

# Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (26.11.2016.)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2017.)	50%	20%
	-----	
	120%	60%



**Savet: Lakše preko kolokvijuma**

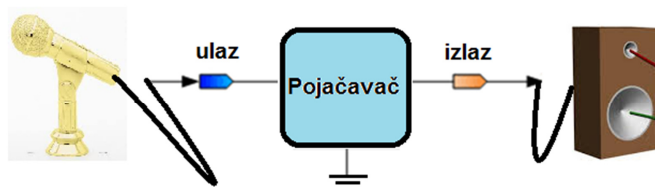
# Sadržaj

## 1. Uvod

- Definicija pojačanja
- Osobine pojačavača
- Simbol pojačavača
- Modeli pojačavača
- Klasifikacija pojačavača prema tipu signala
- Uzroci izobličenja signala
- Prenosna karakteristika pojačavača
- Frekvencijske karakteristike
- Polarizacija pojačavača
- Klasifikacija pojačavača prema nameni, tipu aktivnog elementa, konfiguraciji, položaju radne tačke, strukturi.

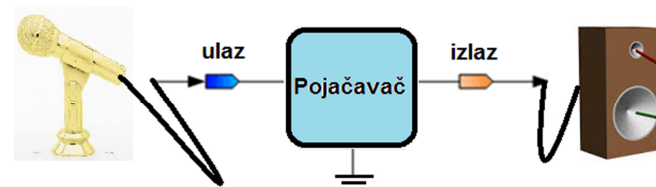
# Osnovi elektronike

**Projektovati audio pojačavač  
Specifikacija zahteva (šta se traži)**



# Osnovi elektronike

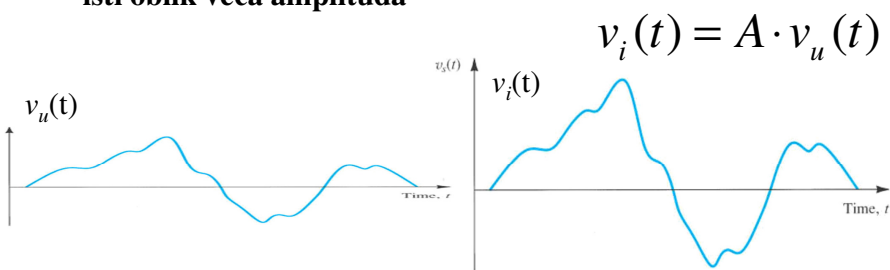
**Kakvi pojačavači postoje?  
Koje su im osobine?**



## Pojačanje signala

### Uloga pojačavača:

Da *pojača* ulazni signal **BEZ IZOBLIČENJA**  
isti oblik veća amplituda



Pojačanje  $A = const.$

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

5

## Pojačanje signala

### Uloga pojačavača:

Da *pojača* ulazni signal  
(napon, struja)  
**BEZ IZOBLIČENJA!**

Kakve karakteristike treba da ima da bi obavio tu ulogu?

*Odgovor kasnije - tokom kursa*

[dalje](#)



20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

## Pojačanje signala

### Modeli pojačavača:

Tokom kursa razmatraćemo pojačavače

različite složenosti (jednostepeni, višestepeni),  
sa različitim komponentama (BJT, MOSFET)  
u različitim režimima rada (mali signali, veliki signali)

Pre toga razmatramo

**GENERALIZOVANI** model na **FUNKCIONALNOM** nivou  
(nivo\_ponašanja = bihevioralni - šta rade, a ne kako i  
na osnovu čega obavljaju funkciju).

Na funkcionalnom nivou klasifikujemo pojačavače prema  
*tipu signala*

20. oktobar 2016.

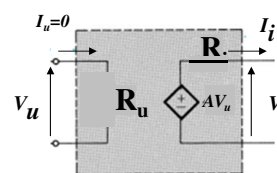
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

7

## Pojačanje signala

### Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

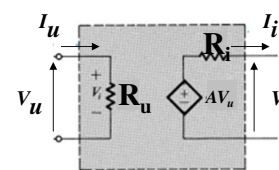
Naponski:  $V_u \rightarrow V_i$



**Idealni**

$$A = \frac{V_i}{V_u} \text{ [V/V]}; \quad R_u = \infty \\ R_i = 0$$

**Realni**



$$R_u < \infty ; \quad R_i > 0$$

$$A = A_o = \left. \frac{V_i}{V_u} \right|_{I_i=0} \text{ [V/V]};$$

Zašto je ovo važno?



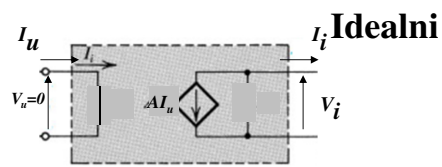
20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

8

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

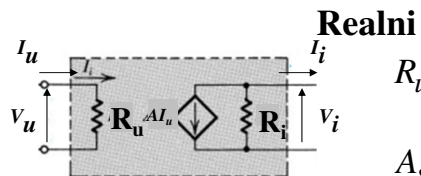
Strujni:  $I_u \rightarrow I_i$



**Idealni**

$$A_s = \frac{I_i}{I_u} \quad [A/A]; \quad R_u = 0$$

$$R_i = \infty$$



**Realni**

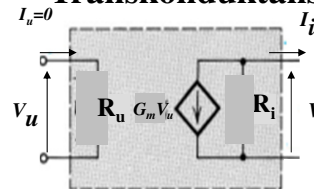
$$R_u > 0 \quad R_i < \infty$$

$$A_s = A_{s0} = \frac{I_i}{I_u} \Big|_{v_i=0} \quad [A/A];$$

Zašto je ovo važno? 🤔

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

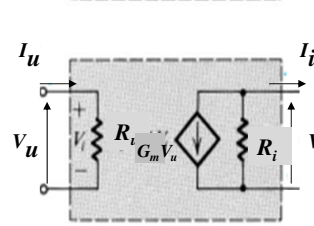
Transkonduktanski:  $V_u \rightarrow I_i$  (napon u struju)



**Idealni**

$$G_m = \frac{I_i}{V_u} \quad [A/V] \quad R_u = \infty$$

$$R_i = \infty$$



**Realni**

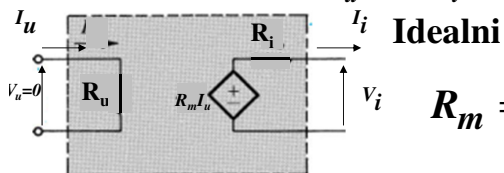
$$R_u < \infty \quad R_i < \infty$$

$$G_m = G_{m0} = \frac{I_i}{V_u} \Big|_{v_i=0} \quad [A/V];$$

Zašto je ovo važno? 🤔

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

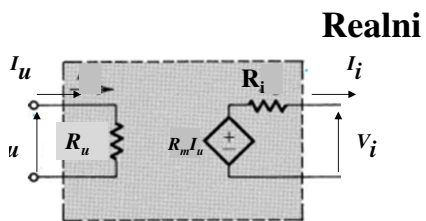
Transrezistanski:  $I_u \rightarrow V_i$  (struja u napon)



**Idealni**

$$R_m = \frac{V_i}{I_u} \quad [V/A] \quad R_u = 0$$

$$R_i = 0$$

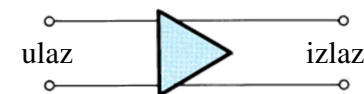


**Realni**

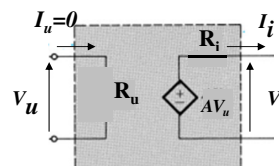
$$R_u > 0 \quad R_i > 0$$

$$R_m = R_{m0} = \frac{V_i}{I_u} \Big|_{I_i=0} \quad [V/A];$$

Model pojačavača **napona**



**Idealni**

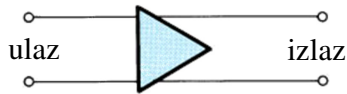


$$A = \frac{V_i}{V_u} \quad [V/V]; \quad R_u = \infty$$

$$R_i = 0$$

## Pojačanje signala

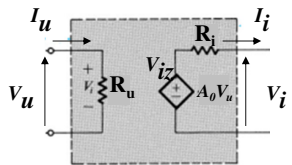
### Model pojačavača napona



$$R_u < \infty ; R_i > 0$$

$$A_0 = \frac{V_{iz}}{V_u} \quad [\text{V/V}]$$

### Realni

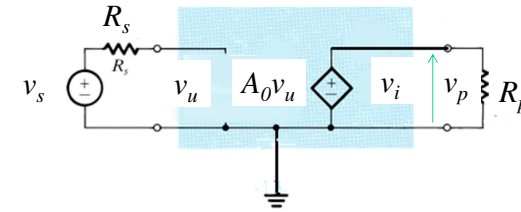
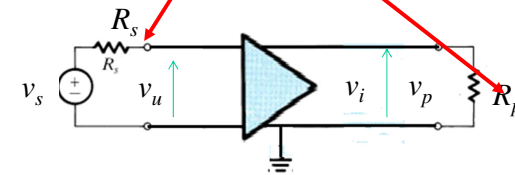


$$A = \frac{V_i}{V_u} = A_0 = \frac{V_{iz}}{V_u} \quad [\text{V/V}] \quad I_i = 0$$

