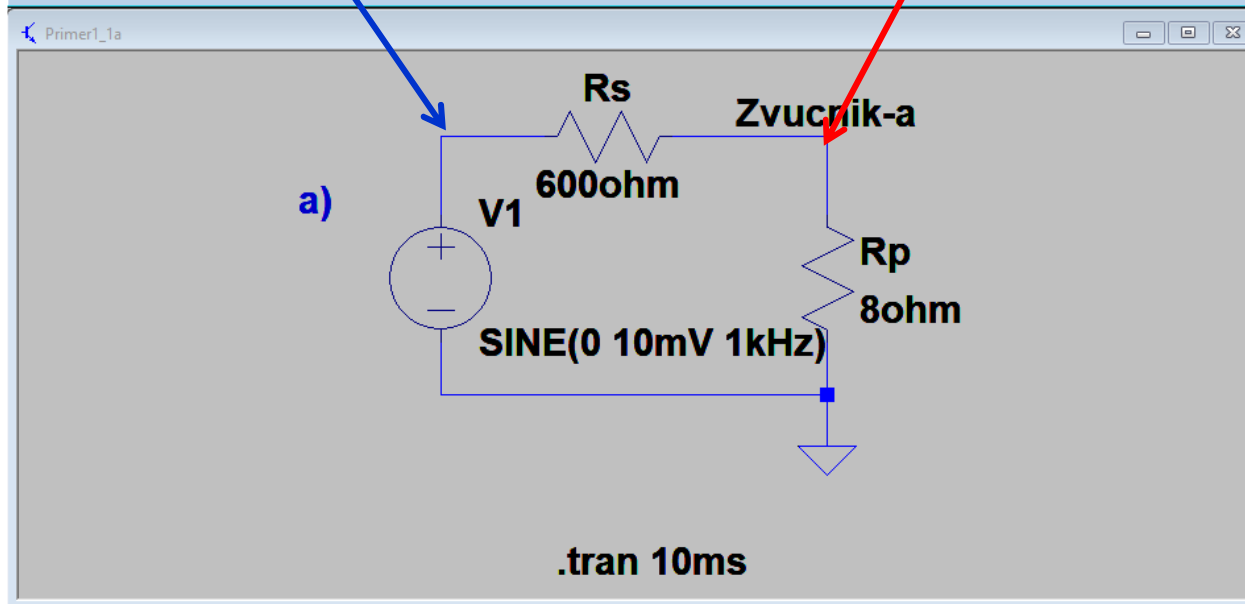
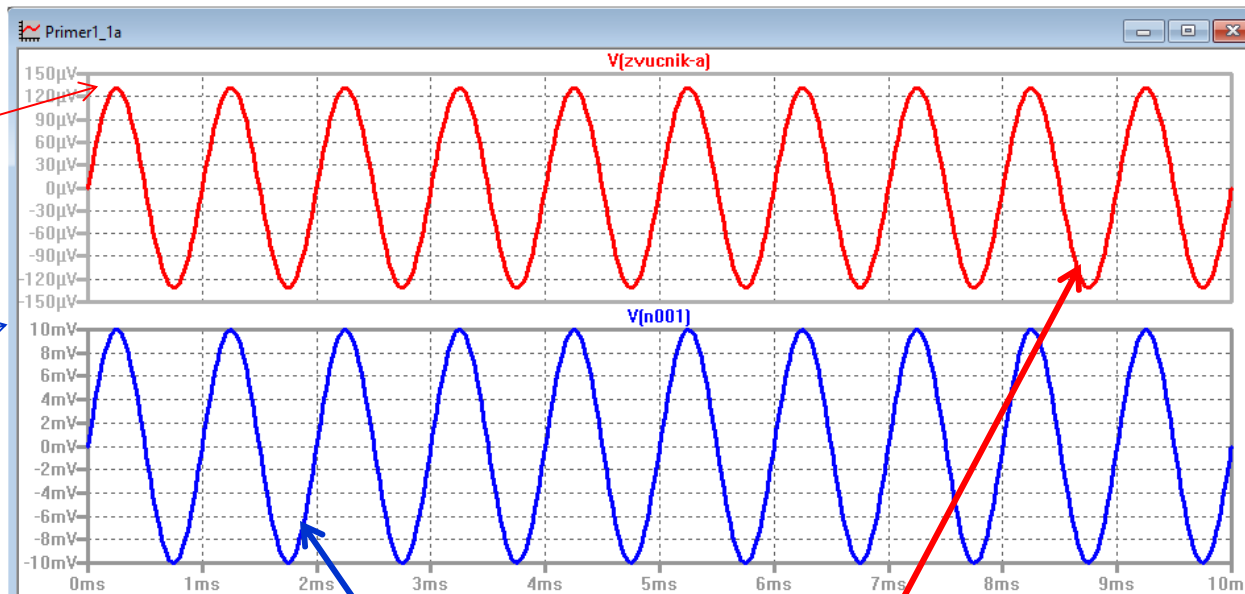
Pojačanje signala



a) direktno

130 μ V

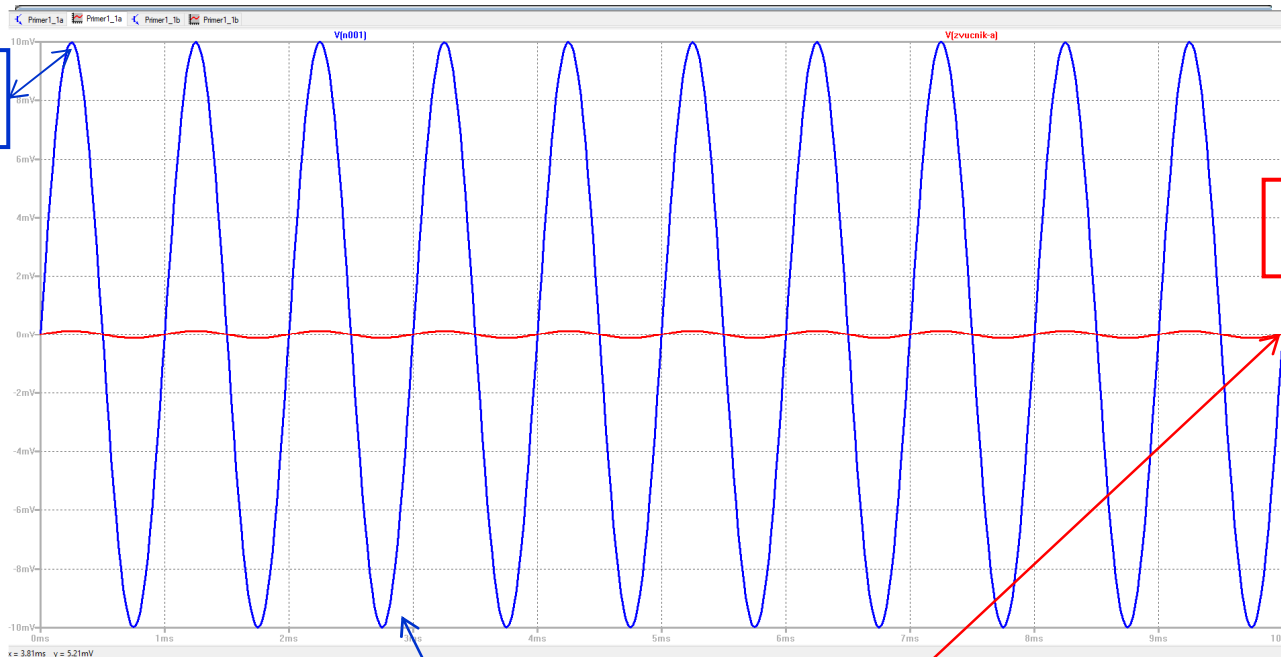
10mV



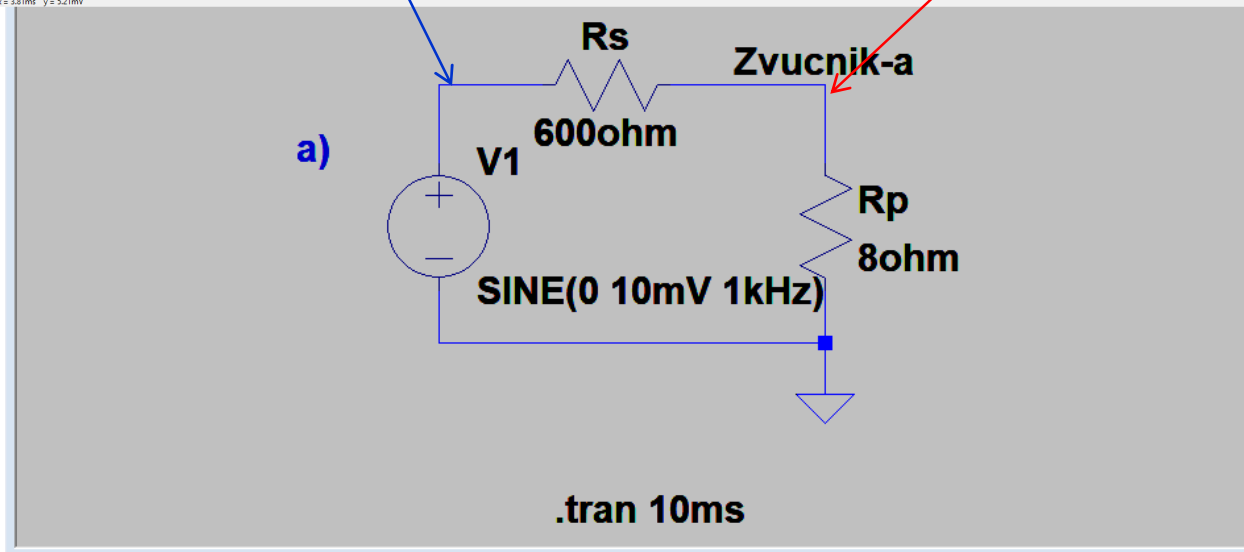
a) direktno Pojačanje signala



10mV



130µV

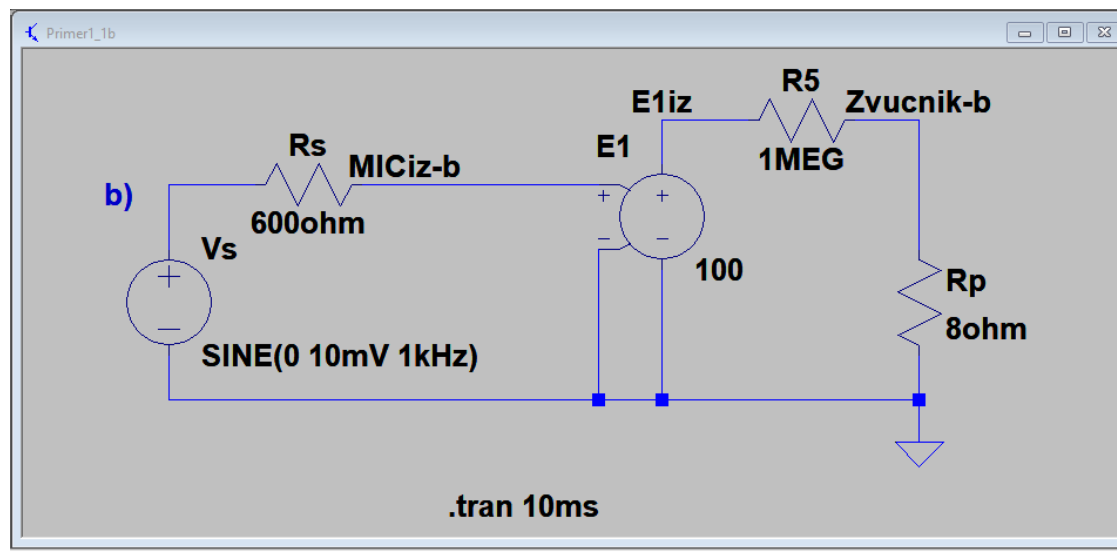




Pojačanje signala

Primer 2.1: Mikrofon koji daje na izlazu napon efektivne vrednosti od 10mV i ima izlaznu otpornost od 600Ω treba priključiti na potrošač od 8Ω . Izračunati naponsko i pojačanje snage kada se priključi:

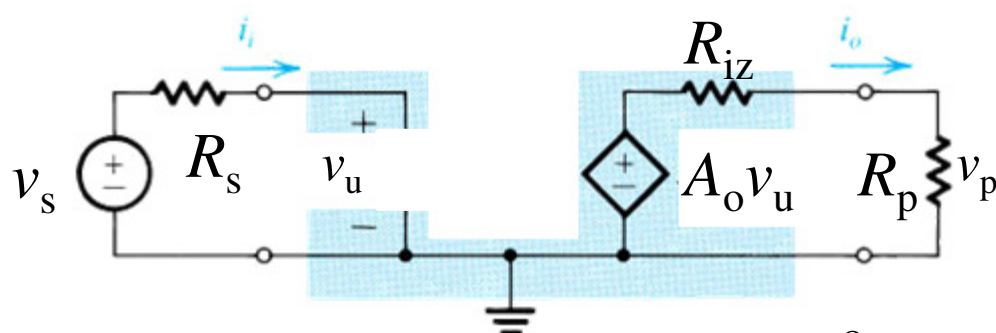
b) preko pojačavača koji daje 100 puta veći napon na izlazu $A_o=100\text{V/V}$, $R_u=\infty$ i $R_{iz}=10\text{M}\Omega$





Pojačanje signala

b) preko pojačavača ($A_o=100$, $R_u=\infty$ i $R_{iz}=1M\Omega$)



$$v_p = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} \cdot (A_o \cdot v_u) =$$

$$v_u = v_s = 10\text{mV}$$

$$v_p = \frac{8}{1,000,000 + 8} \cdot 100 \cdot 10\text{mV} = 7,999936\mu\text{V} \approx 8\mu\text{V}$$

$$A = \frac{v_p}{v_s} = \frac{13.1\mu\text{V}}{10\text{mV}} = 0,008$$

Napon oslabljen!!! iako je pojačanje 100 puta!!!