Zašto je ovo važno? 🤔

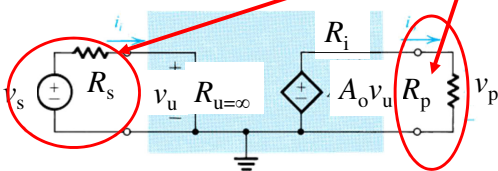
## Pojačanje signala

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



## Pojačanje signala

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



$$v_{iz} = A_0 \cdot v_u$$

$$v_u = v_s$$

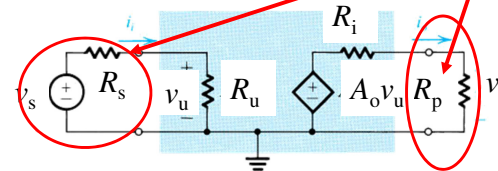
**Ukupno pojačanje**

$$A = \frac{v_p}{v_s} = \frac{v_{iz}}{v_u} = A_0$$

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

## Pojačanje signala

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



$$v_p = A_0 \cdot v_u \cdot \frac{R_p}{R_p + R_i}$$

$$A \equiv \frac{v_p}{v_u} = A_0 \cdot \frac{R_p}{R_p + R_i}$$

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

**Ukupno pojačanje**

$$\frac{v_p}{v_s} = A_0 \cdot \frac{R_u}{R_u + R_s} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_i}$$

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

## 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)



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

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

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

17

### Pojačanje signala

$$A = A_v = \frac{v_i(t)}{v_u(t)} \quad \text{Pojačanje napona}$$

$$A_s = \frac{i_i(t)}{i_u(t)} \quad \text{Pojačanje struje}$$

$$A_p = \frac{P_i(t)}{P_u(t)} \quad \text{Pojačanje snage}$$

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

18

### Pojačanje signala

#### Jedinica mere pojačanja?

$$A = \frac{V_i}{V_u} \quad A_s = \frac{i_i}{i_u} \quad A_p = \frac{P_i}{P_u}$$

V/V,                      A/A,                      W/W

Iz praktičnih (i istorijskih) razloga koristi se logaritamska skala:

$$a_v = 20 \log |A|$$

$$a_s = 20 \log |A_s| \quad \text{dB}$$

$$a_p = 10 \cdot \log |A_p| \quad \text{dB}$$



20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

19

### Pojačanje signala

#### Pažnja?

Često se koristi dB da iskaže vrednost *fizičke veličine!* Tada dB označava vrednost u odnosu na 1, a dBm u odnosu na  $10^{-3}$  (napona, struje ili snage).

$$V_i = 20 \log \left| \frac{V_i}{1V} \right| \quad \text{dB}$$

$$P_i = 10 \log \left| \frac{P_i}{1W} \right| \quad \text{dBw}$$

$$V_i = 20 \log \left| \frac{V_i}{1mV} \right| \quad \text{dBm}$$

$$P_i = 10 \log \left| \frac{P_i}{1mW} \right| \quad \text{dBm}$$

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

20

## Pojačanje signala

Koliki se napon očekuje na izlazu pojačava pobuđenog naponom od 0.1mV ako se zna da mu je pojačanje:

60 dB	(0.1V)
0 dB	(0.1mV)
-20 dB	(0.01mV)



Koliko je pojačanje u dB kod pojačavača kod koga je pri ulaznom naponu od 1mV izmeren izlazni napon od

1 V	(60dB)
100 mV	(40dB)
100 μV	(-20dB)



## Domaći 2.1 Pojačanje signala

Zadatak: Pojačavač sa pojačanjem  $A_o=40\text{dB}$ ,  $R_u=10\text{k}$ ,  $R_{iz}=1\text{k}$ , pobuđuje potrošač od  $R_p=1\text{k}$ .

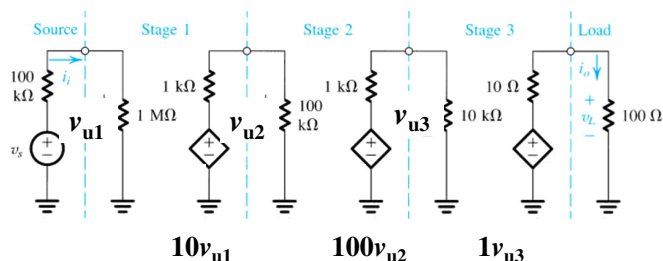
Izračunati ukupno naponsko pojačanje i pojačanje snage iskazano u dB.

(50 V/V; 44dB)



## Domaći 2.2 Pojačanje signala

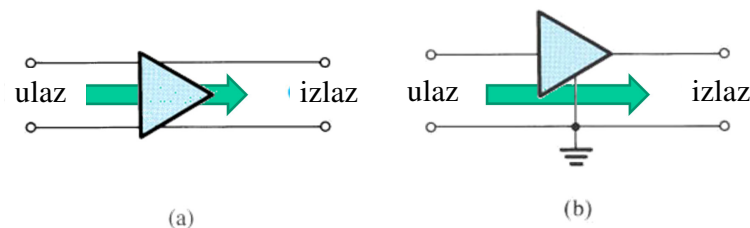
Zadatak: Izračunati ukupno naponsko i pojačanje snage trostepenog pojačavača sa slike pobuđenog izvorom čija je izlazna otpornost 100k i opterećenog potrošačem od 100Ω.



(743,6 V/V; 57,4 dB; 66,9 10<sup>8</sup> W/W; 98,3dB)

## Pojačanje signala

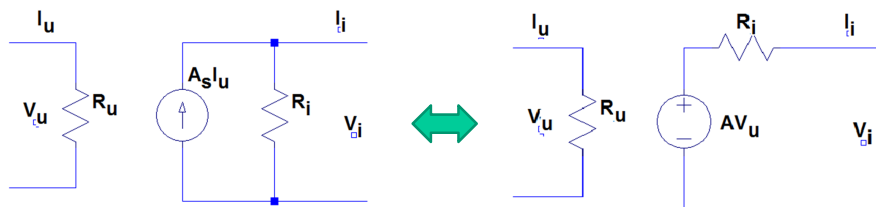
Svi prikazani modeli su *unilateralni*: prenose signal samo u jednom pravcu - sa ulaza prema izlazu.



## Pojačanje signala

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

Primer:



$$V_i = A_s \cdot I_u \cdot R_i = A_s \cdot \frac{V_u}{R_u} \cdot R_i$$

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

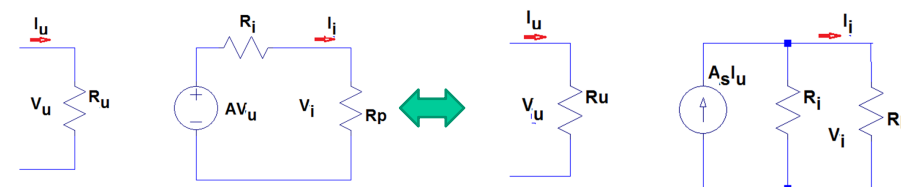
20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

25

## Pojačanje signala

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



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

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

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

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

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

$$A_s = \frac{R_u}{R_i} \cdot A$$

20. oktobar 2016.

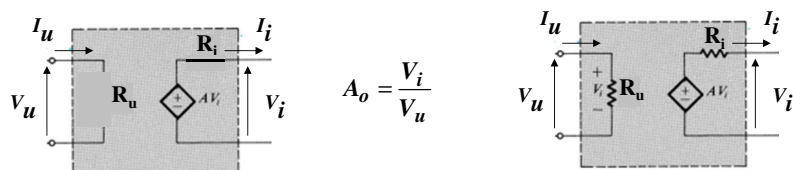
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

26

## Pojačanje signala

Najčešće ćemo u okviru ovog kursa govoriti o

Pojačavačima napona:



Idealni

Realni

$$A_o = \frac{V_i}{V_u}$$

Zašto je ovo važno?



20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

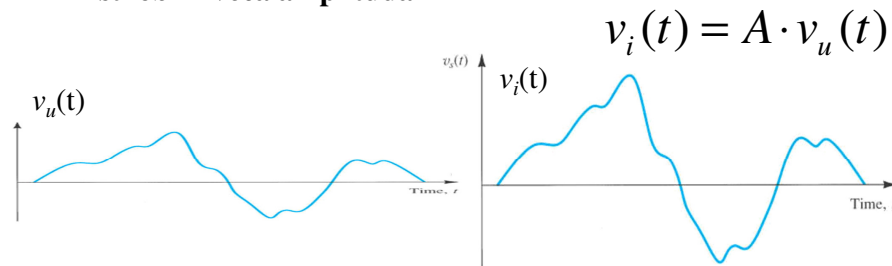
27

## Pojačanje signala

Uloga pojačavača:

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

isti oblik veća amplituda



Pojačanje  $A = const.$

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

28

Uloga pojačavača:

# Da *pojača* ulazni signal

(napon, struja)

## BEZ IZOBLIČENJA!

Kakve karakteristike treba da ima da bi obavio tu ulogu?

Odgovor kasnije - tokom kursa

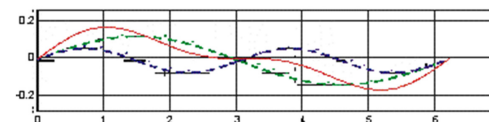
20. oktobar 2016.

Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

[dalje](#) [da](#)

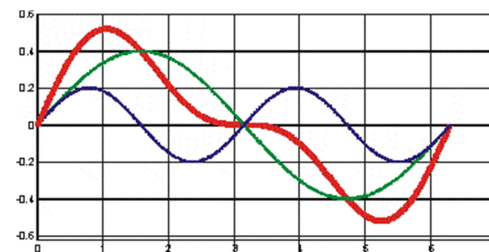


Razmotrimo primer idealizovanog pojačavača sa  $A=4$  koji treba da pojača *složenoperiodični* signal



Ulazni signal

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



Izlaz

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

20. oktobar 2016.

Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

30

Uloga pojačavača:

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

Kako može doći do izobličenja?

1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala
2. Različito pojačanje na različitim frekvencijama (spektralne komponente)
3. Različito kašnjenje na različitim frekvencijama (spektralne komponente)

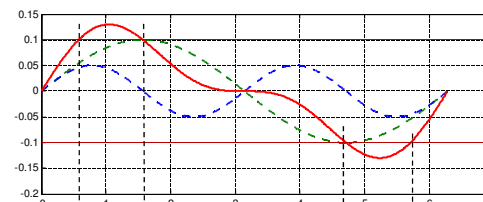
20. oktobar 2016.

Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

[dalje](#) [dalje2](#)

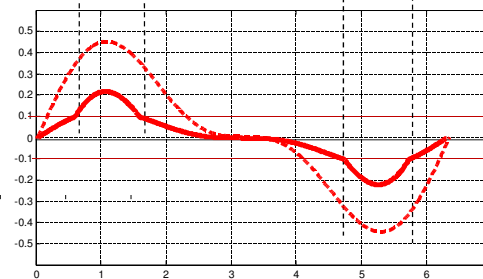
31

### 1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala



Ulazni signal

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



Izlaz

$$v_i = v_u \quad \text{za} \quad |v_u| \leq 0.1V$$

$$v_i = 4 \cdot v_u \quad \text{za} \quad |v_u| > 0.1V$$

20. oktobar 2016.

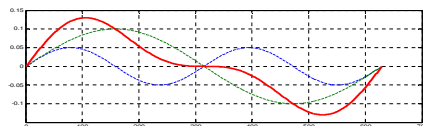
Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

32



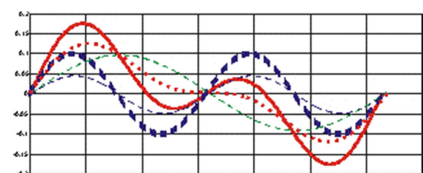
## Pojačanje signala

### 2. 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)

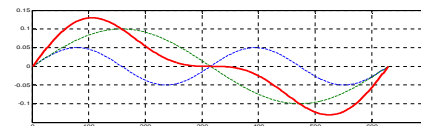
20. oktobar 2016.

Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

33

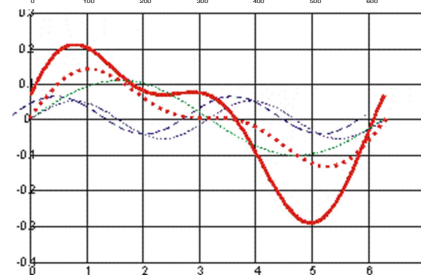
## Pojačanje signala

### 3. Različito kašnjenje na različitim frekvencijama



Ulazni signal

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



Izlazni signal

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

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

20. oktobar 2016.

Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

34

## Pojačanje signala

**Uloga pojačavača:** Da *pojača* ulazni signal *bez izobličenja*

Kakve karakteristike treba da ima da bi obavio tu ulogu? 🤔

- Linearnost: izlazni signal  $A$  puta veći od ulaznog.
- Isto pojačanje na svim frekvencijama spektar
- Zadržati isti odnos faza (kašnjenje) svim spektralnim komponentama (frekvencijama)

O svemu ovome biće više reči kasnije tokom kursa.

Za početak podrazumevamo da idealizovani pojačavač ispunjava sve navedene zahteve.

[dalje](#) [dalje2](#)

20. oktobar 2016.

Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

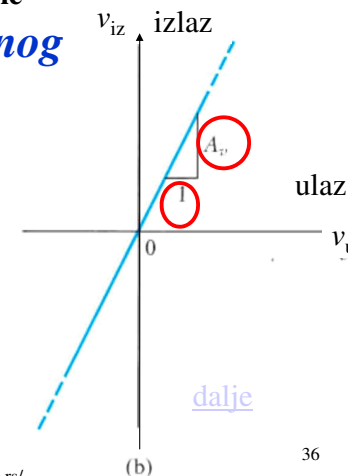
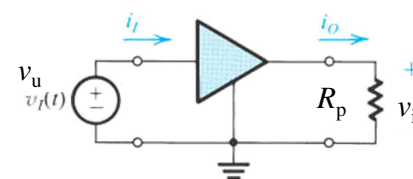
35

## Pojačanje signala

### Prenosna karakteristika pojačavača

Prenosna karakteristika predstavlja grafičku interpretaciju zavisnosti **izlazne** od **ulazne** veličine

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



20. oktobar 2016.

Uvod  
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

36

## Pojačanje signala

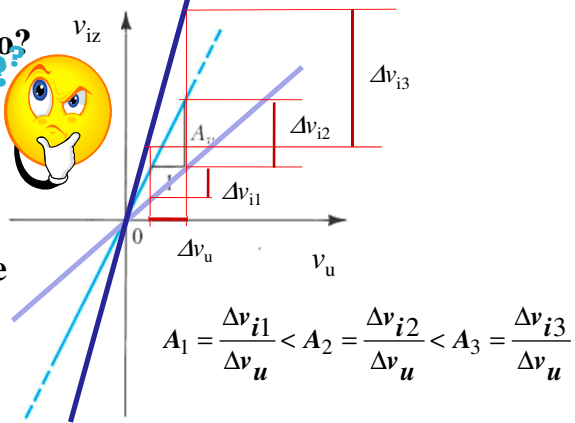
### Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?



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

Nagib  $\leftrightarrow$  Pojačanje



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

(b)

[dalje](#)

20. oktobar 2016.

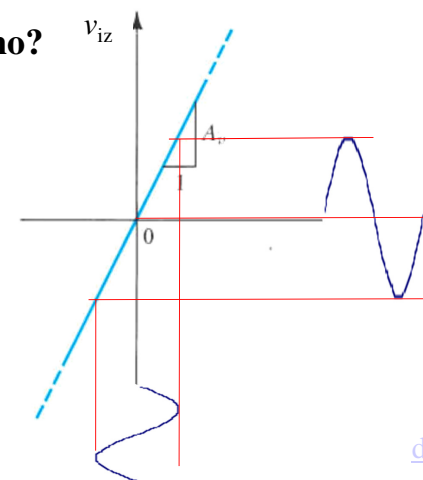
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

37

## Pojačanje signala

### Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?



[dalje](#)

20. oktobar 2016.

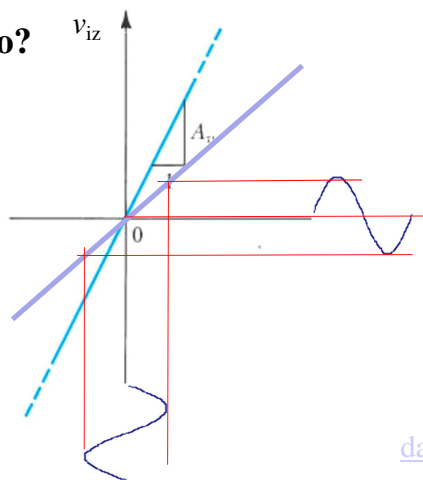
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

38

## Pojačanje signala

### Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?



[dalje](#)

20. oktobar 2016.

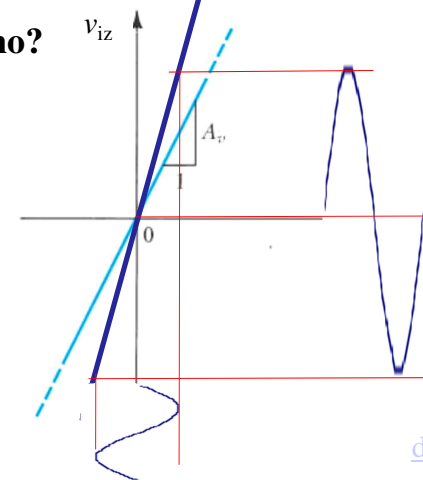
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

39

## Pojačanje signala

### Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?



[dalje](#)

20. oktobar 2016.

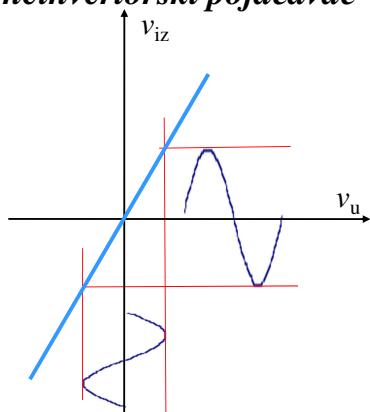
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

40

## Pojačanje signala

### Prenosna karakteristika

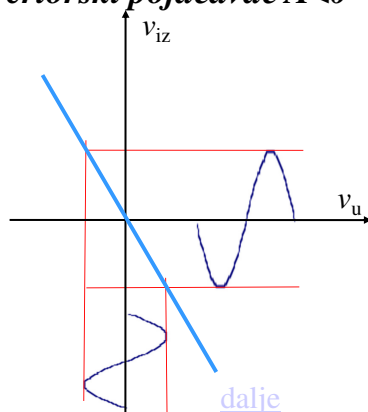
Talasni oblik napona  $v_i$  :  
neinvertorski pojačavač



ne obrće fazu

Zašto je ovo važno?

invertorski pojačavač  $A < 0$



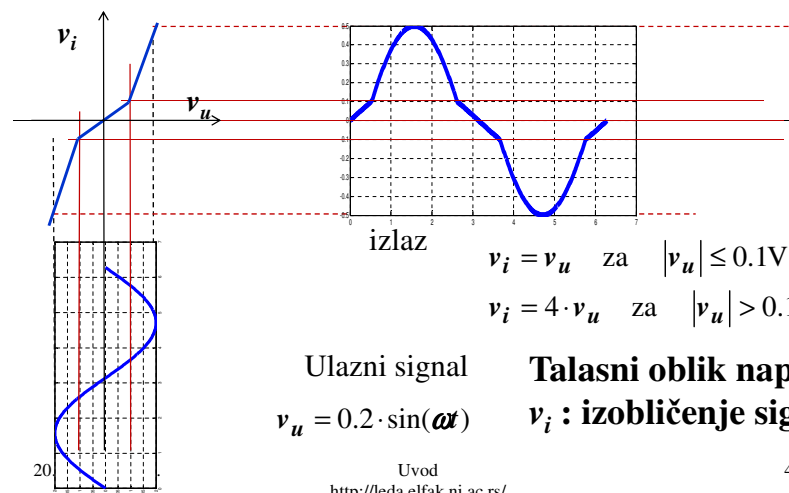
obrće fazu

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

41

## Pojačanje signala

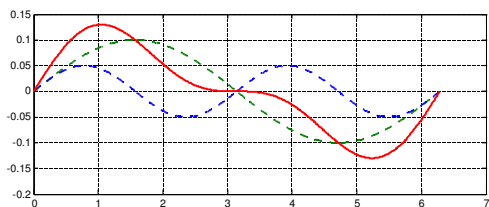
Prenosna karakteristika Šta ako nije linearna?



42

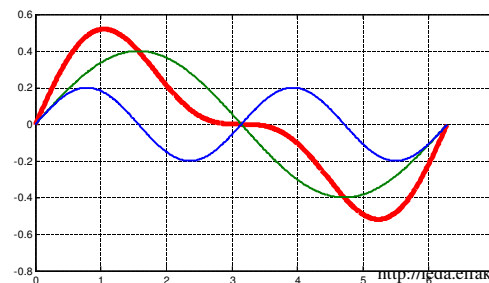
## Pojačanje signala

Razmotrimo ponovo 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

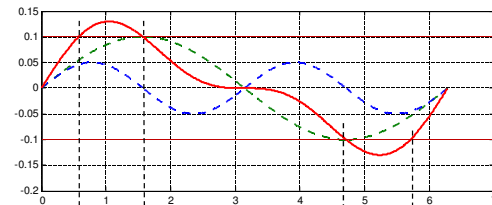
$$v_{iz} = A \cdot v_u = 4 \cdot (0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t))$$

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

43

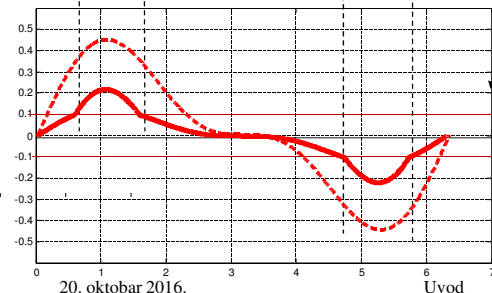
## Pojačanje signala

1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala



Ulazni signal

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



Izlaz

$$v_i = v_u \text{ za } |v_u| \leq 0.1V$$

$$v_i = 4 \cdot v_u \text{ za } |v_u| > 0.1V$$

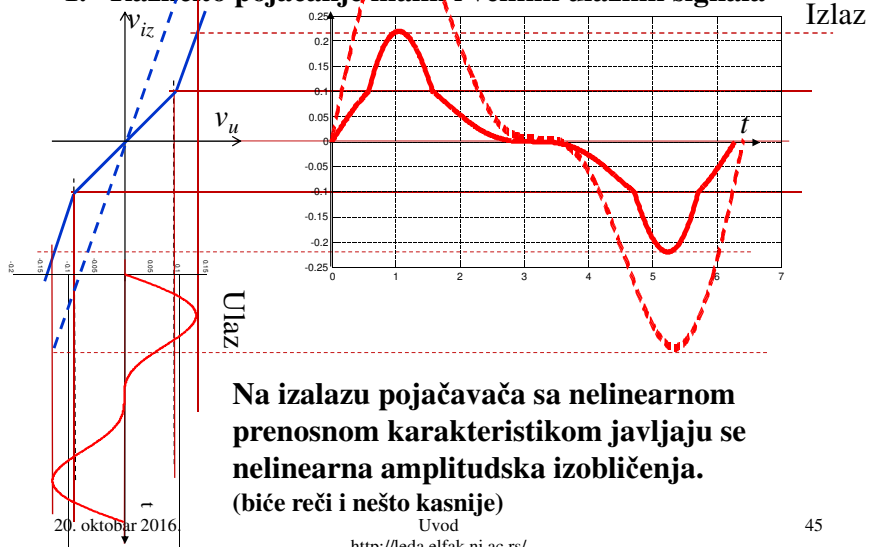
20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

44

## Pojačanje signala

### 1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala

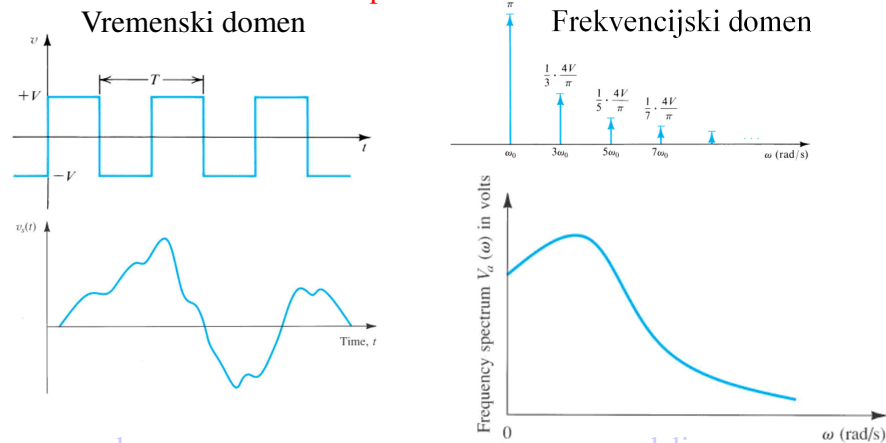


45

## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Da se podsetimo



20. oktobar 2016.

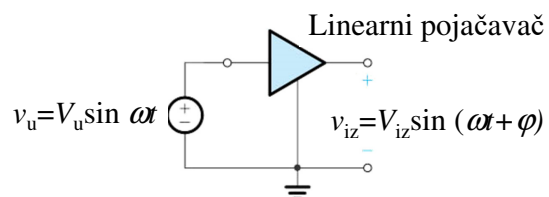
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

46

## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Važno je utvrditi kakve osobine mora da ima pojačavač da bi mogao da ispuni tražene [zahteve](#)



Na izlazu linearnog pojačavača pobuđenog prostoperiodičnim signalom javlja se signal istog oblika, A puta veće amplitude, iste frekvencije a pomerene faze (kasni).

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

47

## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Faza se razlikuje  $\rightarrow$  signal *kasni*

kašnjenje signala  $\rightarrow$  izlaz *kompleksna* veličina

*\*Odakle potiče kompleksni karakter?*

Impedanse reaktivnih elemenata ( $L$  i  $C$ ) su kompleksne veličine.

$$(Z_C = 1/j\omega C, Z_L = j\omega L)$$

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

48

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Pojačavač bez reaktivnih elemenata ne postoji!

(makar kao parazitni elementi)

Zato su i električne veličine na izlazu pojačavača kompleksne ( $V_i, I_i$ ).

Funkcija koja povezuje izlaznu i ulaznu veličinu i određuje ponašanje odziva na frekvenciji  $\omega$  zove se

**PRENOSNA FUNKCIJA** pojačavača,  $T(j\omega)$ :

$$V_i(j\omega) = T(j\omega) \cdot V_u(j\omega).$$

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

U opštem slučaju to je kompleksna veličina definisana modulom i fazom:

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

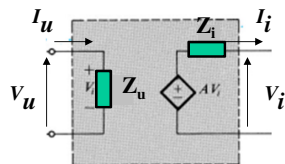
$$|T(j\omega)| = \left| \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)} \right|.$$

$$\angle T(j\omega) = \varphi(\omega).$$

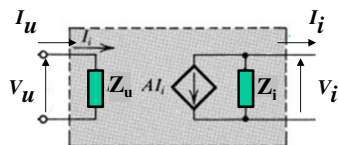
Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Zavisno od tipa signala koji se pojačava  $T(j\omega)$ , može biti  $A, A_s, G_m, R_m$ .

$$T(j\omega) = A(j\omega) = \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)};$$



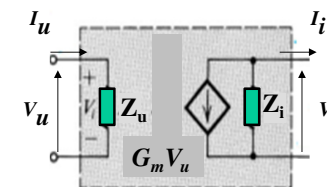
$$T(j\omega) = A_s(j\omega) = \frac{I_i(j\omega)}{I_u(j\omega)};$$



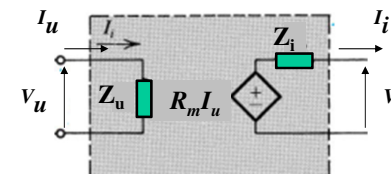
Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Zavisno od tipa signala koji se pojačava  $T(j\omega)$ , može biti  $A, A_s, G_m, R_m$ .

$$T(j\omega) = G_m(j\omega) = \frac{I_i(j\omega)}{V_u(j\omega)};$$



$$T(j\omega) = R_m(j\omega) = \frac{V_i(j\omega)}{I_u(j\omega)};$$



## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Izlazni signal = Odziv pojačavača na *prostoperiodični* pobudni signal frekvencije  $\omega$  potpuno je definisan (znaju se njegov moduo i faza) ako je poznato  $T(j\omega)$ .

$$V_i(j\omega) = T(j\omega) \cdot V_u(j\omega)$$

Zato je važno znati kako se definišu, a i kako se mere **MODUO** i **FAZA (ARGUMENT)** prenosne funkcije.

## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Moduo prenosne funkcije meri se kao odnos amplituda *odziva (izaz)* i *pobude (ulaz)* pojačavača na frekvenciji  $\omega$

$$|T(j\omega)| = \frac{V_i(\omega)}{V_u(\omega)} = \frac{V_{ieff}(\omega)}{V_{ueff}(\omega)};$$

## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Po definiciji moduo i faza kompleksnog broja određuju se kao

$$|T(j\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}\{T(j\omega)\}^2 + \operatorname{Im}\{T(j\omega)\}^2} = \sqrt{T(j\omega) \cdot T(-j\omega)};$$
$$\angle T(\omega) = \varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\operatorname{Im}\{T(j\omega)\}}{\operatorname{Re}\{T(j\omega)\}} \right].$$

Za analizu ponašanja pojačavača u zavisnosti od frekvencije  $\omega$  pogodniji je drugačiji pristup.

## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Prenosna funkcija pojačavača u opštem slučaju može da se prikaže u obliku količnika polinoma po  $s=j\omega$ :

$$T(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}$$

ili u faktorisanom obliku:

$$T(s) = \frac{a_n (s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_n)}{b_m (s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_m)}$$

$z_i$  - nule

$p_j$  - polovi

$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$$

Frekvencijske karakteristike (obnoviti iz matematike)

Moduo količnika polinoma  $N(s)$  i  $D(s)$  može se izračunati na osnovu sledećih izraza:

kada je funkcija poznata u obliku

$$T(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}$$

$$|T(s)| = \sqrt{\frac{\text{Re}\{N(s)\}^2 + \text{Im}\{N(s)\}^2}{\text{Re}\{D(s)\}^2 + \text{Im}\{D(s)\}^2}}$$

ili

kada je funkcija poznata u obliku

$$T(s) = \frac{a_n(s - z_1)(s - z_2)\dots(s - z_n)}{b_m(s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_m)}$$

$$|T(j\omega)| = \frac{a_n}{b_m} \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^n (z_i^2 + \omega^2)}{\prod_{i=1}^m (p_i^2 + \omega^2)}}$$

Frekvencijske karakteristike (obnoviti iz matematike)

Faza se može izračunati kao:

$$\varphi = \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{T(s)\}}{\text{Re}\{T(s)\}} \right] = \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{N(s)\}}{\text{Re}\{N(s)\}} \right] - \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{D(s)\}}{\text{Re}\{D(s)\}} \right]$$

$$T(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}$$

ili kao

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{s - z_i\}}{\text{Re}\{s - z_i\}} \right] - \sum_{i=1}^m \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{s - p_i\}}{\text{Re}\{s - p_i\}} \right]$$

$$T(s) = \frac{a_n(s - z_1)(s - z_2)\dots(s - z_n)}{b_m(s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_m)}$$



Frekvencijske karakteristike (obnoviti iz matematike)

Primer 2.0: Odrediti moduo i fazu prenosne funkcije :

$$T(s) = \frac{4s + s^2}{6 + 11s + 6s^2 + s^3} = \frac{s(4 + s)}{(1 + s)(2 + s)(3 + s)}$$

Rešenje :  $T(j\omega) = \frac{-\omega^2 + 4j\omega}{(6 - 6\omega^2) + j(11\omega - \omega^3)}$

$$|T(s)| = \sqrt{\frac{\text{Re}\{N(s)\}^2 + \text{Im}\{N(s)\}^2}{\text{Re}\{D(s)\}^2 + \text{Im}\{D(s)\}^2}} = \sqrt{\frac{[-\omega^2]^2 + [4\omega]^2}{[6 - 6\omega^2]^2 + [11\omega - \omega^3]^2}} = \sqrt{\frac{\omega^2[16 + \omega^2]}{(36 + 49\omega^2 + 14\omega^4 + \omega^6)}} = \sqrt{\frac{\omega^2[16 + \omega^2]}{(1 + \omega^2)(4 + \omega^2)(9 + \omega^2)}}$$

$$|T(s)| = \frac{a_n}{b_m} \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^n (z_i^2 + \omega^2)}{\prod_{i=1}^m (p_i^2 + \omega^2)}} = \frac{1}{1} \sqrt{\frac{(0^2 + \omega^2)(4^2 + \omega^2)}{(1^2 + \omega^2)(2^2 + \omega^2)(3^2 + \omega^2)}} = \sqrt{\frac{\omega^2[16 + \omega^2]}{(1 + \omega^2)(4 + \omega^2)(9 + \omega^2)}}$$

Frekvencijske karakteristike (obnoviti iz matematike)

Primer 2.0: Odrediti moduo i fazu prenosne funkcije  $T(s) = \frac{4s + s^2}{6 + 11s + 6s^2 + s^3} = \frac{s(4 + s)}{(1 + s)(2 + s)(3 + s)}$

Rešenje (faza) :  $T(j\omega) = \frac{-\omega^2 + 4j\omega}{(6 - 6\omega^2) + j(11\omega - \omega^3)}$

$$\varphi = \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{N(s)\}}{\text{Re}\{N(s)\}} \right] - \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{D(s)\}}{\text{Re}\{D(s)\}} \right] = \arctg \left[ \frac{4\omega}{-\omega^2} \right] - \arctg \left[ \frac{11\omega - \omega^3}{6 - 6\omega^2} \right]$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \sum_{i=1}^n \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{s - z_i\}}{\text{Re}\{s - z_i\}} \right] - \sum_{i=1}^m \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{s - p_i\}}{\text{Re}\{s - p_i\}} \right] = \\ &= \arctg \left[ \frac{\omega}{0} \right] + \arctg \left[ \frac{\omega}{4} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{1} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{2} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{3} \right] = \\ &= \frac{\pi}{2} + \arctg \left[ \frac{\omega}{4} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{1} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{2} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{3} \right] \end{aligned}$$

## Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (**veoma važno**)  $|T(j\omega)|$ ;  $\angle T(j\omega)$ .

Grafička interpretacija zavisnosti od **frekvencije**

- modula prenosne funkcije naziva se  
**AMPLITUDSKA KARAKTERISTIKA**
- argumenta prenosne funkcije naziva se  
**FAZNA KARAKTERISTIKA** pojačavača

Zajedno, one predstavljaju

**FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE**

pojačavača

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

61

## Pojačanje signala

Amplitudska karakteristika (**veoma važno**)

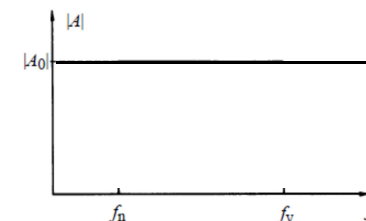
Najpre ćemo definisati *idealnu* amplitudsku karakteristiku pojačavača i uporediti je sa *realnim* karakteristikama kojima ćemo se baviti kasnije tokom kursa.

Zahtev

Konstantno pojačanje

To je nerealno

Zahtev: **PODJEDNAKO POJAČATI** odnosi se na sve **potrebne spektralne** komponente



20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

62

## Pojačanje signala

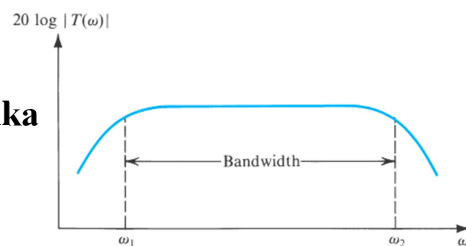
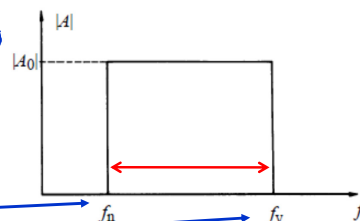
Amplitudska karakteristika ( $\sqrt{\quad}$ )

Konačni *propusni opseg* (*Band-Width*) omeđen je graničnim frekvencijama na niskim i visokim frekvencijama

$$BW = f_v - f_n$$

Amplitudska karakteristika realnog pojačavača\*

\*Zašto?



20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

63

## Pojačanje signala

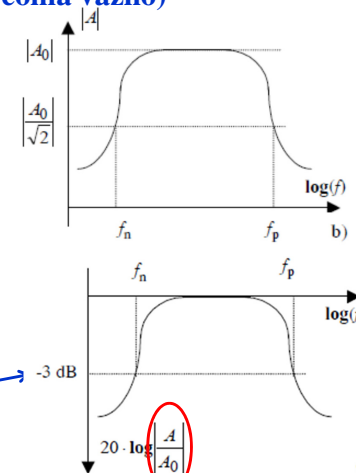
Amplitudska karakteristika (**veoma važno**)

Realnog pojačavača

Granice propusnog opsega kod realnih pojačavača određuju se u tačkama u kojima **snaga na izlazu opadne za 1/2 od nominalne**.