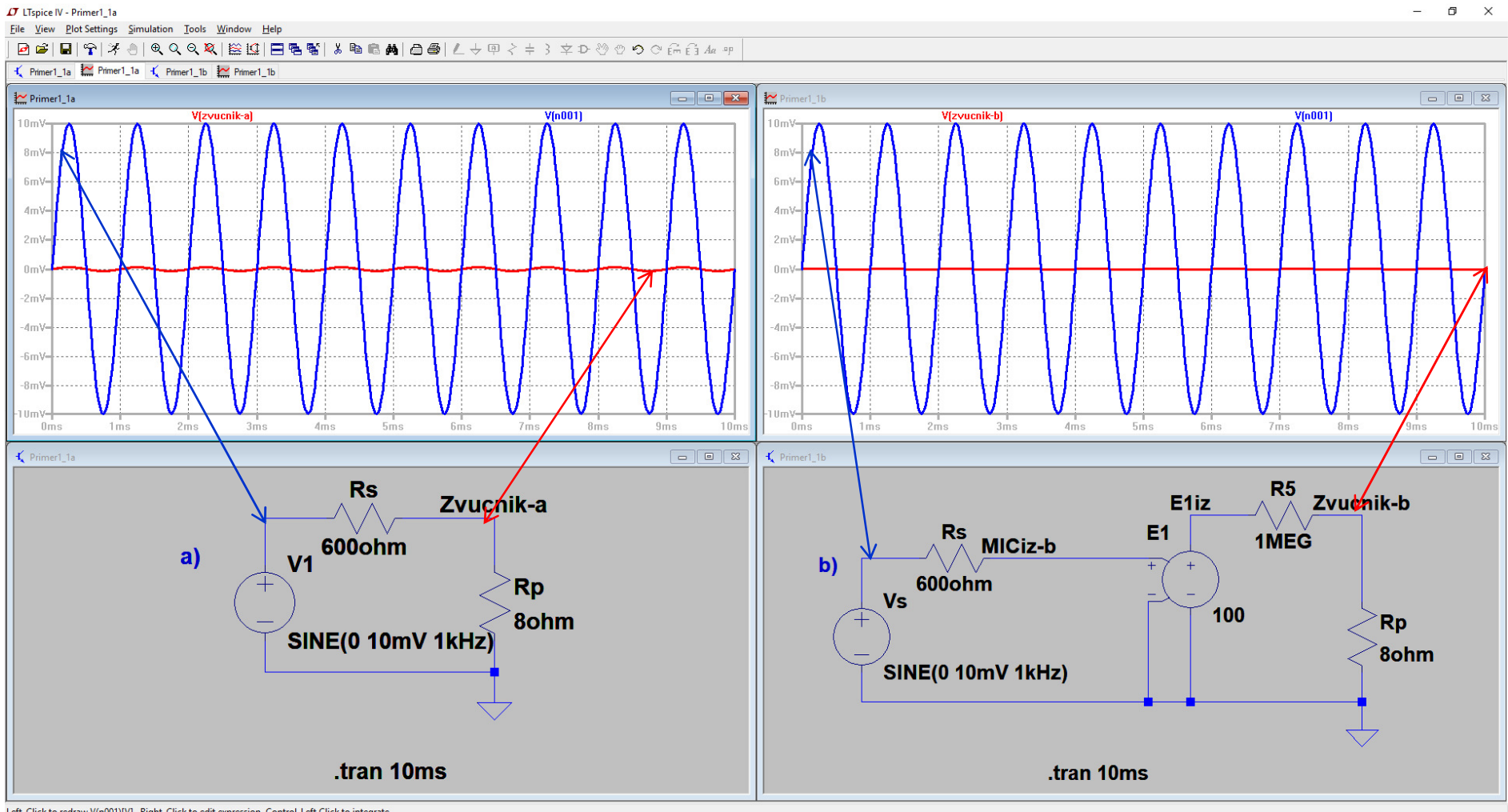
Zašto??? **Zašto???**





Pojačanje signala

b) preko pojačavača ($A_o=100$, $R_u=\infty$ i $R_{iz}=1M\Omega$)



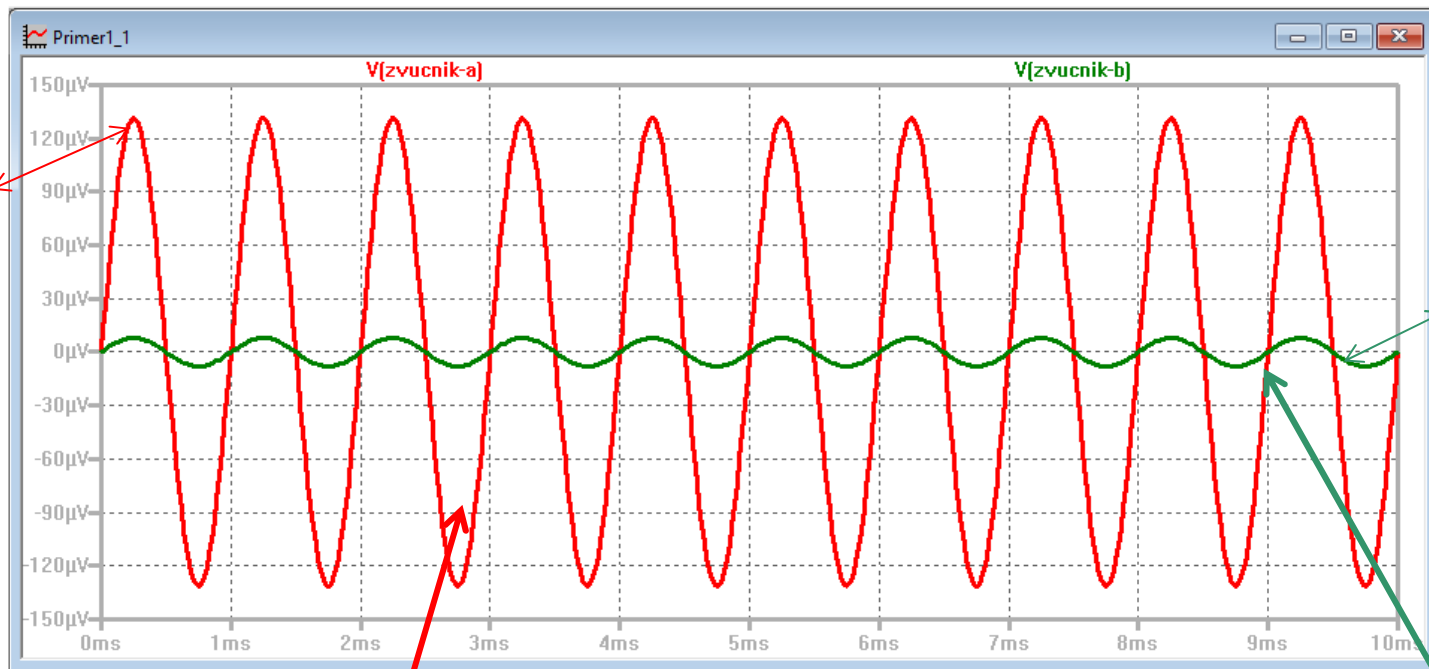
Left-Click to redraw V(n001)[V]. Right-Click to edit expression. Control-Left Click to integrate



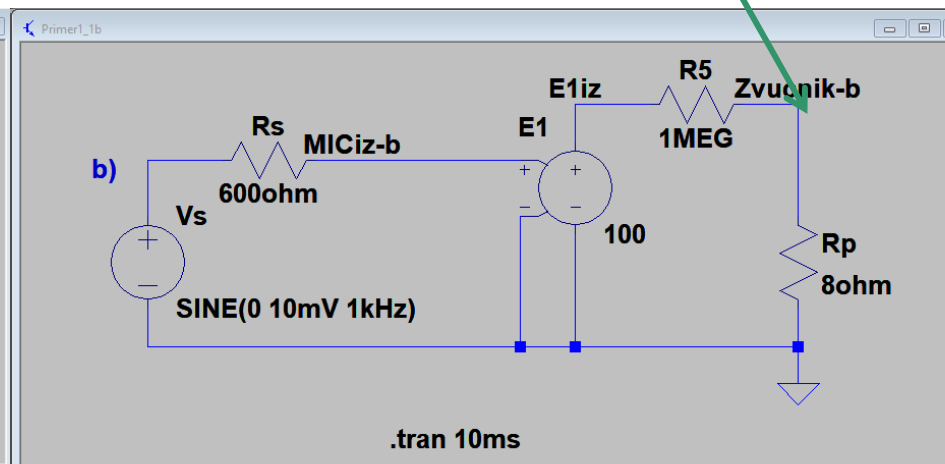
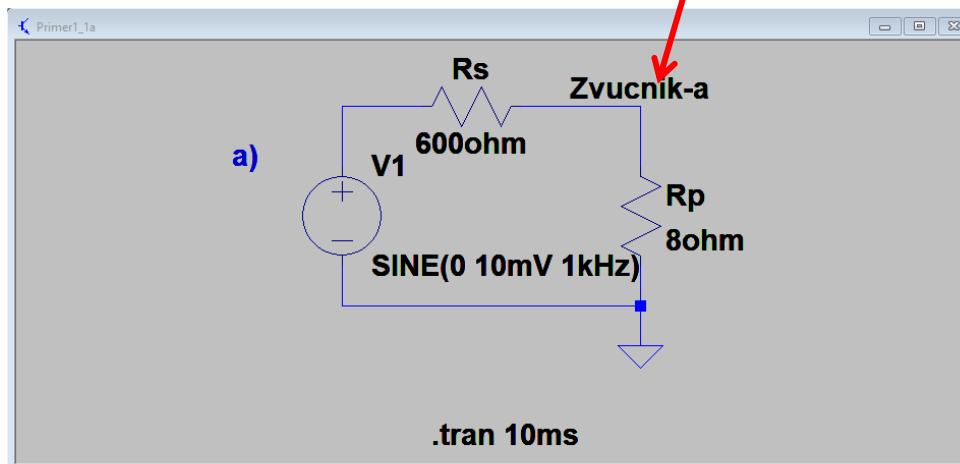
Pojačanje signala

a) i b)

130 μ V



8 μ V



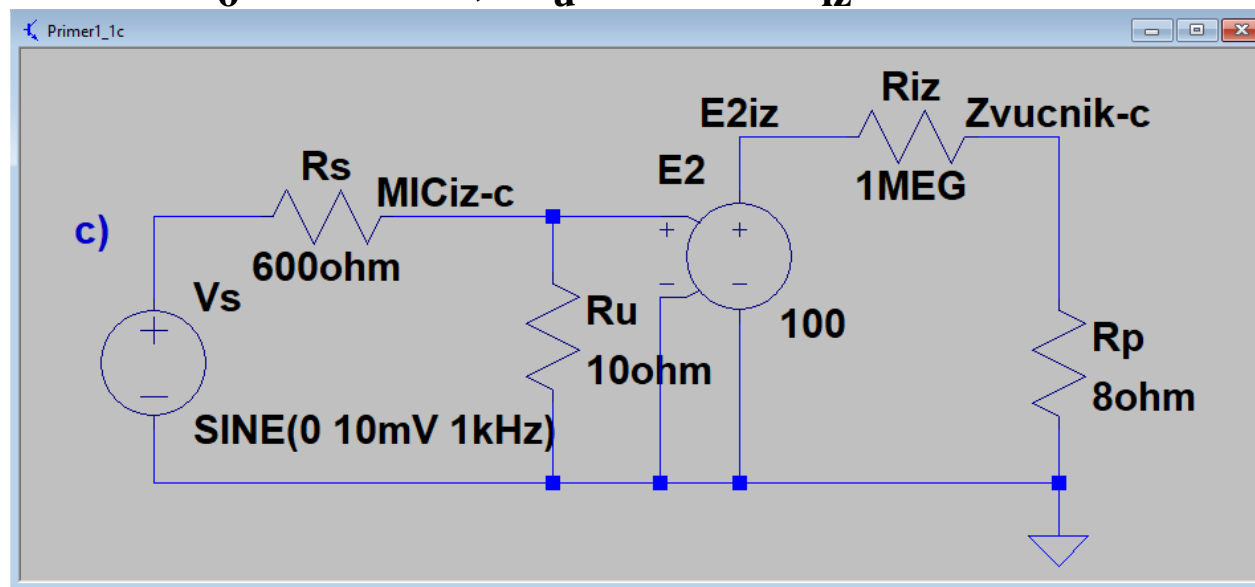
Right-Click to edit expression. Control-Left Click to integrate