To je ekvivalentno smanjenju **napona/struje\*** na izlazu za  $\sqrt{2}$  puta ili 3dB.

\*Zašto?



Normalizovano pojačanje

20. oktobar 2016.

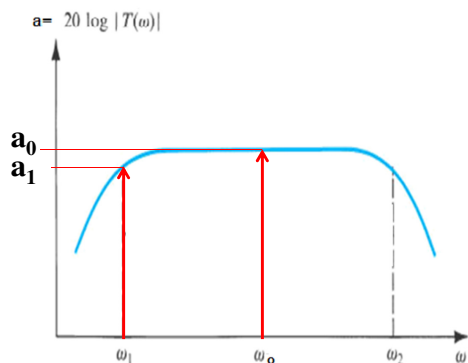
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

64



## Pojačanje signala

### Amplitudska karakteristika (veoma važno)



Amplitudska karakteristika realnog pojačavača nije konstantna.

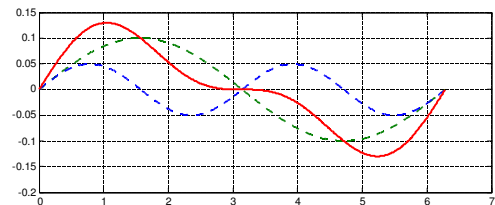
To znači da signali različitih frekvencija neće biti podjednako pojačani.

Posledica?

**Linearna amplitudska izobličenja** – videti slajd 7

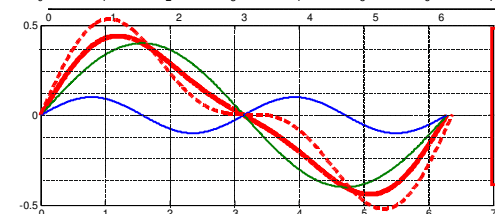
## Pojačanje signala

### 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

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

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

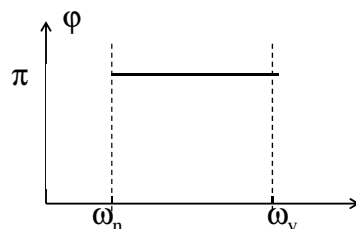
Na izlazu linearnog pojačavača koji različito pojačava signale različitih frekvencija javljaju se **linearna amplitudska izobličenja**.

## Pojačanje signala

### Fazna karakteristika (veoma važno)

**Idealna fazna karakteristika pojačavača: faza nezavisna od frekvencije – konstantna**

Zahtev Konstantna faza



To je nerealno

**Zahtev: PODJEDNAKO ZAKASNITI** odnosi se na sve **potrebne spektralne** komponente

## Pojačanje signala

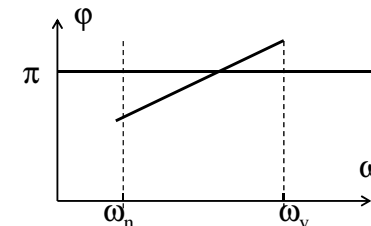
### Fazna karakteristika (veoma važno)

**Idealna fazna karakteristika pojačavača:**

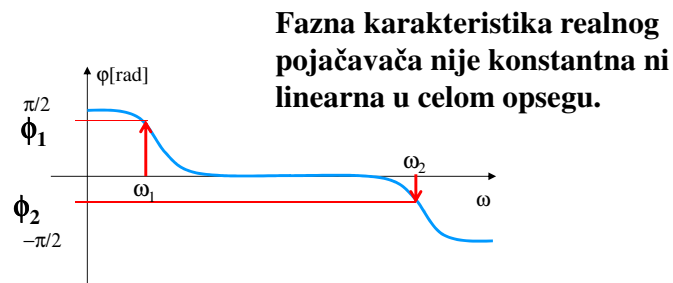
**Konstantna faza ALI i LINEARNA faza**

$$\varphi(\omega) = k \cdot \omega; \quad v_u(\omega t) = V_{u1} \cdot \cos(\omega t) + V_{u2} \cdot \cos(2\omega t)$$

$$v_i(\omega t) = A \cdot (V_{u1} \cdot \cos(\omega t + k \cdot \omega) + V_{u2} \cdot \cos(2\omega t + 2k \cdot \omega)) = A \cdot (V_{u1} \cdot \cos(\omega t + k \omega) + V_{u2} \cdot \cos 2(\omega t + k \cdot \omega))$$



Realna fazna karakteristika (važno)

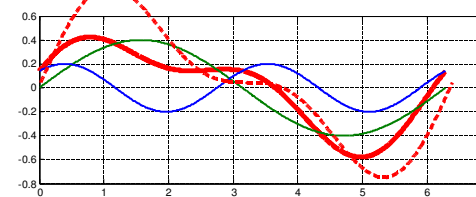
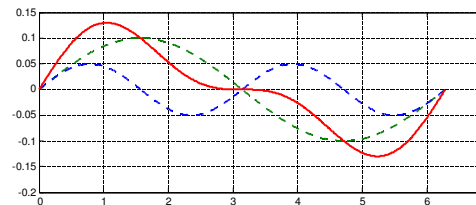


To znači da signali različitih frekvencija neće biti podjednako zakašnjeni.

Posledica?

Linearna fazna izobličenja

Različito kašnjenje na različitim frekvencijama



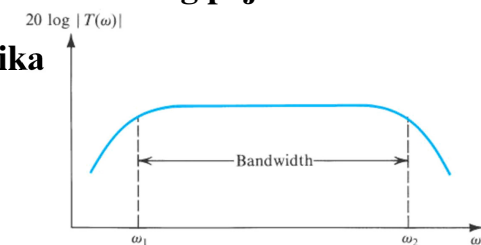
$$v_i = 4 \cdot (v_u(\omega)) + v_u(2\omega + \pi/4)$$

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

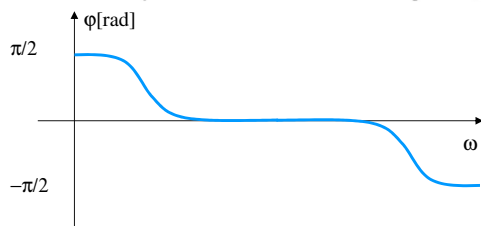
Na izlazu linearnog pojačavača koji različito kasni signale različitih frekvencija javljaju se linearna fazna izobličenja.

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

Amplitudska karakteristika

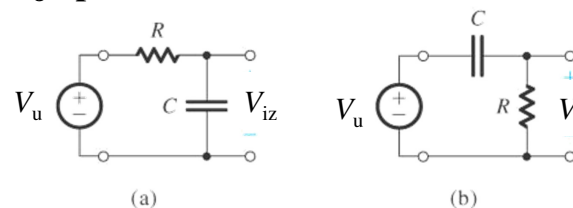


fazna karakteristika



Frekvencijske karakteristike

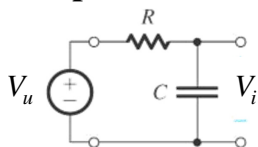
Osnovu za analizu ponašanja pojačavača u prisustvu reaktivnih komponenta predstavlja poznavanje ponašanja pasivnih RC kola.





Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



$$V_i(j\omega) = \frac{Z_C}{Z_C + R} V_u(j\omega) = \frac{1/j\omega C}{1/j\omega C + R} V_u(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} V_u(j\omega)$$

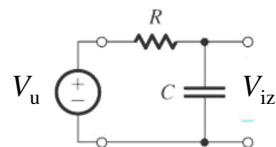
$$T(j\omega) = \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + (s/\omega_o)}$$

$s = j\omega$   
 $\omega_o = 1/\tau = 1/RC$



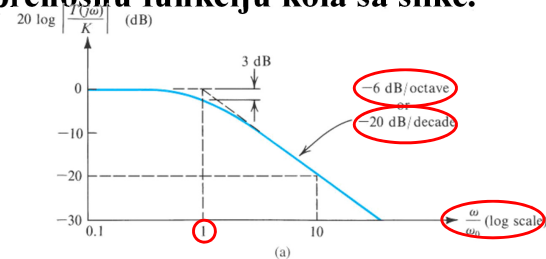
Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + (s/\omega_o)} \Big|_{s=j\omega}$$

$\omega_o = 1/\tau = 1/RC$



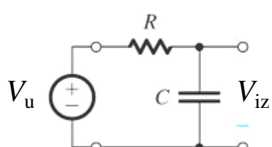
$$|T(s)| = \sqrt{\frac{\text{Re}\{N(s)\}^2 + \text{Im}\{N(s)\}^2}{\text{Re}\{D(s)\}^2 + \text{Im}\{D(s)\}^2}}$$

$$20 \log |T(s)| = 20 \log \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \{\omega/\omega_o\}^2}} \right] \approx -20 \log(\omega/\omega_o) \Big|_{\omega_o \gg \omega}$$

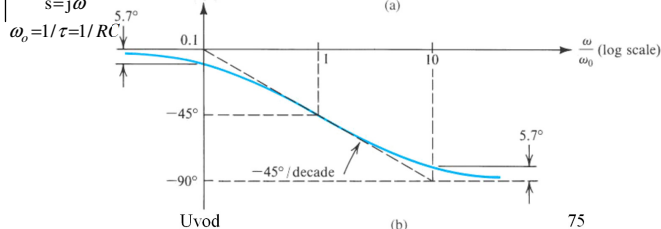
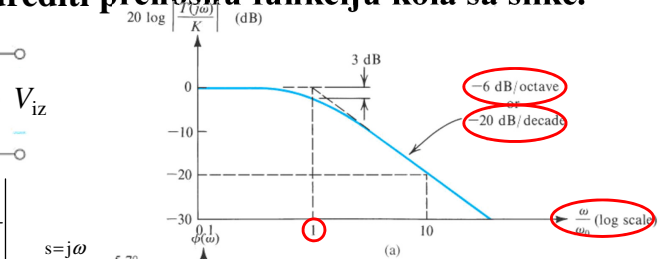


Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + (s/\omega_o)}$$



Frekvencijske karakteristike

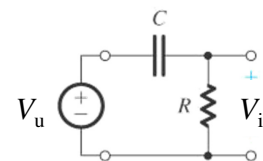
Domaći 2.3

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

Koju funkciju kolo obavlja u frekvencijskom domenu?

Odrediti graničnu frekvenciju.

Koliko iznosi asimptotski nagib amplitudske karakteristike po dekadi i po oktavi?



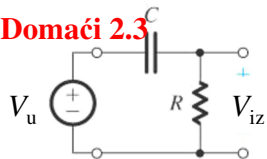
## Pojačanje signala



### Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

Domaći 2.3



$$T(j\omega) = \left. \frac{s/\omega_o}{1 + (s/\omega_o)} \right|_{\substack{s=j\omega \\ \omega_o=1/\tau=1}}$$

20. oktobar 2016.

<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

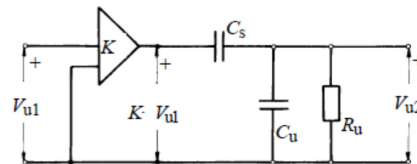
## Pojačanje signala



### Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

Za vežbu 2.2



20.10.2016.

$$(3.1.35) \quad A_u = \frac{V_{u2}}{V_{u1}} = K \frac{j\omega R_u C_s}{1 + j\omega(R_u C_u + R_u C_s)}$$

$$= K \frac{C_s}{C_u + C_s} \frac{j\tau\omega}{1 + j\tau\omega} = A_0 \frac{j\tau\omega}{1 + j\tau\omega}$$

gde je  $\omega$  kružna frekvencija,  $\tau = R_u(C_u + C_s)$ , a  $A_0 = K \cdot C_s / (C_s + C_u)$ .

20. oktobar 2016.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

78

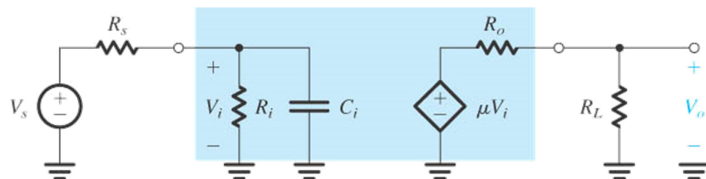
## Pojačanje signala



### Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) kola sa slike.

Domaći 2.4



Ako je  $R_s=20k$ ,  $R_i=100k$ ,  $C_i=60pF$ ,  $\mu=144$  V/V,  $R_o=200\Omega$  i  $R_L=1k$

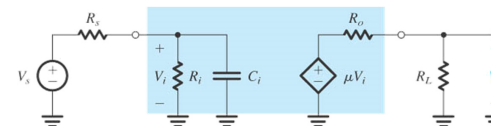
- Odrediti pojačanje pri  $\omega=0$  rad/s (jednosmerno) ( $A=100$  V/V)
- Graničnu frekvenciju (3dB) ( $\omega_0=10^6$  rad/s,  $f_0=159,2$  kHz)
- Odrediti frekvenciju pri kojoj  $A$  padne na 0dB ( $10^8$  rad/s)

## Pojačanje signala



### Frekvencijske karakteristike

Primer 2.2: Odrediti prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) kola sa slike.



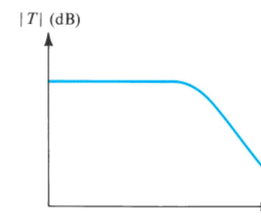
Rešenje:

$$A(j\omega) = \mu \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o} \cdot \frac{1}{1 + sC_i [R_s R_i / (R_s + R_i)]} = \frac{A_o}{1 + s/\omega_0}$$

$$A_o = \mu \frac{1}{1 + (R_s / R_i)} \cdot \frac{1}{1 + (R_o / R_L)}$$

$$\tau = C_i [R_s R_i / (R_s + R_i)]$$

$$\omega_0 = 1/\tau$$



20. oktobar 2016.

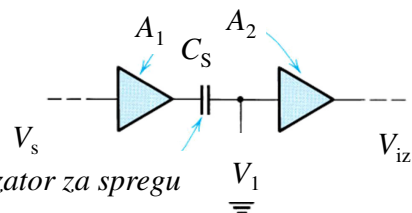
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

(b)

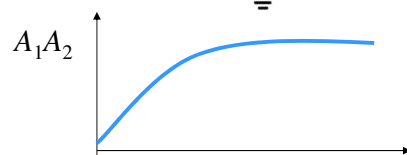


## Frekvencijske karakteristike

**Primer 2.3:** Skicirati prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) dvostepenog pojačavača sa slike.



Rešenje:



## Šta smo naučili?

- Razlika između frekvencijskih i prenosne karakteristike pojačavača**

- Uzroci izobličenja signala
- Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona sa konačnim pojačanjem
- Frekvencijske karakteristike pojačavača

Na web adresi <http://leda.elfak.ni.ac.rs>

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu

## Ispitna pitanja?

1. Uticaj konačne ulazne i izlazne otpornosti pojačavača napona na ukupno pojačanje.
2. Skicirati prenosnu karakteristiku idealnog pojačavača napona  $A=-10$ .
3. Nelinearna amplitudska izobličenja. Uzrok i posledice.
4. Šta je prenosna funkcija? Kako se određuju moduo i faza?
5. Definicija amplitudske karakteristike i načini predstavljanja.
6. Linearna amplitudska izobličenja. Uzrok i posledice.
7. Fazna karakteristika.
8. Linearna fazna izobličenja. Uzrok i posledice.
9. Električna šema, prenosna funkcija i frekvencijske karakteristike RC propusnika niskih/visokih frekvencija (granična frekvencija, asimptotski nagib)

## Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (01.12.2015.)	50%	20%
Kolokvijum II (19.01.2016.)	50%	20%



-----  
120% 60%

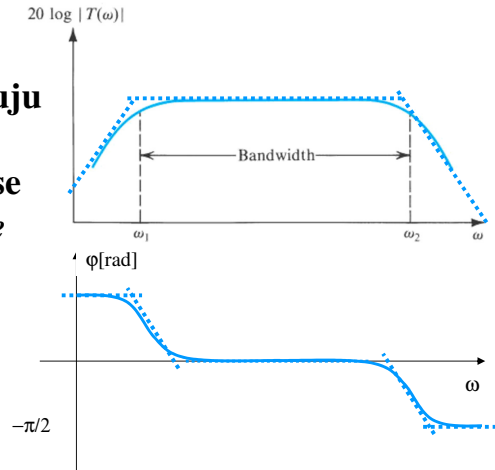
**Savet: Lakše preko kolokvijuma**

## Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

Dijagrami koji pojednostavljeno prikazuju amplitudsku i faznu karakteristiku nazivaju se *asimptotske karakteristike* ili *Bodeovi dijagrami*



Hendrik Wade Bode  
(1905–1982)



## Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

## H. Bode

Ako su poznate **nule** i **polovi** funkcije prenosa, moguće je skicirati *asimptotski oblik* amplitudske i fazne karakteristike.

Za to je najpogodnije da se  $T(s)$  prikaže u obliku:

$$T(s) = A \frac{(1 + s/z_1)(1 + s/z_2) \dots (1 + s/z_n)}{(1 + s/p_1)(1 + s/p_2) \dots (1 + s/p_m)}$$

## Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

Postupak crtanja biće objašnjen na primeru funkcije

$$T(s) = \frac{10s}{(1 + s/10^2)(1 + s/10^5)}$$

$$20 \log |T(j\omega)| = 20 \log |10| + 20 \log |j\omega| - 20 \log |1 + j\omega/10^2| - 20 \log |1 + j\omega/10^5|$$

$$20 \log |T(j\omega)| = 20 \text{dB} + 20 \log \omega - 20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^2)^2} - 20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^5)^2}$$

## Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

Postoje 4 člana u ovoj amplituskoj karakteristici (u dB)

$$20 \log |T(j\omega)| = 20 \text{dB} + 20 \log \omega - 20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^2)^2} - 20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^5)^2}$$

I 20dB konstanta

II  $20 \log \omega$  prava prolazi kroz 0 za  $\omega = 1$ , nagib 6dB/oct ili 20dB/dec

III  $-20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^2)^2}$  za  $\omega \ll 10^2$   $-20 \log 1 = 0$   
za  $\omega \gg 10^2$   $-20 \log (\omega/10^2)$ , 0 za  $\omega = 10^2$

IV  $-20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^5)^2}$  za  $\omega \ll 10^5$   $-20 \log 1 = 0$   
za  $\omega \gg 10^5$   $-20 \log \omega/10^5$  0 za  $\omega = 10^5$

**Dodatak**

**Pojačanje signala**

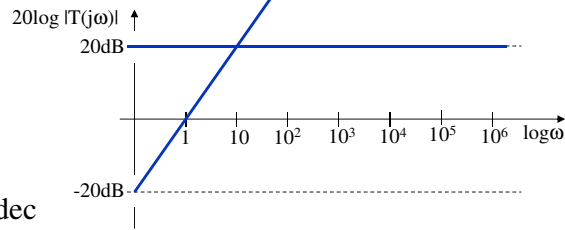
**Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača**

Postoje 4 segmenta asimptotskih pravih u log-log koord.