Pojačanje signala

Primer 2.1: Mikrofon koji daje na izlazu napon efektivne vrednosti od 10mV i ima izlaznu otpornost od 600Ω treba priključiti na potrošač od 8Ω . Izračunati naponsko i pojačanje snage kada se priključi:

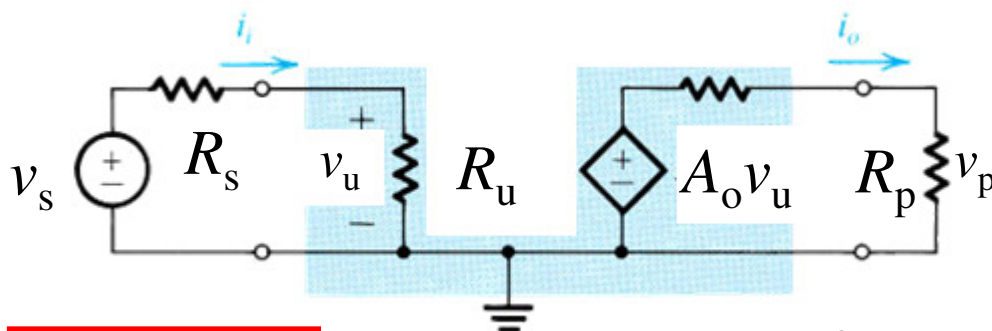
- c) preko pojačavača koji daje 100 puta veći napon na izlazu $A_o=100\text{V/V}$, $R_u=10\Omega$ i $R_{iz}=1\text{M}\Omega$





Pojačanje signala

c) preko pojačavača ($A_o=100$, $R_u=10\Omega$ i $R_{iz}=1M\Omega$)



$$v_p = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} \cdot (A_o \cdot v_u) = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} \cdot \left(A_o \cdot \frac{R_u}{R_s + R_u} \cdot v_s \right)$$

$$v_u = \frac{R_u}{R_s + R_u} \cdot v_s = 0,164\text{mV}$$

$$v_p = \frac{8}{1,000,000 + 8} \cdot 100 \cdot \frac{10}{600 + 10} \cdot v_s \approx \frac{8000}{610 \cdot 10^6} = 0,13\mu\text{V}$$

$$A = \frac{v_p}{v_s} = 0,000013 \text{ [V/V]}$$

Šta je sa snagom?

**Napon još više oslabljen!!!
iako je pojačanje 100 puta!!!**

Zašto???

na ulazu $P_s = v_s \cdot i_s = v_s \cdot \frac{v_s}{R_s + R_u} = \frac{(10 \cdot 10^{-3})^2}{610} \approx 163.9\text{nW}$

na izlazu $P_p = \frac{v_p^2}{R_p} = \frac{(13.1 \cdot 10^{-6})^2}{8} \approx 21.4\text{pW}$

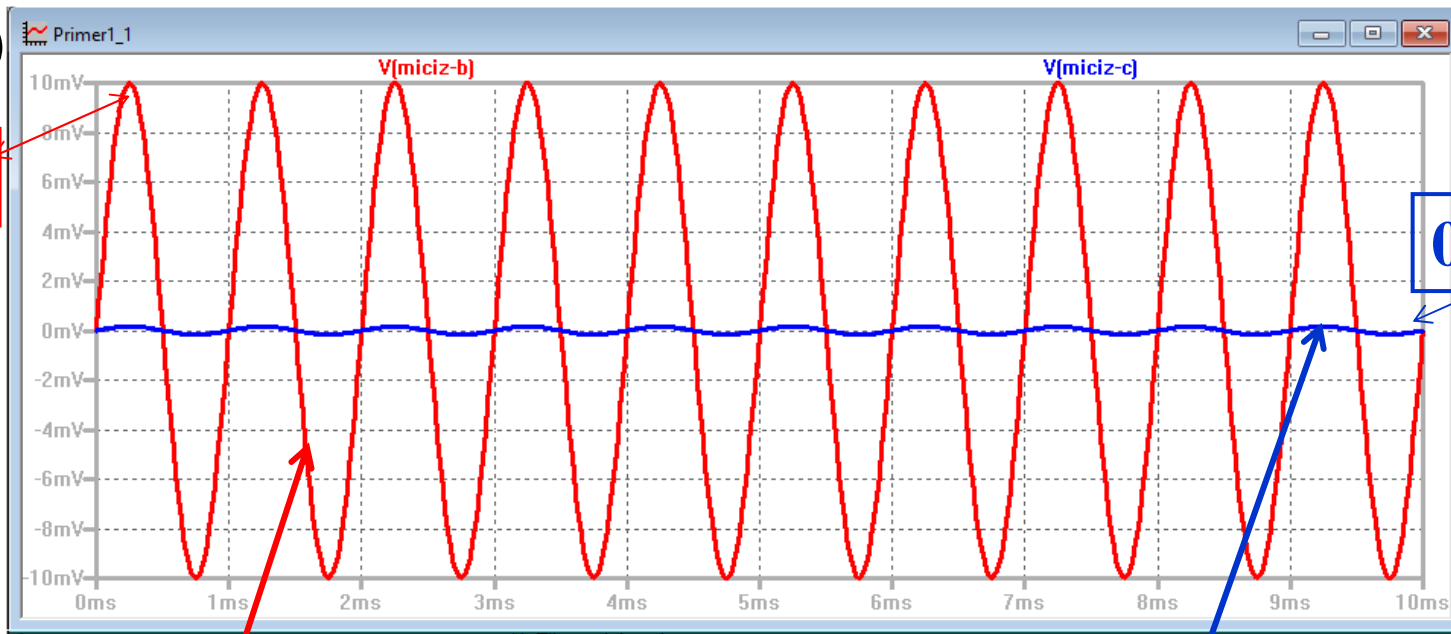
pojačanje $A_p = \frac{P_p}{P_s} = \frac{21.4\text{pW}}{163.9\text{nW}} = 130.9 \cdot 10^{-6} \text{ W/W}$



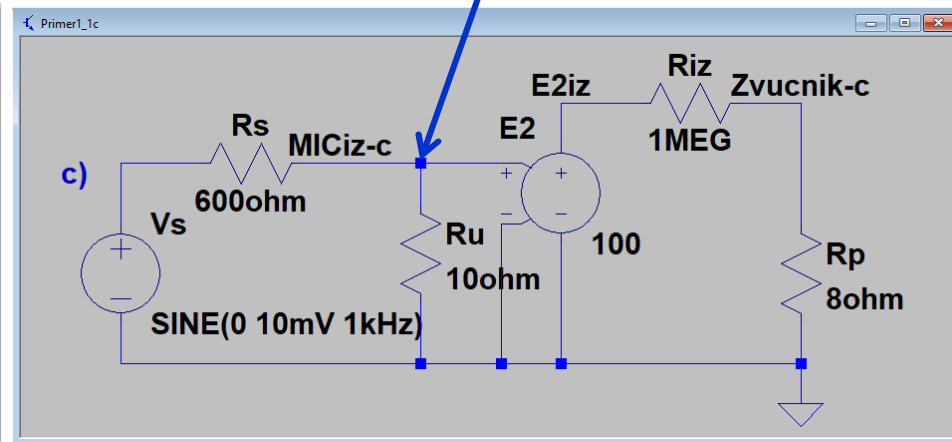
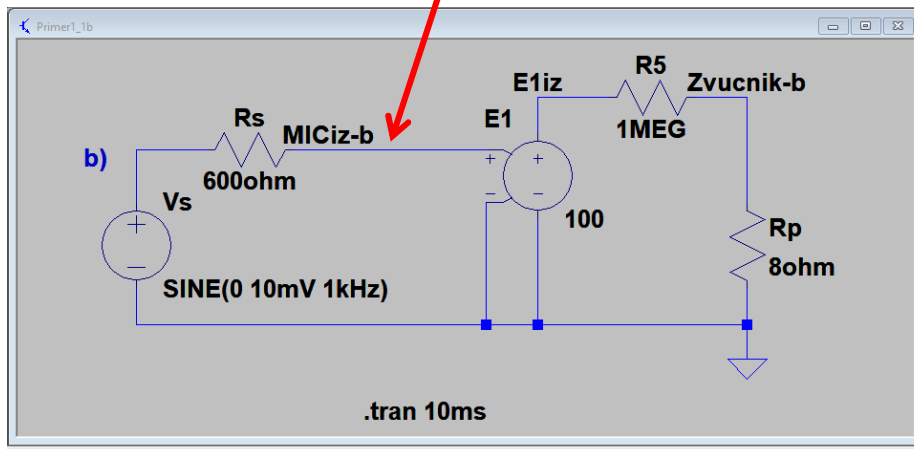
Pojačanje signala

b) i c)

10mV



0,164mV

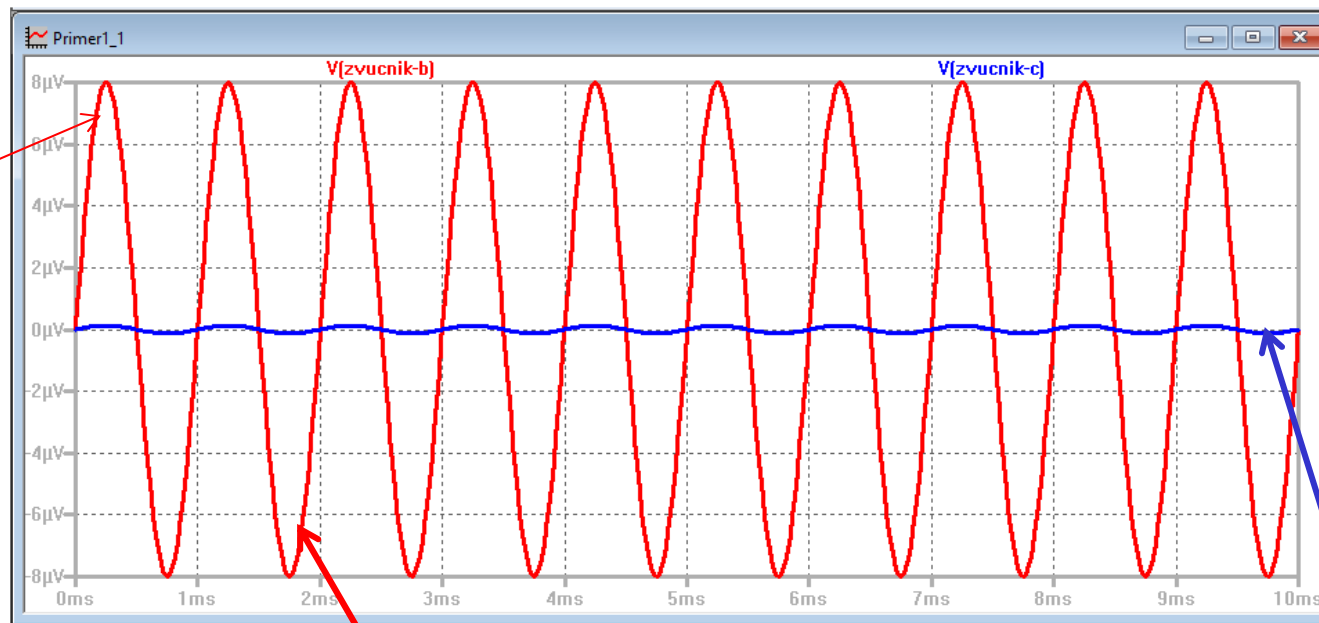




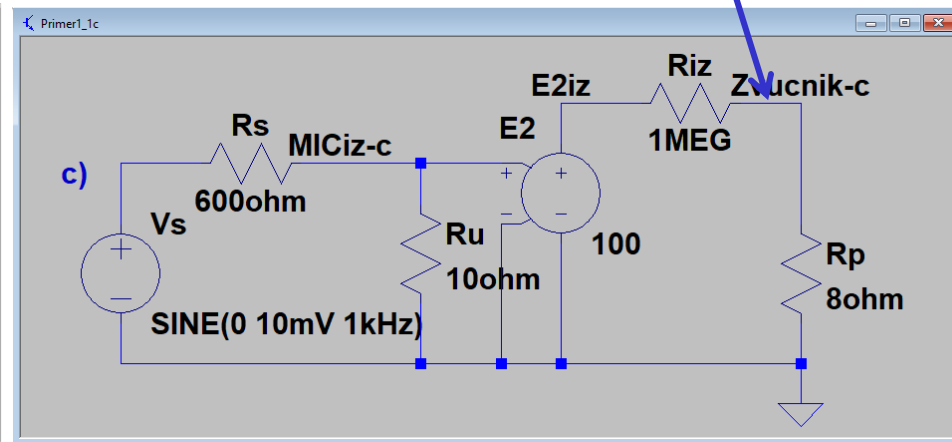
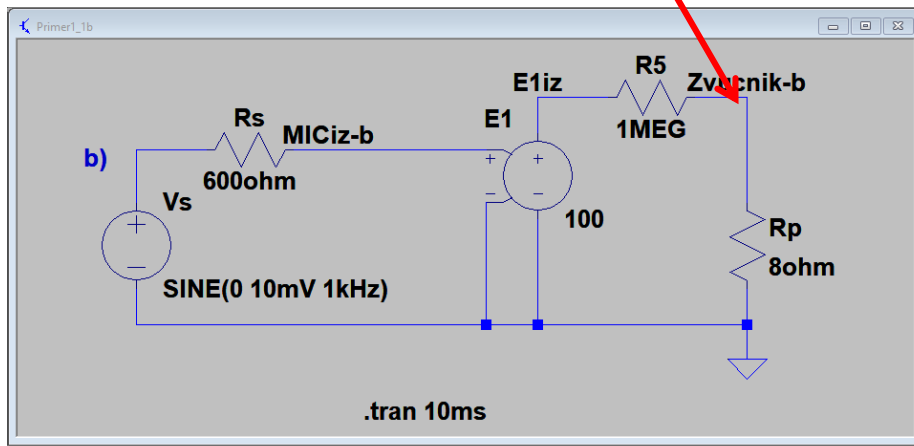
Pojačanje signala

b) i c)

$8\mu\text{V}$



$0,131\mu\text{V}$



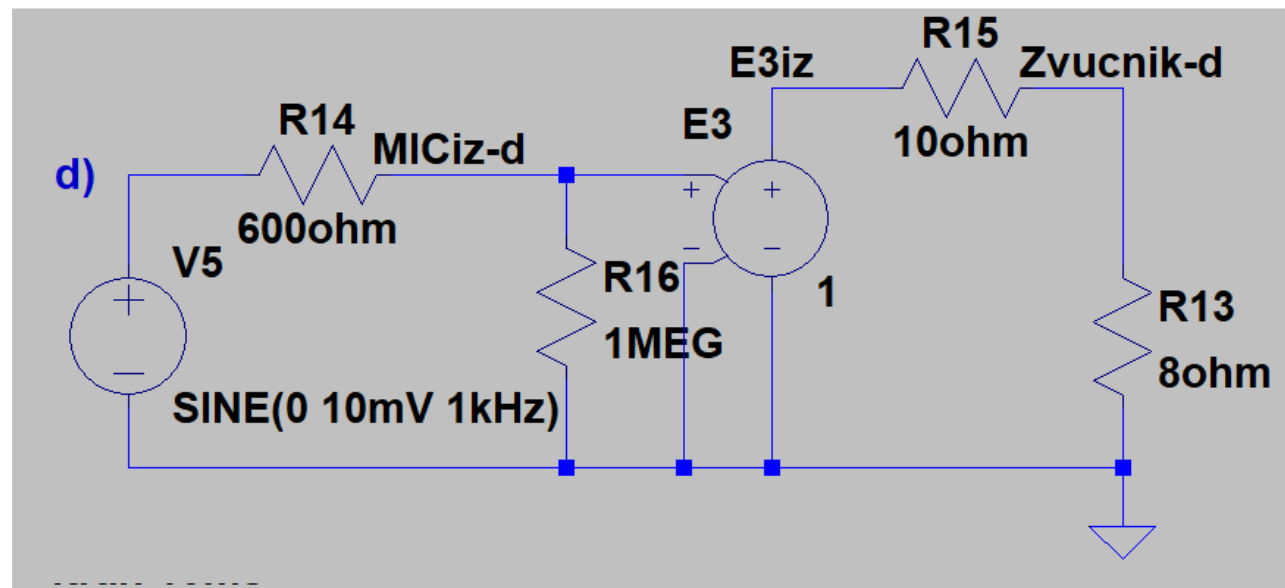


Pojačanje signala

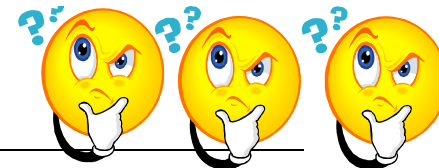
Primer 2.1: Mikrofon koji daje na izlazu napon efektivne vrednosti od 10mV i ima izlaznu otpornost od 600Ω treba priključiti na potrošač od 8Ω . Izračunati naponsko i pojačanje snage kada se priključi:

d) preko *baferskog pojačavača* koji ima

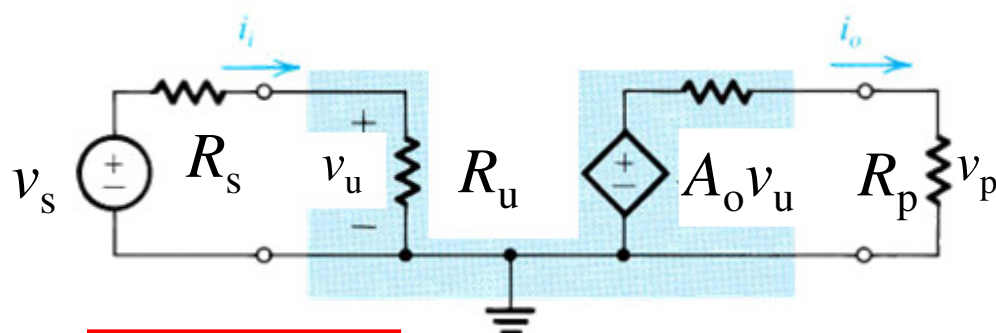
$$A_o=1, R_u=1\text{M}\Omega \text{ i } R_{iz}=10\Omega$$



Pojačanje signala



d) preko *baferskog pojačavača* ($A_o=1$, $R_u=1\text{M}\Omega$ i $R_{iz}=10\Omega$)



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

$$v_p = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} (A_o \cdot v_u) = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} \left(A_o \cdot \frac{R_u}{R_s + R_u} \cdot v_s \right)$$

$$v_p = \frac{8}{10+8} \cdot 1 \cdot \frac{1,000,000}{600+1,000,000} \cdot 10\text{mV} = \frac{8}{18} \cdot \frac{1,000,000}{1,000,600} \cdot 10\text{mV} = 4.4\text{mV}$$

$$A = \frac{v_p}{v_s} = \frac{4.4\text{mV}}{10\text{mV}} = 0.44 \text{ [V/V]} \text{ Napon oslabljen, samo 44\% od } v_s$$

Šta je sa snagom?

na ulazu $P_s = v_s \cdot \frac{v_s}{R_u + R_s} \approx \frac{(10 \text{ mV})^2}{1\text{M}\Omega} \approx 10\text{pW};$

na izlazu $P_p = \frac{v_p^2}{R_p} = \frac{(4.4 \text{ mV})^2}{8\Omega} = 2.42 \mu\text{W}$

Pojačanje snage

$$A_p = \frac{P_p}{P_s} = \frac{2.42\mu\text{W}}{10\text{pW}} = 242 \cdot 10^3 \text{ [W/W]}$$

Zašto? Kako?

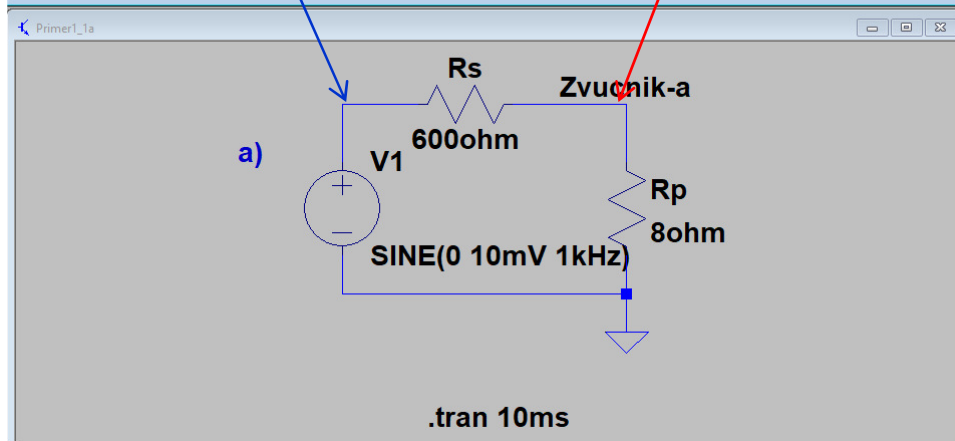
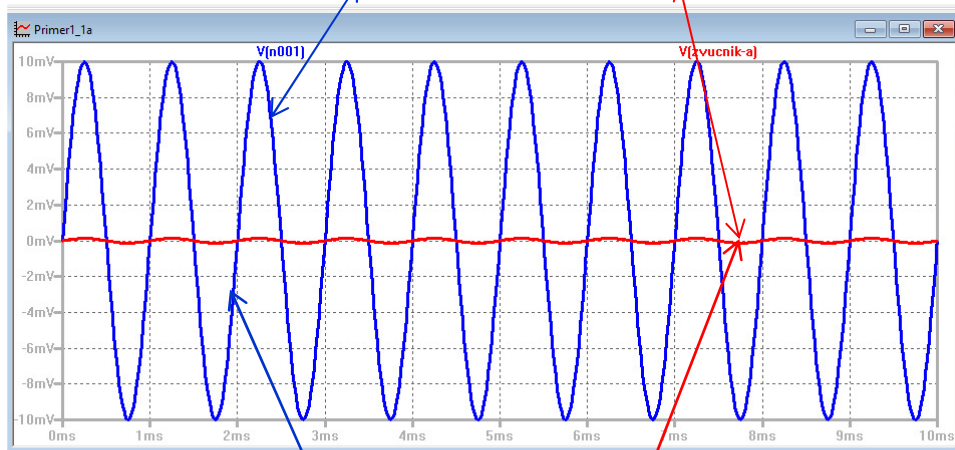


Pojačanje signala

a) i d)

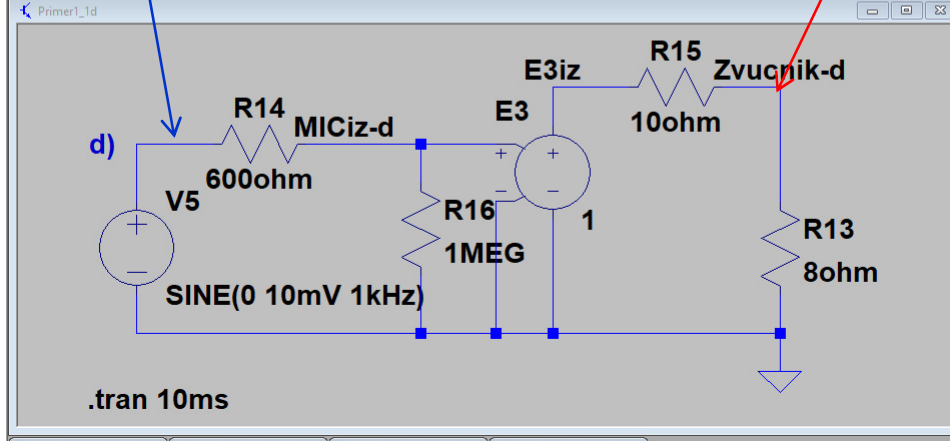
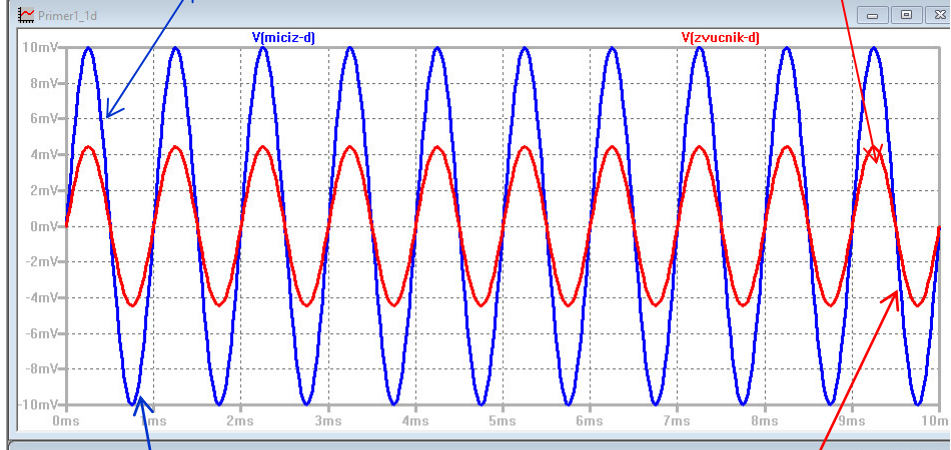
10mV

130 μ V



10mV

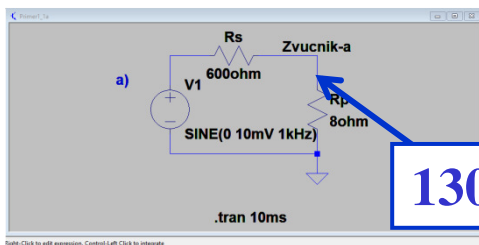
4,4mV



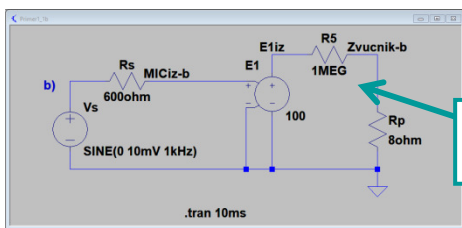


Pojačanje signala

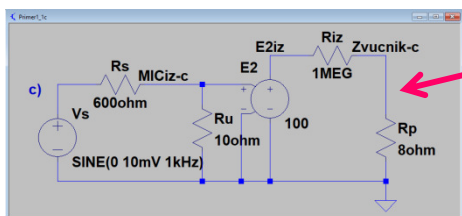
a), b), c) i d)



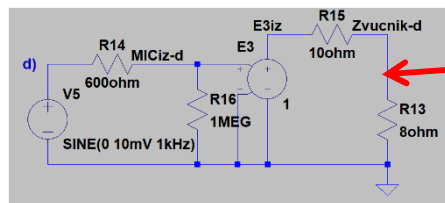
130μV



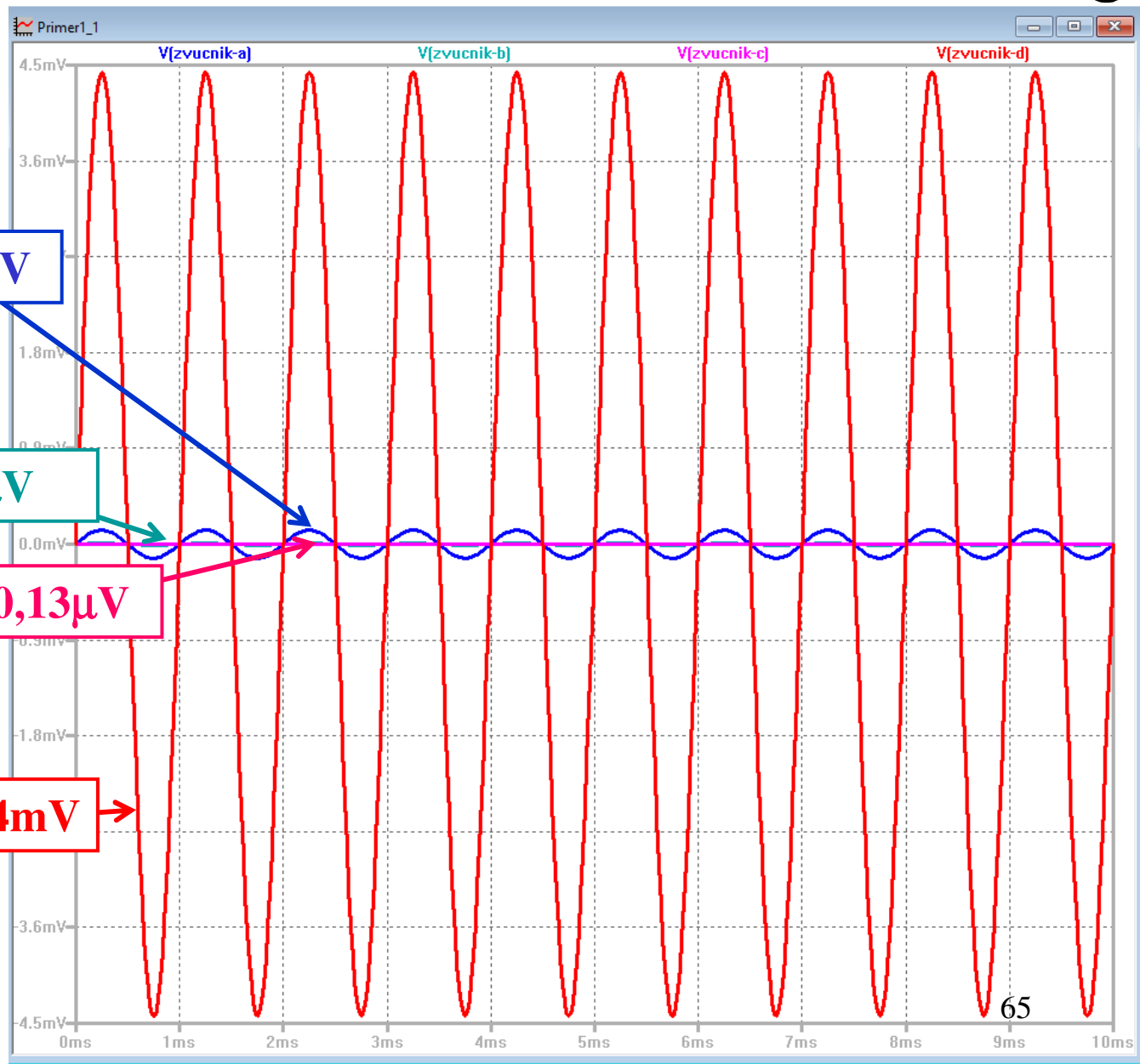
8μV



0,13μV



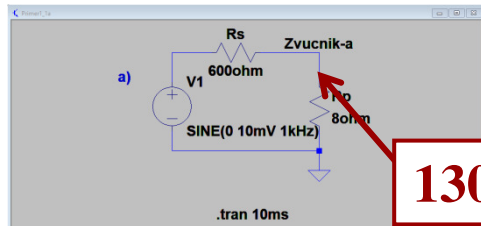
4,4mV



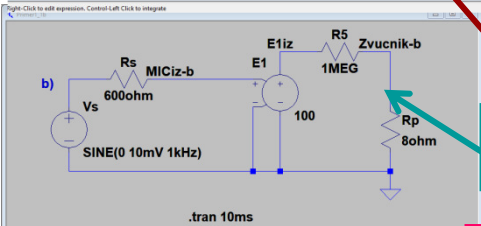


Pojačanje signala

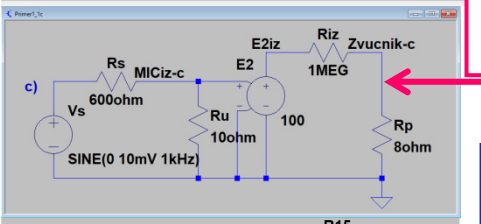
a), b), c), d) i 1.1b)



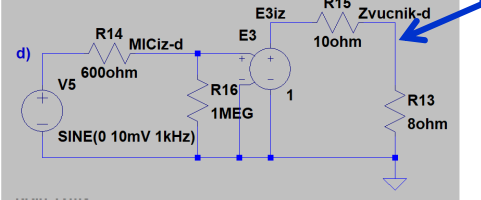
130 μ V



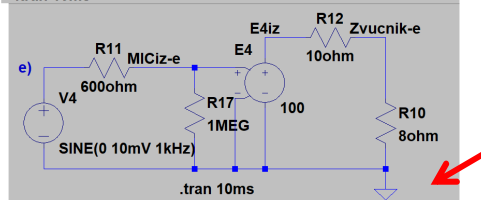
8 μ V



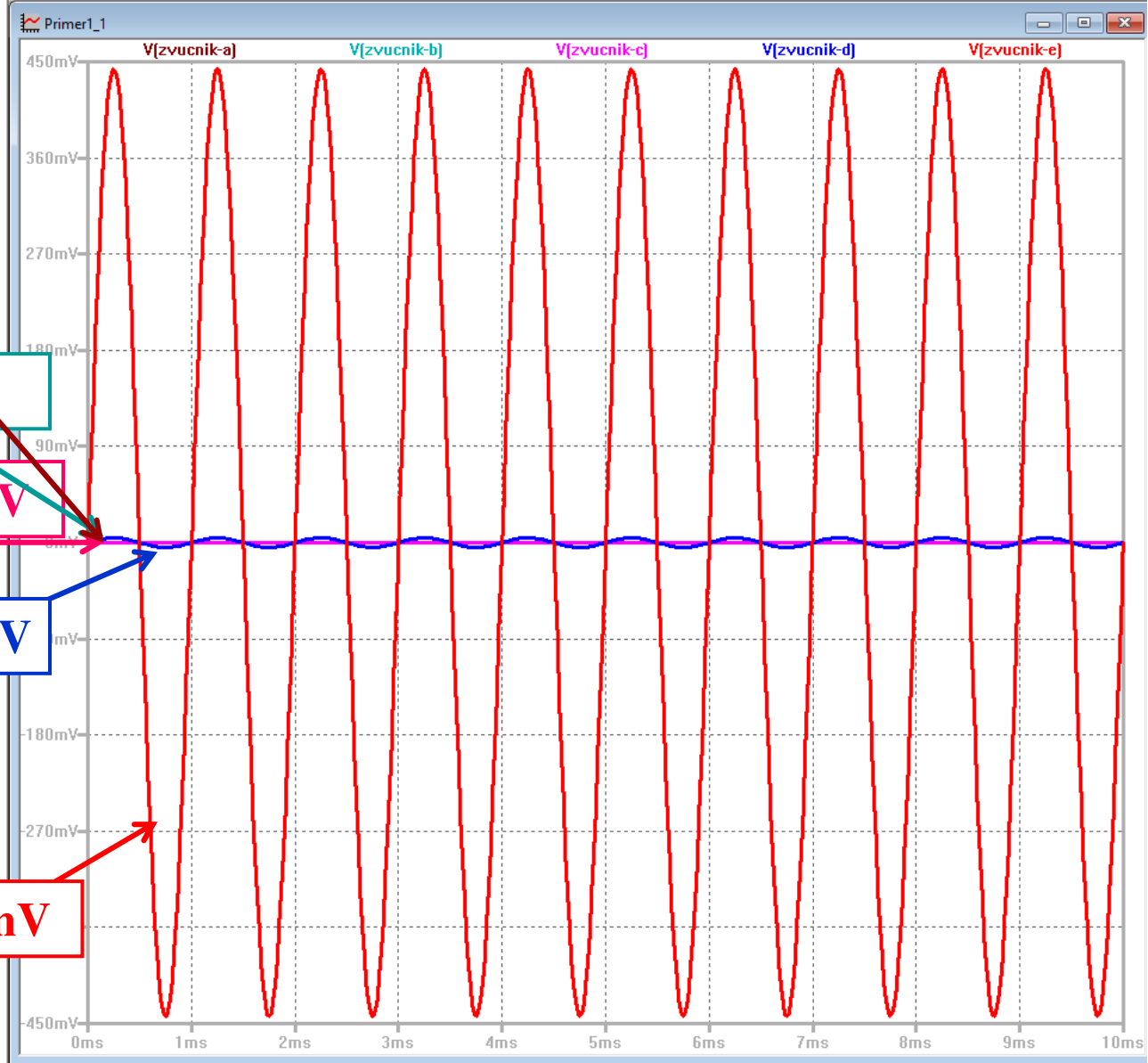
0,13 μ V



4,4mV



450mV



Pojačanje signala

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

$$A_p = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i$$

Pojačanje signala

Izražavanje pojačanja u decibelima

$$A = \frac{v_o}{v_i}$$

$$A_s = \frac{i_o}{i_i}$$

$$A_P = \frac{P_o}{P_i}$$

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 monotonno rastuća funkcija.

$$a_P = 10 \cdot \log |A_P| \quad \text{dB}$$

$$a_v = 20 \log |A| \quad \text{dB}$$

$$a_s = 20 \log |A_s|$$

Pojačanje signala

Uloga pojačavača:

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

Uzroci izobličenja pojačavača:

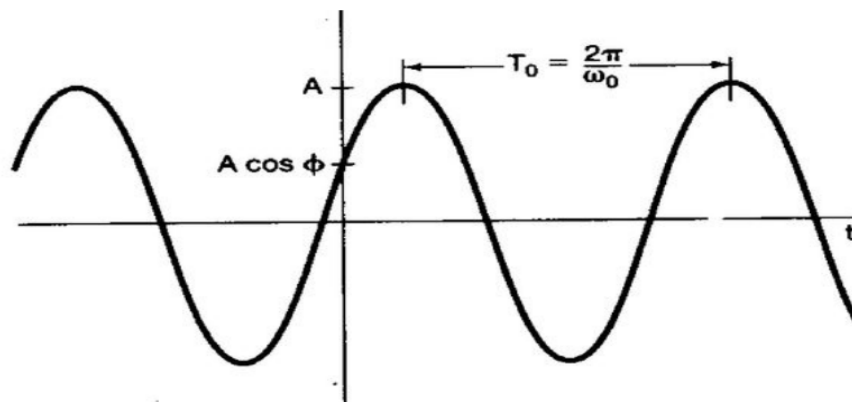
1. Različito pojačanje na različitim frekvencijama
(amplitudska karakteristika)
2. Različito kašnjenje na različitim frekvencijama
(fazna karakteristika)
3. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala (prenosna karakteristika)

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
- Amplitudom
- Početna fazom



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

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

Linearna izobličenja

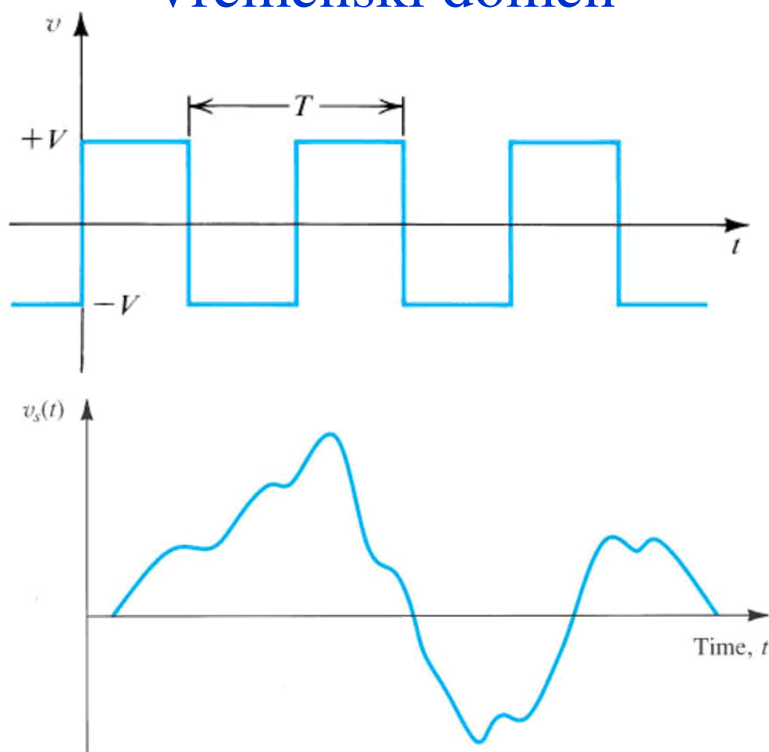
Spektar signala je skup harmonskih (sinusnih) komponenata koje sačinjavaju signal sa specifičnim vrednostima frekvencija, amplituda i početnih faza.

Pojačavači pojačavaju signal u određenom opsegu frekvencija. Zato je bitno utvrditi frekvencijski opseg koji zauzima spektar signala koji se pojačava.

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

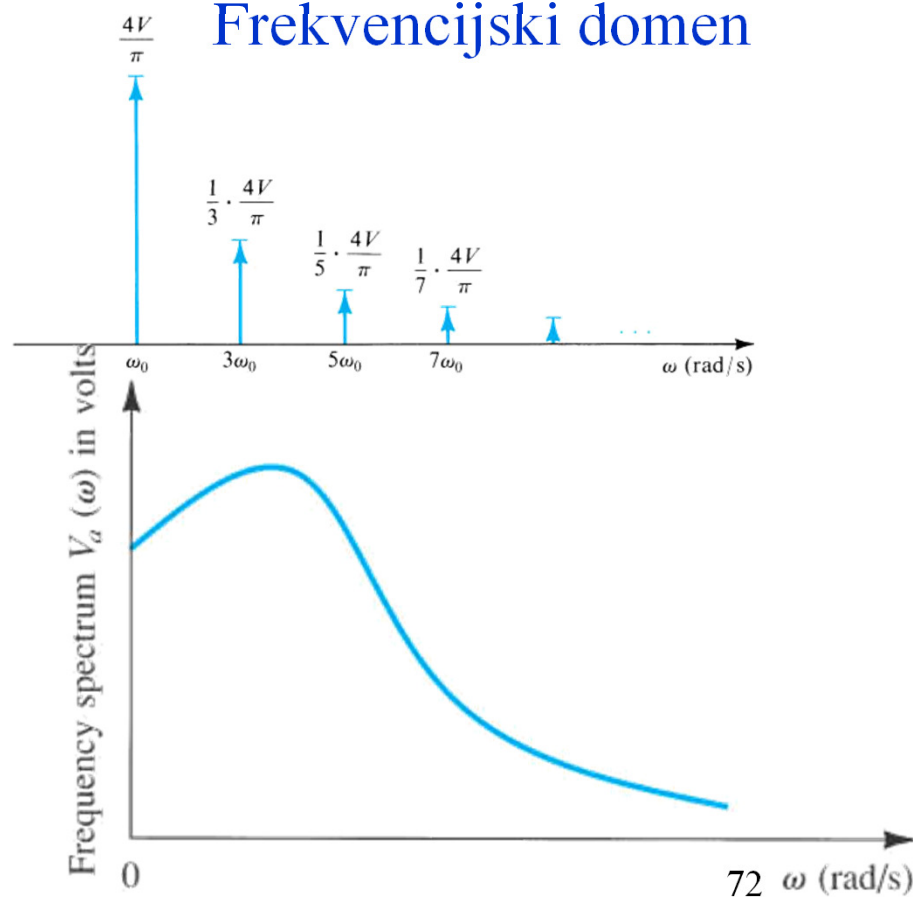
Spektar periodičnog signala nije kontinualan već diskretan jer sadrži isključivo komponente čije su frekvencije umnošci frekvencije signala. Neperiodični signali imaju kontinualni spektar (bezbroj sinusnih funkcija).

Vremenski domen



17. oktobar 2019.

Frekvencijski domen



Uvod

Linearna izobličenja

Frekvencijske karakteristike

Odnos Furijeove transformacije signala na izlazu $v_o(t)$ i Furijeove transformacije signala na ulazu $v_i(t)$ je **prenosna funkcija pojačavača $T(j\omega)$** .

$$T(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)}$$

Očigledno da se radi o kompleksnoj veličini za koju se može definisati moduo i argument.

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

Linearna izobličenja

Moduo prenosne funkcije je **amplitudska karakteristika** 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**.

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

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

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

a fazna karakteristika je linearna funkcija od frekvencije

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

Linearna izobličenja

Frekvencijski odziv pojačavača je odziv na sinusoidne 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

$$A(\omega) = |T(j\omega)| = \text{const}$$

Amplitudska izobličenja nastaju u pojačavaču čija karakteristika odstupa od idealne.

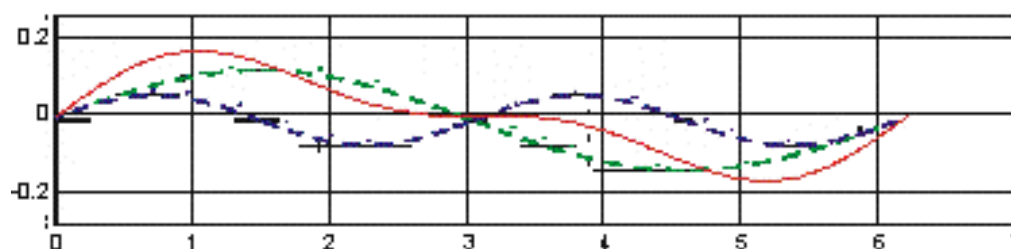
$$A(\omega) = |T(j\omega)| \neq \text{const}$$

Fazna izobličenja nastaju u pojačavaču čija fazna karakteristika odstupa od idealne

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

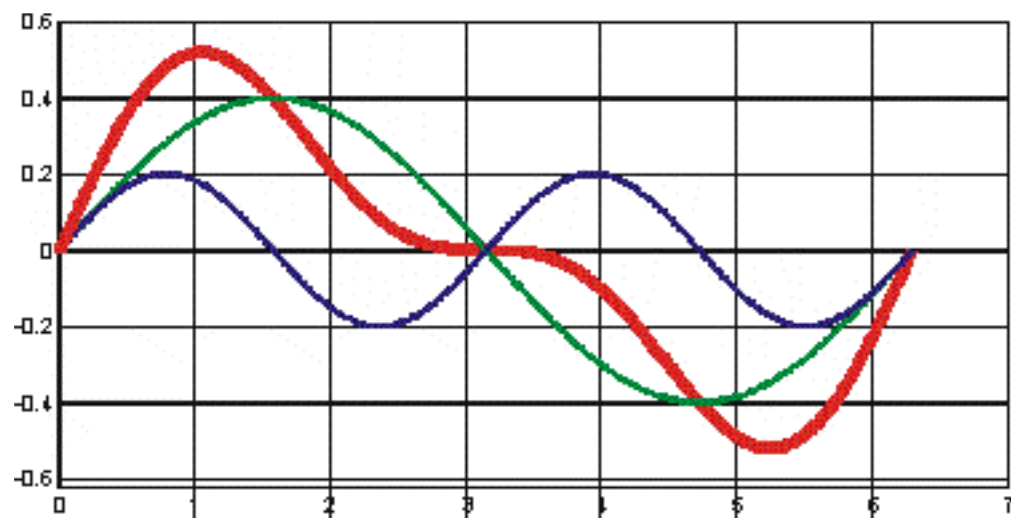
Prenosna karakteristika pojačavača

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



Ulazni signal

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

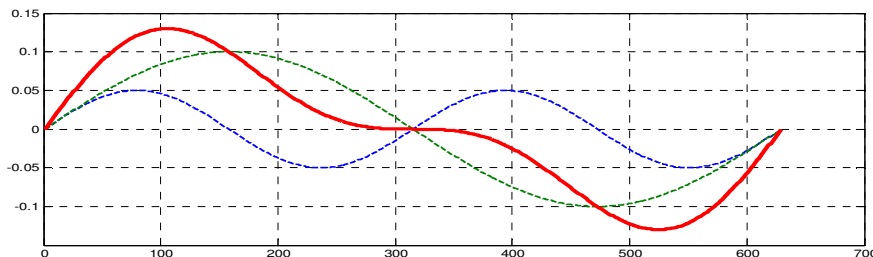


Izlaz

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

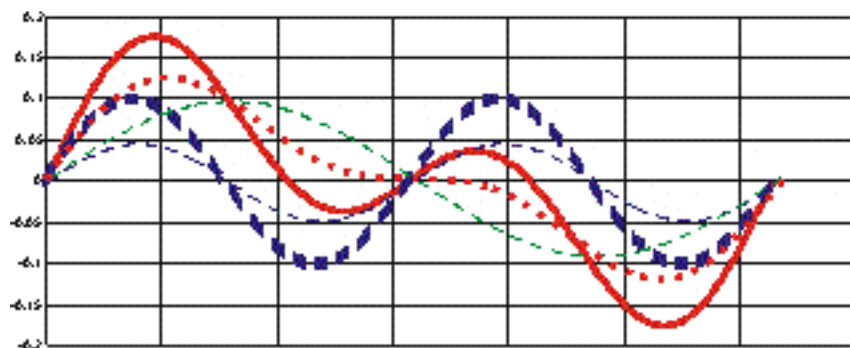
Pojačanje signala

Različito pojačanje na različitim frekvencijama



Ulazni signal

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



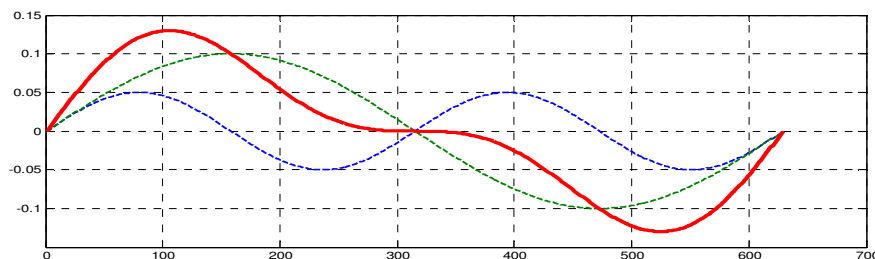
Izlazni signal

$$v_i(\omega t) = 1 \cdot v_u(\omega t) + 2 \cdot v_u(2\omega t)$$
$$v_i(\omega t) = 1 \cdot (0.1 \cdot \sin(\omega t)) +$$
$$+ 2 \cdot (0.05 \cdot \sin(2\omega t))$$

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

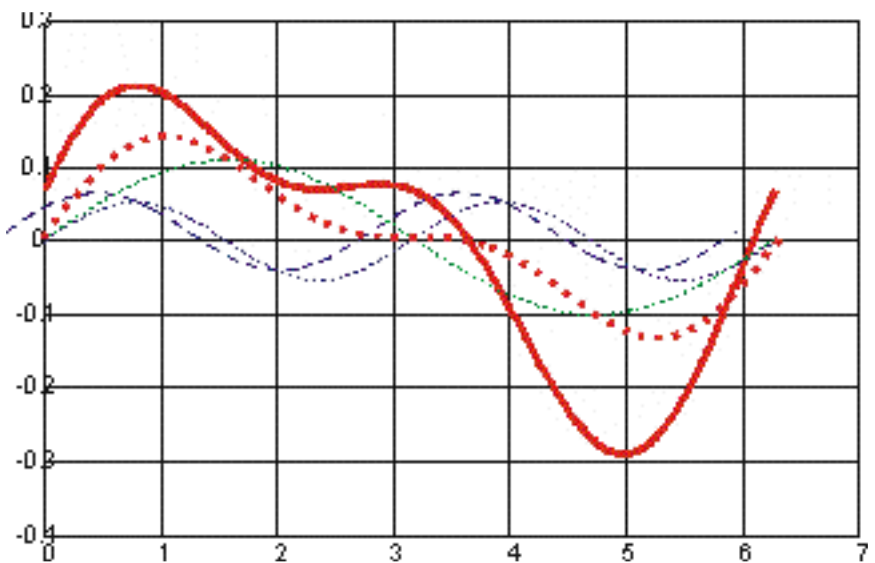
Pojačanje signala

Različito kašnjenje na različitim frekvencijama



Ulazni signal

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



Izlazni signal

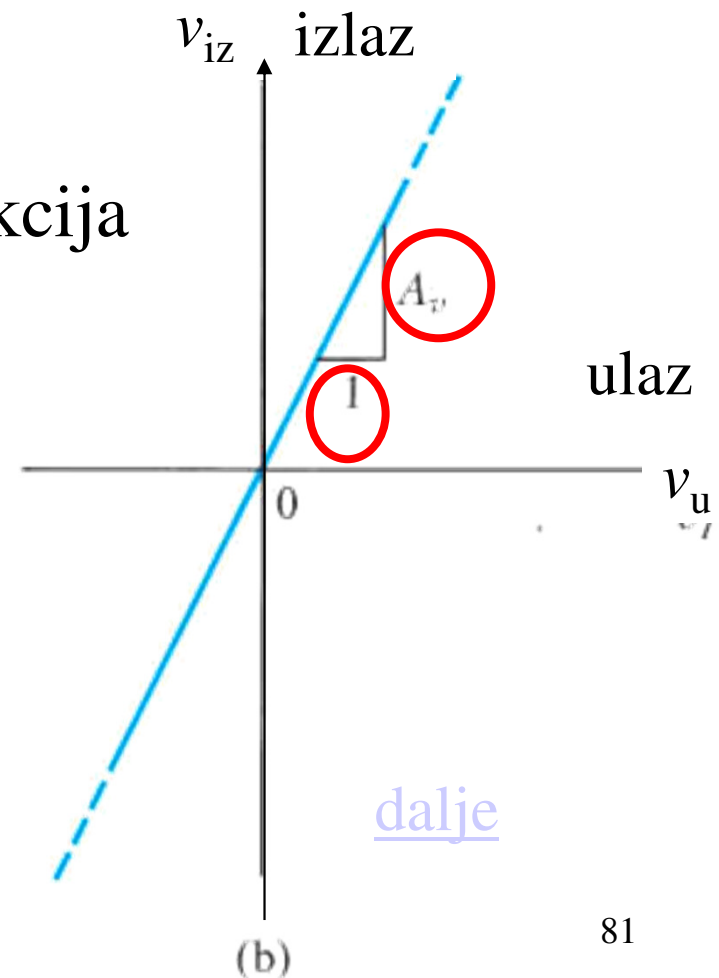
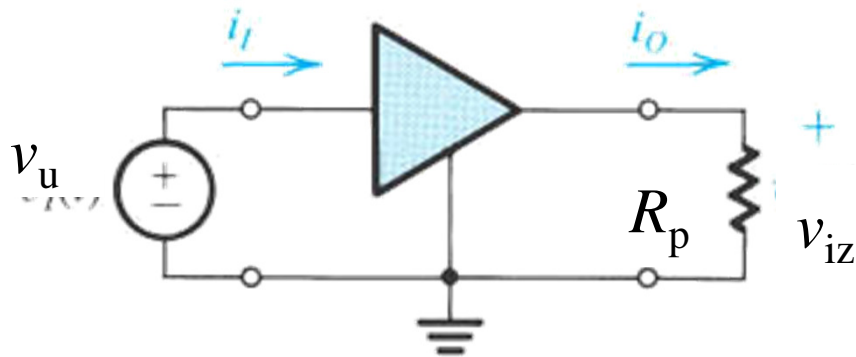
$$v_i = 2 \cdot (v_u(\omega t) + v_u(2\omega t + \pi/4))$$

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

Prenosna karakteristika pojačavača

Prenosna karakteristika predstavlja grafičku interpretaciju zavisnosti izlazne veličine (struje ili napona) od ulazne veličine (struje ili napona).

Prenosna karakteristika **linearnog pojačavača** je prava = linearna funkcija



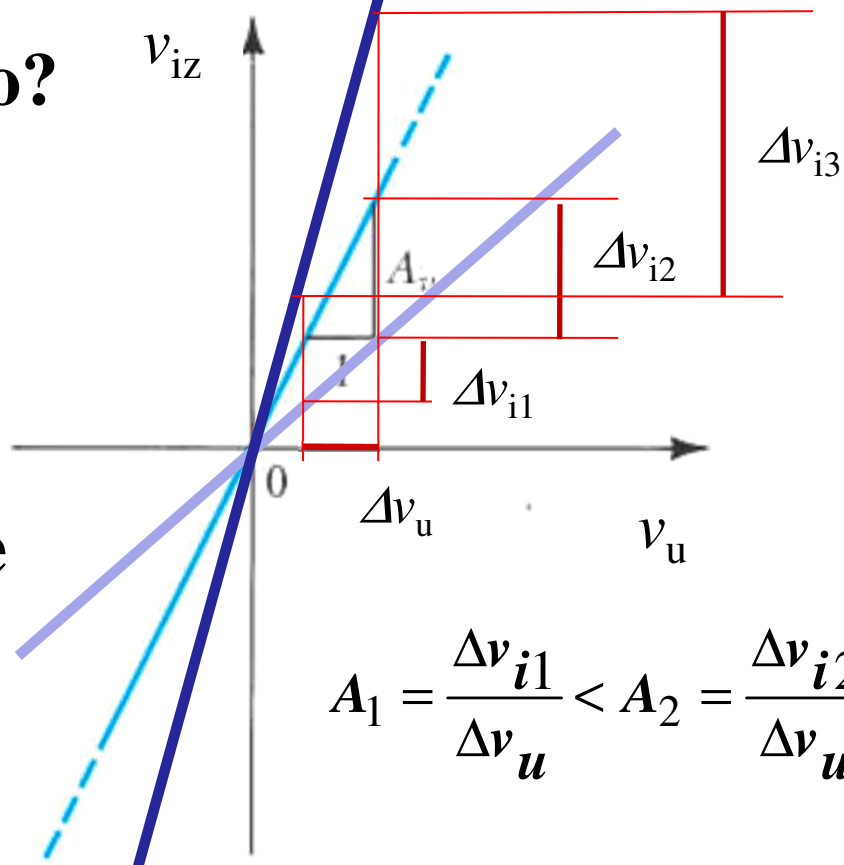
Prenosna karakteristika pojačavača

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?

$$A = \frac{\Delta v_{iz}}{\Delta v_u}$$

Nagib \leftrightarrow Pojačanje

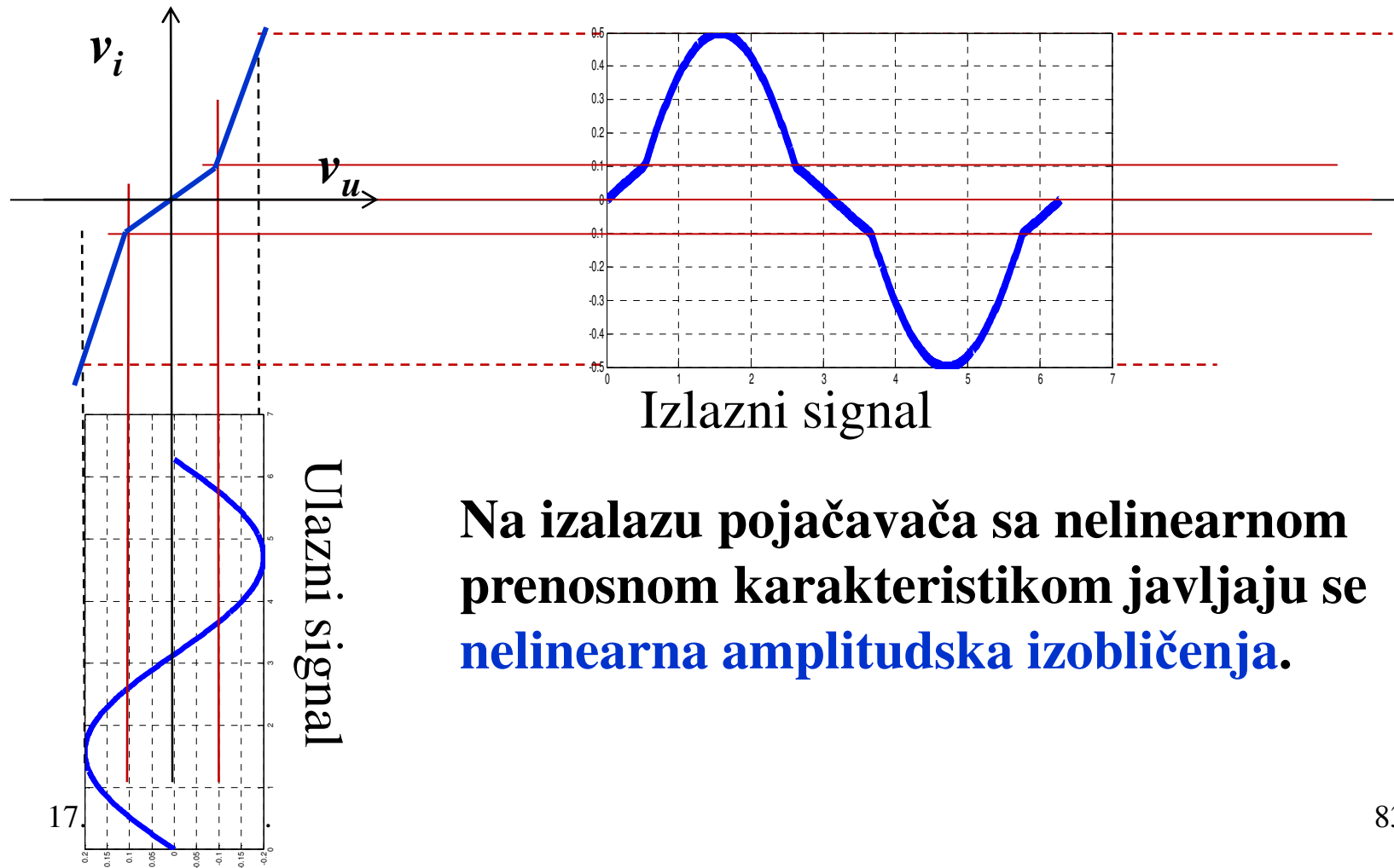


$$A_1 = \frac{\Delta v_{i1}}{\Delta v_u} < A_2 = \frac{\Delta v_{i2}}{\Delta v_u} < A_3 = \frac{\Delta v_{i3}}{\Delta v_u}$$

[dalje](#)

Prenosna karakteristika pojačavača

Šta ako **Prenosna karakteristika** nije linearna?

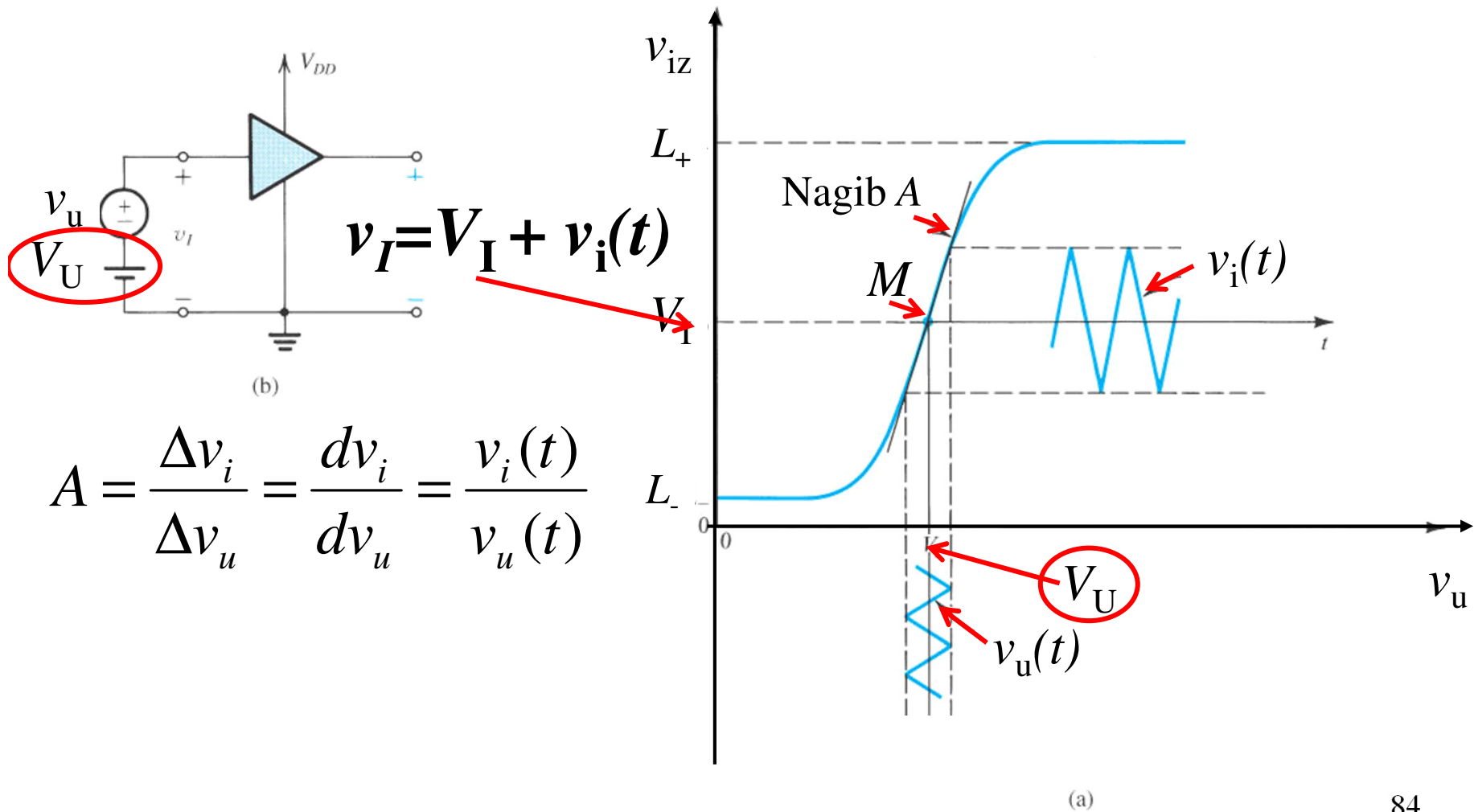


Na izlazu pojačavača sa nelinearnom prenosnom karakteristikom javljaju se nelinearna amplitudska izobličenja.

Prenosna karakteristika pojačavača

Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Prenosna karakteristika realnih pojačavača je *nelinearna*

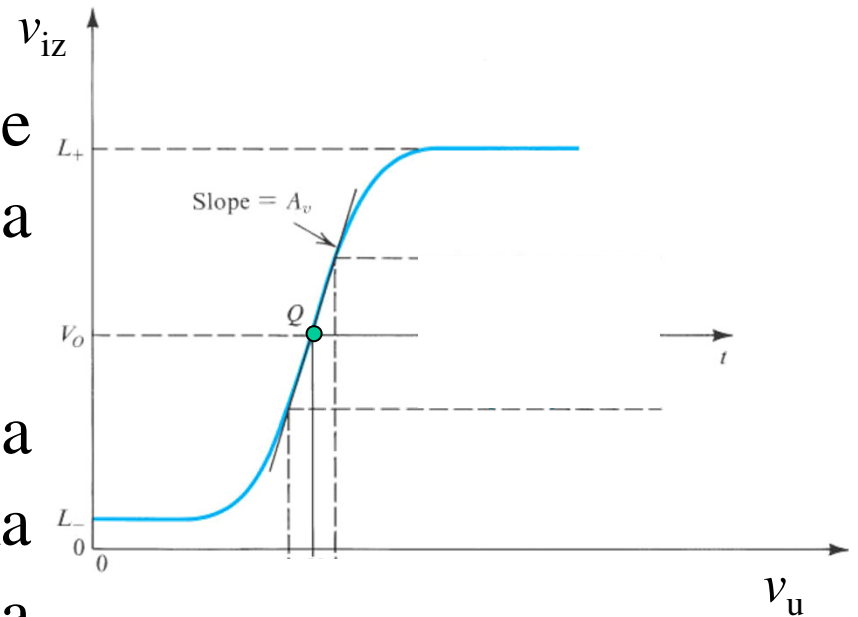


Prenosna karakteristika pojačavača

Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Realna prenosna karakteristika može da se tretira kao linearna samo za male signale.

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

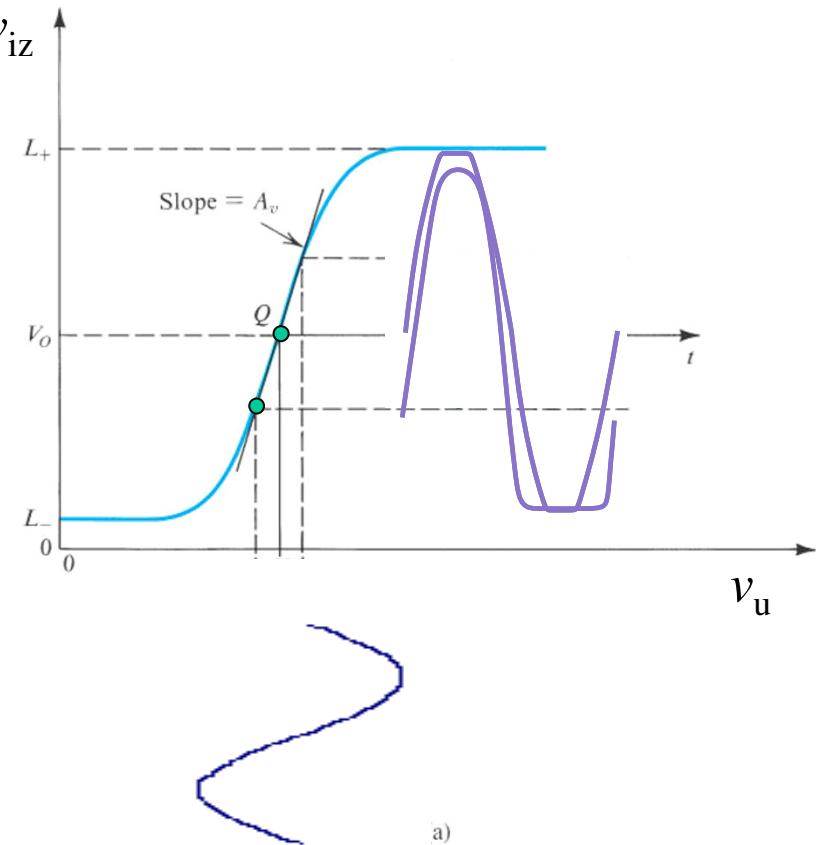


(a)

Prenosna karakteristika pojačavača

Nelinearnost je veća kada je signal veći v_{iz} i radna tačka dalja od sredine prenosne karakteristike. Tada je signal više izobličen.

Kao što je ranije rečeno na izlazu pojačavača sa nelinearnom prenosnom karakteristikom javljaju se **nelinearna amplitudska izobličenja**.



Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodični signal

$$v_u = V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)$$

$$\omega_2 = 1.1 \cdot \omega_1$$

$$v_i = V_{iM} + A v_u + A v_u^2$$

$$v_i = V_{IM} + \frac{A}{2} (V_{u1}^2 + V_{u2}^2) +$$

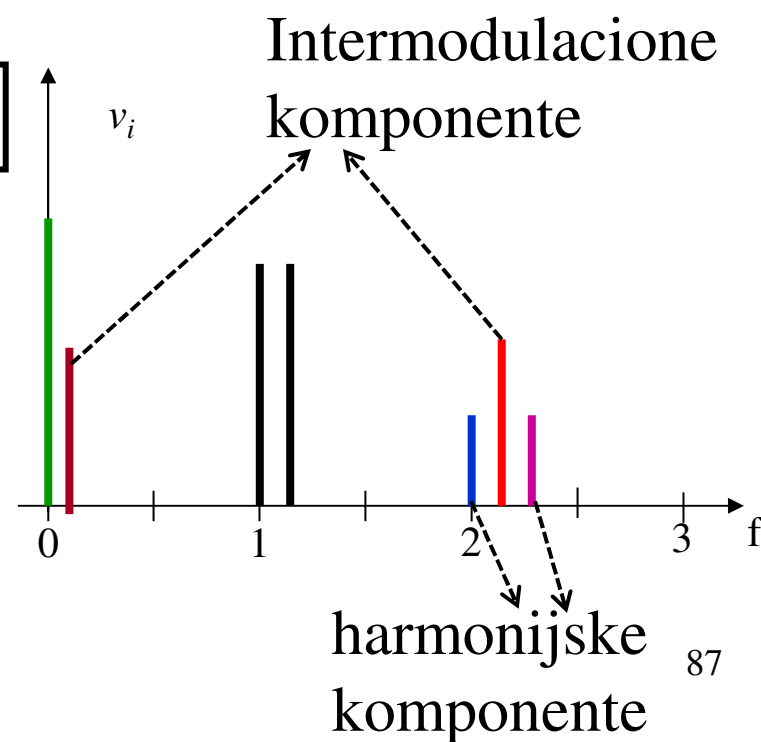
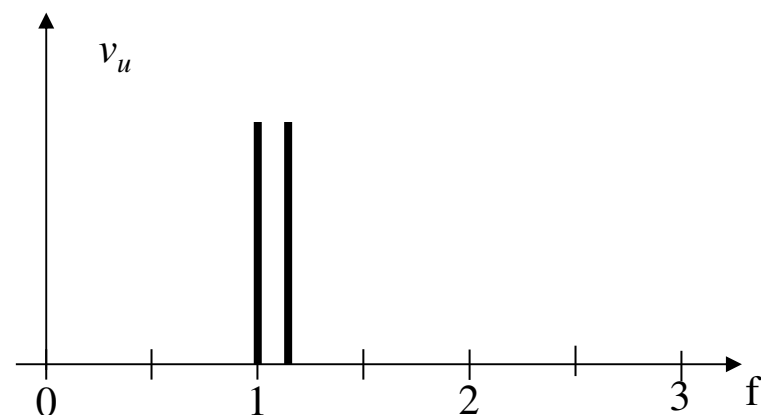
$$+ A (V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)) +$$

$$+ (A/2) V_{u1}^2 \cos(2\omega_1 t) +$$

$$+ (A/2) V_{u2}^2 \cos(2\omega_2 t) +$$

$$+ A V_{u1} V_{u2} \cos(\omega_1 + \omega_2)t +$$

$$+ A V_{u1} V_{u2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$



Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodični signal

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

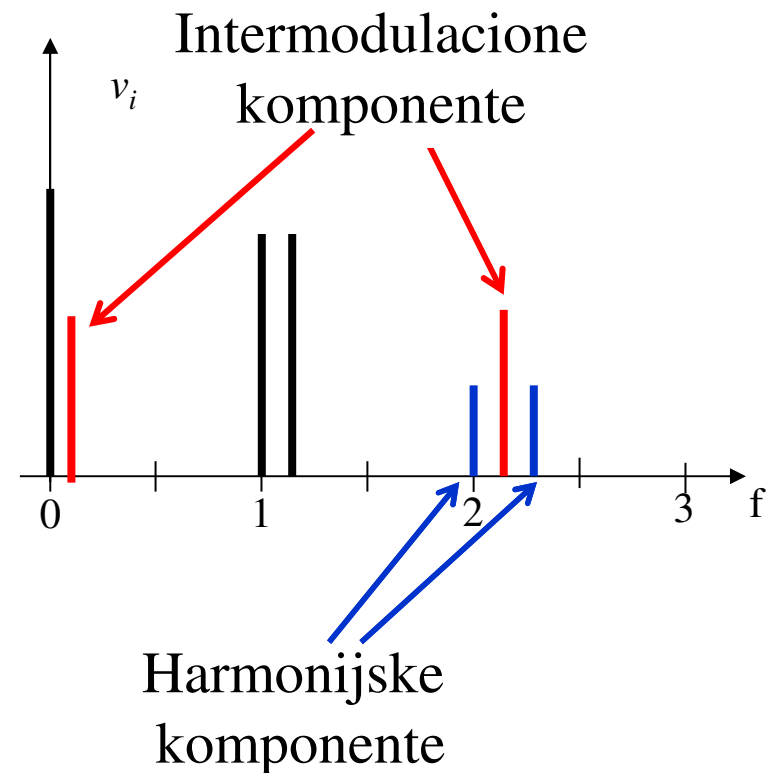
Nelinearna izobličenja se mogu podeliti na:

-Harmonijska izobličenja

(komponente spektra na frekvencijama koje su umnošci frekvencija ulaznog signala)

- Intermodulaciona izobličenja

(komponente spektra na frekvencijama koje odgovaraju zbiru ili razlici frekvencija ulaznog signala)



Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

1) Prema tipu signala koji se analizira na ulazu i izlazu pojačavača:

- naponski pojačavači (ulazni i izlazni signal je napon)
- strujni pojačavač (ulazni i izlazni signal je struja)
- transkonduktanski pojačavač (ulazni signal je napon, izlazni signal je struja)
- transrezistanski pojačavač (ulazni signal je struja, izlazni signal je napon)

Klasifikacija pojačavača

2) Prema veličini signala:

- Pojačivači malih signala
- Pojačivači velikih signala

Pojačivači malih signala su uvek linearni, uglavnom su to pojačavači napona.

Pojačavača velikih signala su pojačavači snage. Koriste se obično kao izlazni stepen. Kod njih se mora voditi računa o nelinearnim izobličenjima. Pojačivači velikih signala se dele zavisno od položaja radne tačke na pojačavače klase A, B, C.. (o ovome će biti više reči u lekciji pojačavači snage).

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

3) Prema frekvenciji signala:

- Niskofrekventni ili audio pojačavači
- Visokofrekventni ili RF pojačavači
- Širokopolasni pojačavači ili video pojačavači

Niskofrekventni pojačavači pokrivaju opseg 20 Hz÷20 kHz. Širokopolasni pojačavači pokrivaju opseg od nekoliko herca do nekoliko MHz. Visokofrekventni pojačavači pokrivaju uzani opseg frekvencija pa se zato nazivaju i selektivni pojačavači.

Elementarna pitanja

- 1. Šta su transduseri? Na koji način se modeluje izvor signala?**
- 2. Uloga pojačavača i uzroci izobličenja pojačavača.**
- 3. Ekvivalentno kolo idealnog i realnog naponskog pojačavača.**

Ostala ispitna pitanja

- 1. Kontrolisani generatori.**
- 2. Model četvoropola okarakterisan "h " parametrima.**
- 3. Ekvivalentna kola idealnog i realnog naponskog i strujnog pojačavača.**
- 4. Ekvivalentna kola idealnog i realnog transkonduktansnog i transrezistansnog pojačavača.**
- 5. Realni i idealni naponski pojačavač opterećen i pobuđen iz realnog izvora .**
- 6. Linearna izobličenja. Uzrok i posledice.**
- 7. Nelinearna amplitudska izobličenja. Uzrok i posledice.**
- 8. Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodičan signal.**
- 9. Klasifikacija pojačavača.**