I 20dB konstanta

II  $20 \log \omega$

prava prolazi kroz 0 za  $\omega = 1$ ,  
nagib 6dB/oct ili 20dB/dec



Dokazati 6dB/oct=20dB/dec

**Dodatak**

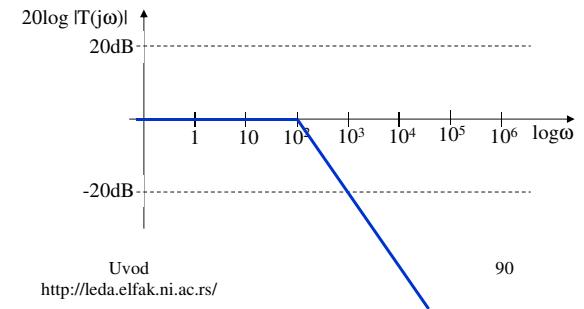
**Pojačanje signala**

**Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača**

$$\text{III } -20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^2)^2}$$

za  $\omega \ll 10^2$   $-20 \log 1 = 0$

za  $\omega \gg 10^2$   $-20 \log(\omega/10^2)$ , 0 za  $\omega = 10^2$



**Dodatak**

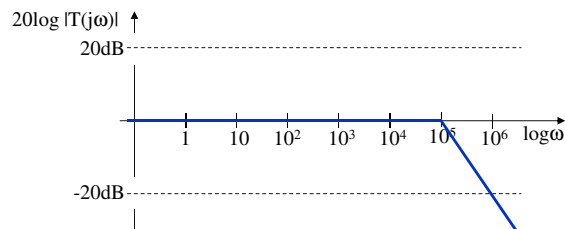
**Pojačanje signala**

**Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača**

$$\text{IV } -20 \log \sqrt{1 + (\omega/10^5)^2}$$

za  $\omega \ll 10^5$   $-20 \log 1 = 0$

za  $\omega \gg 10^5$   $-20 \log \omega/10^5$  0 za  $\omega = 10^5$

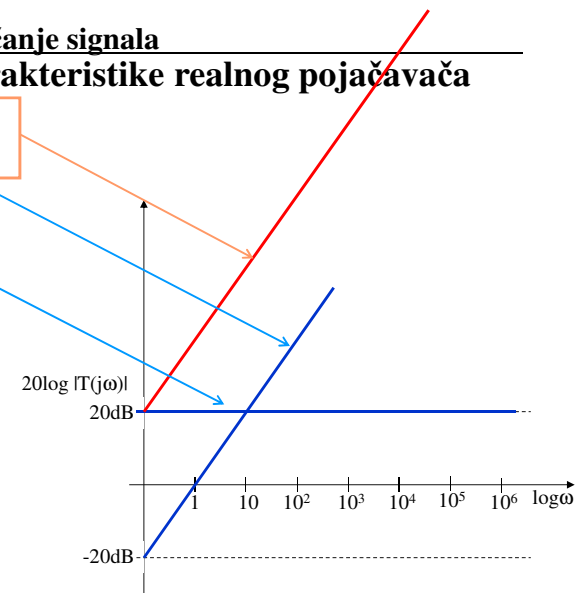


**Dodatak**

**Pojačanje signala**

**Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača**

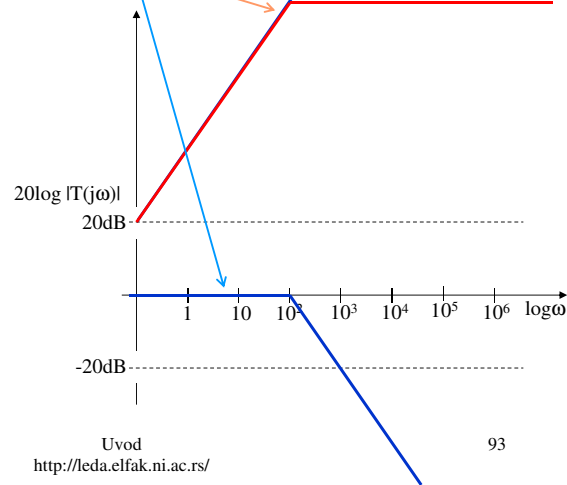
$20 \text{dB} + 20 \log \omega$



Pojaćanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

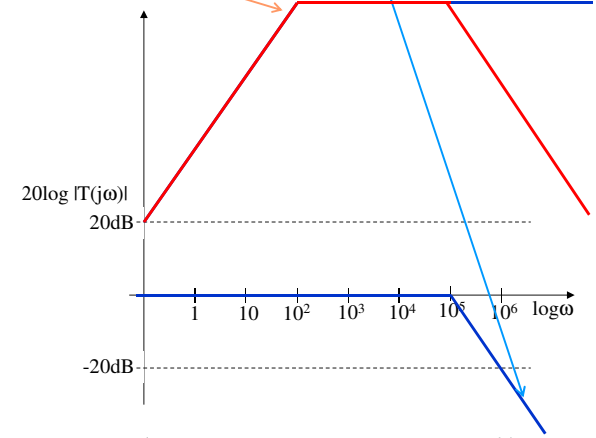
$$20\text{dB} + 20\log \omega - 20\log \sqrt{1 + (\omega/10^2)^2}$$



Pojaćanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

$$20\text{dB} + 20\log \omega - 20\log \sqrt{1 + (\omega/10^2)^2} - 20\log \sqrt{1 + (\omega/10^5)^2}$$



Pojaćanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

Postupak crtanja asimptotske *fazne* karakteristike

$$T(s) = \frac{10s}{(1 + s/10^2)(1 + s/10^5)}$$

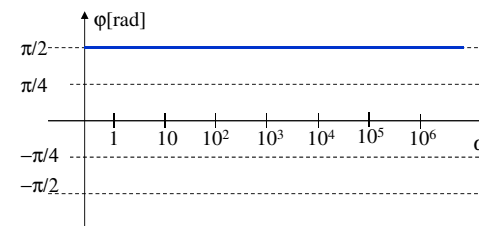
$$\varphi = \sum_{i=1}^n \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{s - z_i\}}{\text{Re}\{s - z_i\}} \right] - \sum_{i=1}^n \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{s - p_i\}}{\text{Re}\{s - p_i\}} \right] =$$

$$= \arctg \left[ \frac{\omega}{0} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{10^2} \right] - \arctg \left[ \frac{\omega}{10^5} \right]$$

Pojaćanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojaćavaća

$$\text{I} \quad \arctg \left[ \frac{\omega}{0} \right] = \frac{\pi}{2}$$



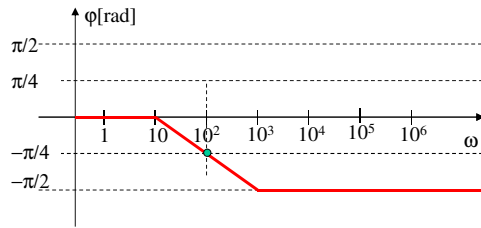


Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

$$\text{II} \quad -\arctg\left[\frac{\omega}{10^2}\right] \quad \text{za } \omega = 10^2 \quad \varphi = -\arctg[1] = -\frac{\pi}{4}$$

$$\text{za } \omega \ll 10^2 (= 10^2 / 10) \quad \varphi = -\arctg[0] = 0$$

$$\text{za } \omega \gg 10^2 (= 10^2 * 10) \quad \varphi = -\arctg[\infty] = -\frac{\pi}{2}$$

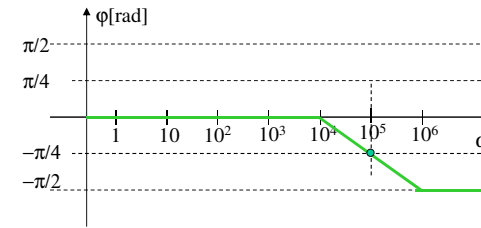


Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

$$\text{III} \quad -\arctg\left[\frac{\omega}{10^5}\right] \quad \text{za } \omega = 10^5 \quad \varphi = -\arctg[1] = -\frac{\pi}{4}$$

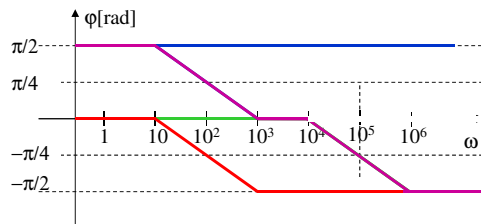
$$\text{za } \omega \ll 10^5 (= 10^5 / 10) \quad \varphi = -\arctg[0] = 0$$

$$\text{za } \omega \gg 10^5 (= 10^5 * 10) \quad \varphi = -\arctg[\infty] = -\frac{\pi}{2}$$



Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

$$\varphi = \arctg\left[\frac{\omega}{0}\right] \quad -\arctg\left[\frac{\omega}{10^2}\right] \quad -\arctg\left[\frac{\omega}{10^5}\right]$$



Sledeće nedelje:

Osnovi pojačavačke tehnike (nastavak)

- Jednosmerno napajanje i prenosna karakteristika pojačavača
- Klasifikcija pojačavača
- Operacioni pojačavači (uvod)

Na web adresi <http://leda.elfak.ni.ac.rs>

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu