

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:	U JANUARU	OSTALO
Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (02.12.2019.)	50%	20%
Kolokvijum II (13.01.2020.)	50%	20%



120% 60%

Savet: Lakše preko kolokvijuma

15. oktobar 2019.

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

1

Sadržaj

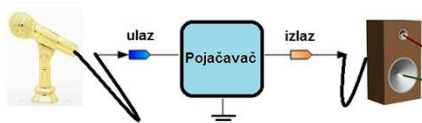
1. Uvod

- 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.

2

Osnovi elektronike

Projektovati audio pojačavač



Šta želimo?

Specifikacija zahteva:

Šta treba da radi!

Koje su mogućnosti?

Kakvi pojačavači postoje?

Šta mogu da rade!

Učiniti da moguće bude što bliže željenom.

Smanjivati razliku između mogućeg i željenog

15. oktobar 2019.

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

3

Pojačanje signala

Kakvi pojačavači postoje?

Na kraju uvodnog dela videćemo da postoje pojačavači različite:

- namene (napon, struja, snaga, ...)
- složenosti (jednostepeni, višestepeni),
- strukture (obični, diferencijalni)
- tehnološke realizacije (BJT, MOSFET)
- opsega rada (mali, veliki signali, NF, VF, ...)

Sve njih ćemo „posetiti“ tokom ovog kursa.

15. oktobar 2019.

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

4

Pojačanje signala

Pre nego što odemo u „radionicu“ moramo da naučimo kako da na „papiru“ proverimo razliku između željenog i mogućeg.
Zato predstavljamo realne „probleme“ modelima.

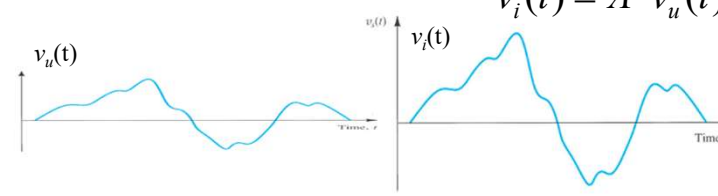
Modeli pojačavača:
GENERALIZOVANI model na *FUNKCIONALNOM* nivou nivo_ponašanja = biheioralni (gledamo ŠTA rade, a ne kako i na osnovu čega obavljaju funkciju).
Na funkcionalnom nivou klasifikujemo pojačavače prema *tipu signala*

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 5

Pojačanje signala

Uloga pojačavača:
Da *pojača* ulazni signal **BEZ IZOBLIČENJA** isti oblik veća amplituda

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



Pojačanje $A = const.$

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 6

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](#) [da](#) 

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Rekli smo SIGNAL
Kakvi signali postoje? 

Zvučni, video, elektromagnetni,...
U elektronici svi se oni konvertuju u



15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 8

Pojačanje signala

Pojačavač napona

ULAZ

IZLAZ

NAPON

NAPON

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

Pojačavač struje

ULAZ

IZLAZ

STRUJA

STRUJA

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 9

Pojačanje signala

Transkonduktanski

ULAZ

IZLAZ

NAPON

STRUJA

Pojačanje napona u struju $G_m = \frac{i_i(t)}{v_u(t)}$

Transrezistantni

ULAZ

IZLAZ

STRUJA

NAPON

Pojačanje struje u napon $R_m = \frac{v_i(t)}{i_u(t)}$

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 10

Pojačanje signala

Model pojačavača napona

GENERALIZOVANI model na FUNKCIONALNOM nivou

Idealni

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 11

Pojačanje signala

Model pojačavača napona

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

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

Realni

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

Zašto je ovo važno? 🤔

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 12

Pojačanje signala

Idealni naponski pojačavač opterećen i pobuđen iz realnog izvora

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

13

Pojačanje signala Zašto je ONO važno 🤔

Idealni naponski pojačavač opterećen i pobuđen iz realnog izvora

$v_{iz} = A_o \cdot v_u$

$v_u = v_s$
Ukupno pojačanje

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

NE ZAVISI od R_s i R_p !!!

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

14

Pojačanje signala Zašto je ONO važno 🤔

Realni naponski pojačavač opterećen i pobuđen iz realnog izvora

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

$A \equiv \frac{v_p}{v_s} = A_o \cdot \frac{R_p}{R_p + R_i}$

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

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

ZAVISI od R_s i R_p !!!

Ukupno pojačanje

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

15

Za vežbu 2.1 Zašto je ONO važno 🤔

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)

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

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

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

16

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:

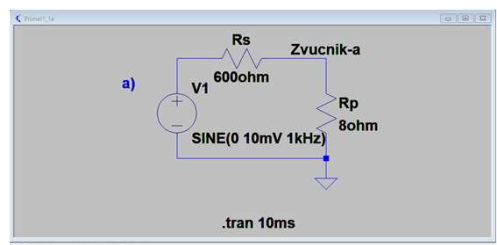
- direktno (*Primer 1.1*)
- preko pojačavača koji daje 100 puta veći napon na izlazu ($A_o=100V/V$), sa $R_u=\infty$ i $R_{iz}=1M\Omega$
- preko pojačavača koji daje 100 puta veći napon na izlazu ($A_o=100V/V$), sa $R_u=10\Omega$ i $R_{iz}=1M\Omega$
- preko *baferskog pojačavača* koji ima $A_o=1$, $R_u=1M\Omega$ i $R_{iz}=10\Omega$

15. oktobar 2019. Uvod 17
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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:

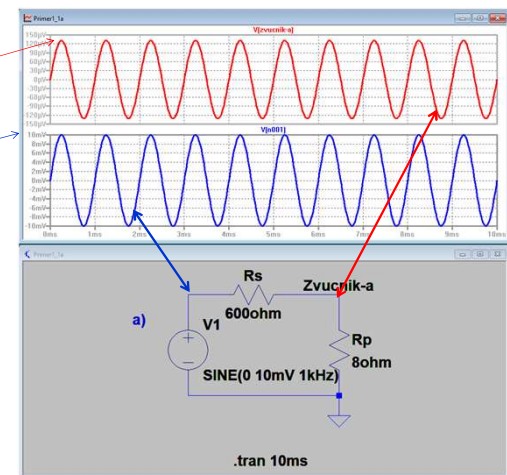
a) direktno



15. oktobar 2019. Uvod 18
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

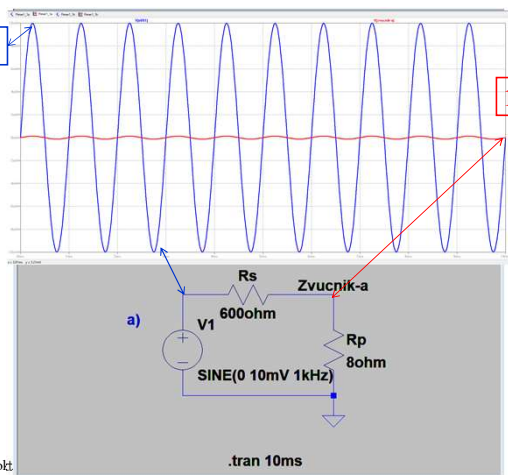
a) direktno



15. oktobar 2019. Uvod 17
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

a) direktno



15. oktobar 2019. Uvod 18
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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 $A_o=100V/V$, $R_u=\infty$ i $R_{iz}=10M\Omega$

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 21

Pojačanje signala

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

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

$$v_u = v_s = 10mV$$

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

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

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

Zašto??? **Zašto???**

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 22

Pojačanje signala

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 23

Pojačanje signala

a) i b)

130µV

8µV

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 24

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 $A_o=100V/V$, $R_u=10\Omega$ i $R_{iz}=1M\Omega$

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 25

Pojačanje signala

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

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

$$v_p = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} \cdot (A_o \cdot v_u) = \frac{8}{1,000,000 + 8} \cdot 100 \cdot \frac{10}{600 + 10} \cdot v_s \approx \frac{8000}{610 \cdot 10^6} \cdot v_s = 0,13\mu V$$

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

Šta je sa snagom?

na ulazu $P_s = v_s \cdot i_s = v_s \cdot \frac{v_s}{R_s + R_u} = \frac{(10 \cdot 10^{-3})^2}{610} \approx 163,9nW$

na izlazu $P_p = \frac{v_p^2}{R_p} = \frac{(13,1 \cdot 10^{-6})^2}{8} \approx 21,4pW$

pojačanje $A_p = \frac{P_p}{P_s} = \frac{21,4pW}{163,9nW} = 130,9 \cdot 10^{-6} W/W$

Napon još više oslabljen!!!
iako je pojačanje 100 puta!!!
Zašto???

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 26

Pojačanje signala

b) i c)

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 27

Pojačanje signala

b) i c)

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 28

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 29

Pojačanje signala

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

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

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

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

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

Šta je sa snagom?

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

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

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

Zašto? Kako?

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 30

Pojačanje signala

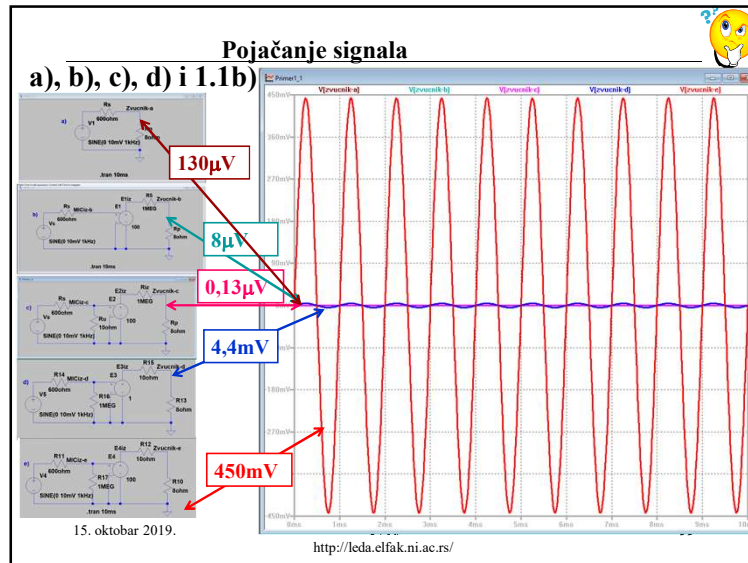
a) i d)

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 31

Pojačanje signala

a), b), c) i d)

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 32



Pojačanje signala

Zaključak:

Osim pojačanja pojačavača VAŽNE su:

- ulazna otpornost
- izlazna otpornost

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 34

Pojačanje signala

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 35

Pojačanje signala

Jedinica mere pojačanja?

$A = \frac{v_i}{v_u}$ $A_s = \frac{i_i}{i_u}$ $A_p = \frac{P_i}{P_u}$
 V/V, A/A, W/W

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

$a_p = 10 \cdot \log |A_p|$ **dB**

$a_v = 20 \log |A_v|$ **dB**
 $a_s = 20 \log |A_s|$ **dB**

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 36

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 $	dB	$V_i = 20 \log \left \frac{V_i}{1mV} \right $	dBm
$P_i = 10 \log \left \frac{P_i}{1W} \right $	dBw	$P_i = 10 \log \left \frac{P_i}{1mW} \right $	dBm


15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 37

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)	

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 38

Domaći 2.1 Pojačanje signala

Zadatak: Pojačavač sa pojačanjem $A_0=40dB$, $R_u=10k$, $R_{iz}=1k$, pobuđuje potrošač od $R_p=1k$.
Izračunati ukupno naponsko pojačanje i pojačanje snage iskazano u dB.




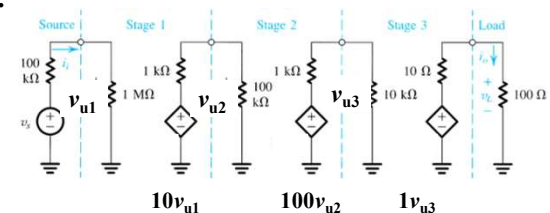
(50 V/V; 44dB)

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 39

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; $66,9 \cdot 10^8$ W/W; 98,3dB)

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 40

Pojačanje signala

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

(a) (b)

15. oktobar 2019. Uvod 41
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

Pojačanje signala

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

Primer:

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

15. oktobar 2019. Uvod 42
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

Pojačanje signala

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

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

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

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

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

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod 43
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

Pojačanje signala

Najčešće ćemo u okviru ovog kursa govoriti o Pojačavačima napona:

Idealni

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

Realni

Zašto je ovo važno?

15. oktobar 2019. Uvod 44
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

Pojačanje signala

Uloga pojačavača:
 Da *pojača* ulazni signal **BEZ IZOBLIČENJA**
 isti oblik veća amplituda

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

Pojačanje $A = const.$

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 45

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

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

Pojačanje signala

**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

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 47

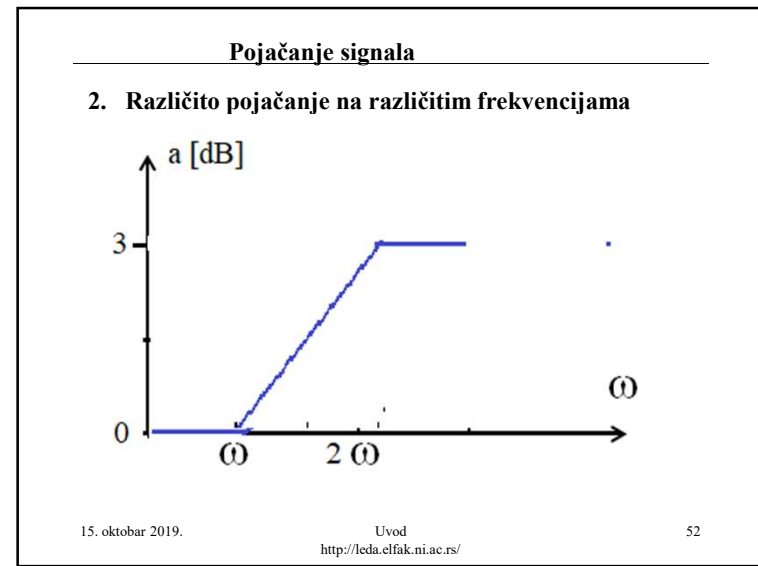
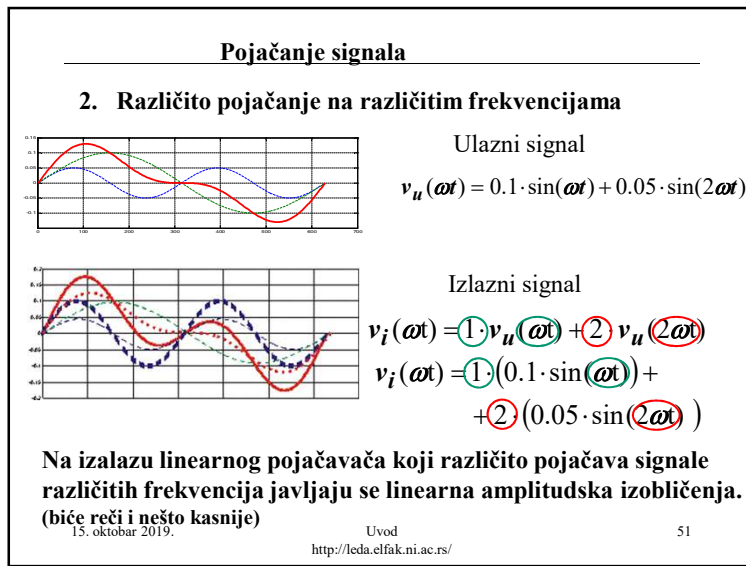
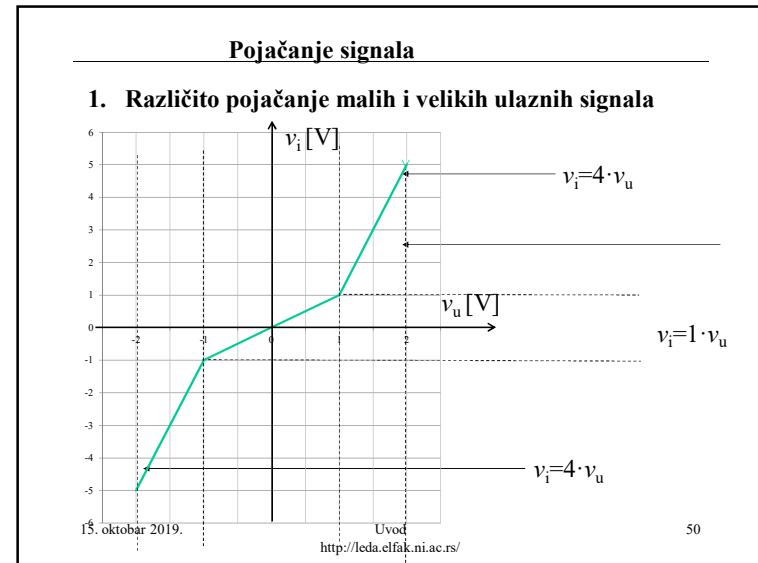
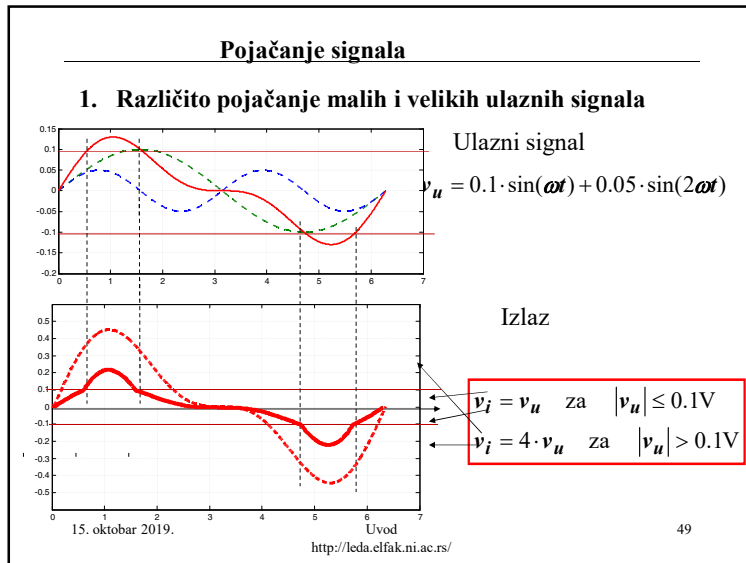
Pojačanje signala

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)

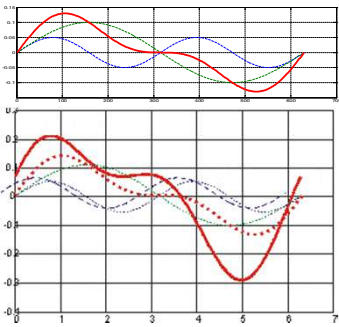
[dalje](#) [dalje2](#)

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 48



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

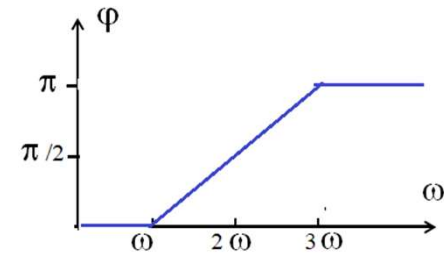
$$v_i = 2 \cdot (v_u(\omega t) + v_u(2\omega t + \pi/4))$$

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

15. oktobar 2019.
Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
53

Pojačanje signala

3. Različito kašnjenje na različitim frekvencijama



15. oktobar 2019.
Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
54

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.

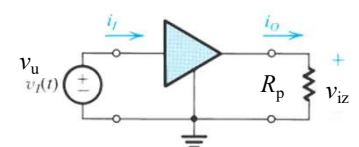
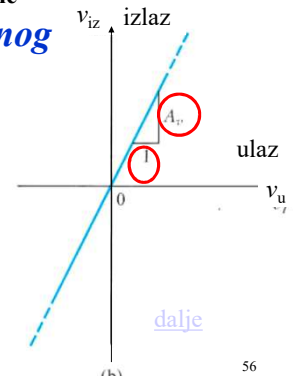
[dalje](#) [dalje2](#)

15. oktobar 2019.
Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
55

Pojačanje signala

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

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona je prava = linearna funkcija





[dalje](#)

15. oktobar 2019.
Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
56

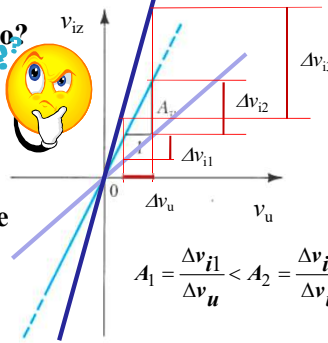
Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno? 

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

Nagib \leftrightarrow Pojačanje



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

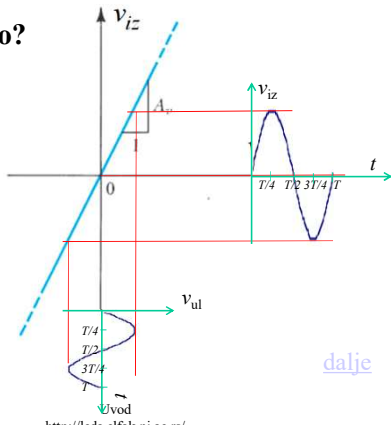
[dalje](#)

15. oktobar 2019. Uvod 57
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?



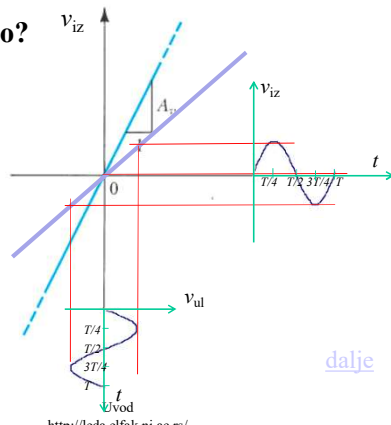
[dalje](#)

19. oktobar 2017. 58
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?



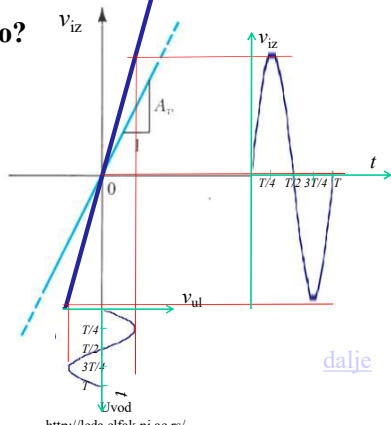
[dalje](#)

19. oktobar 2017. 59
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?



[dalje](#)

19. oktobar 2017. 60
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika
Talasni oblik napona v_i :
neinvertorski pojačavač

ne obrće fazu

Zašto je ovo važno?
invertorski pojačavač $A < 0$

obrće fazu

dalje

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

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika

Šta ako nije linearna?

izlaz

$v_i = v_u$ za $|v_u| \leq 0.1V$
 $v_i = 4 \cdot v_u$ za $|v_u| > 0.1V$

Ulazni signal **Talasni oblik napona**
 $v_u = 0.2 \cdot \sin(\omega t)$ **v_i : izobličenje signala**

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

Pojačanje signala

Razmotrimo ponovo primer idealizovanog pojačavača sa $A=4$ koji treba da pojača *složnoperiodični* 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/>

Pojačanje signala

1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala

Ulazni signal

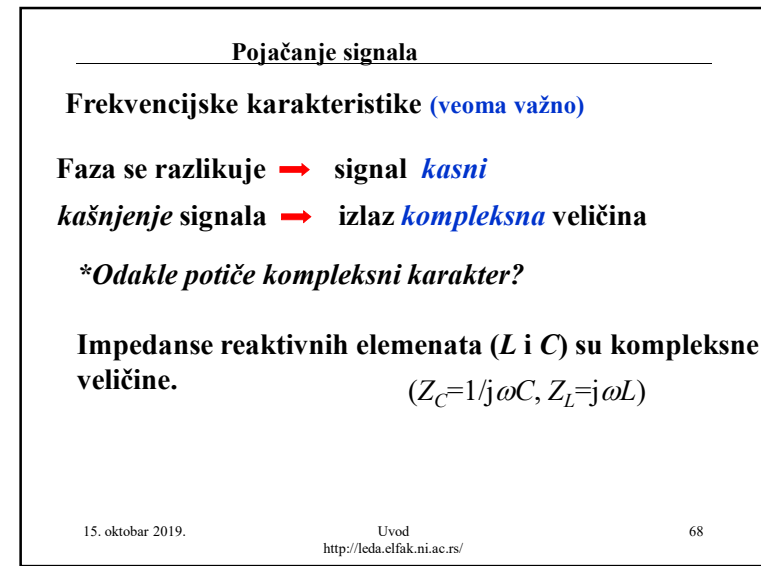
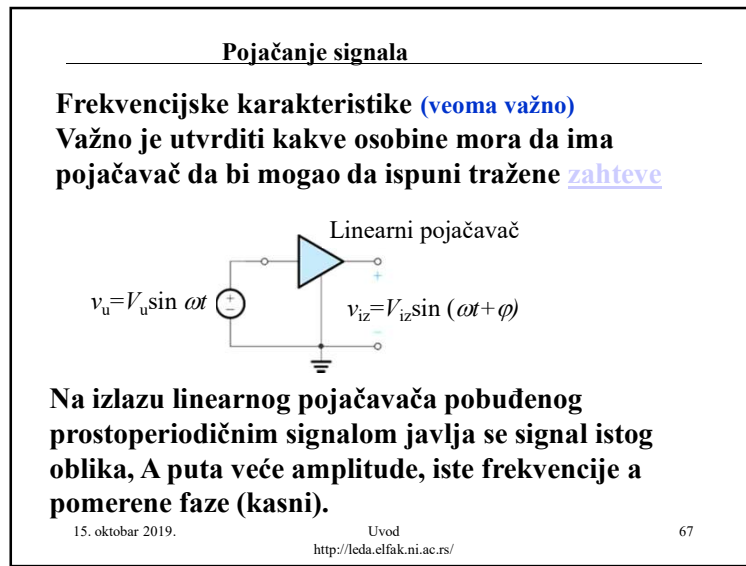
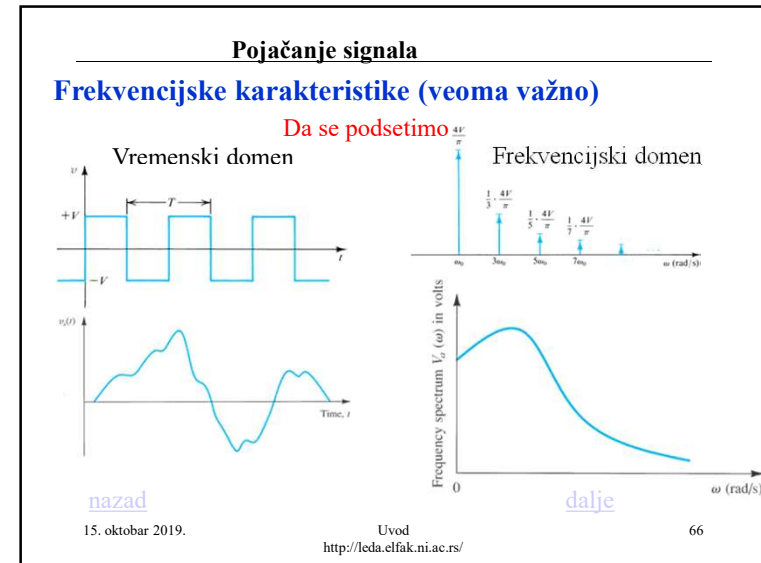
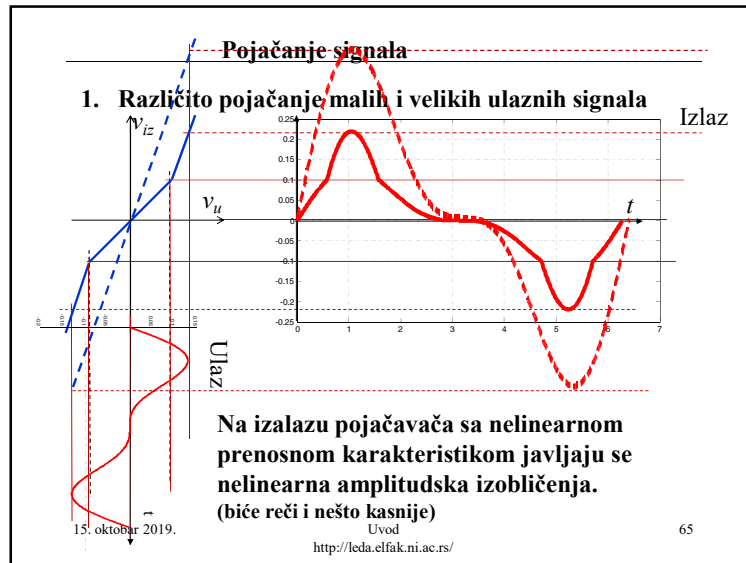
$v_u = 0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t)$

Izlaz

$v_i = v_u$ za $|v_u| \leq 0.1V$

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

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>



Pojačanje signala

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 ω zove se
PRENOSNA FUNKCIJA pojačavača, $T(j\omega)$:

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

15. oktobar 2019. Uvod 69
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)
U opštem slučaju to je kompleksna veličina definisana modulom i fazom:

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

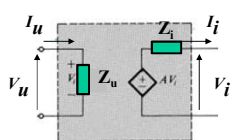
$$|T(j\omega)| = \left| \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)} \right|.$$

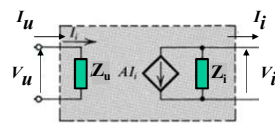
$$\angle T(j\omega) = \varphi(\omega).$$

15. oktobar 2019. Uvod 70
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

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

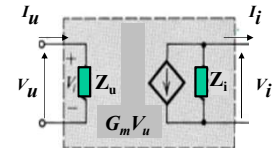
$$T(j\omega) = A(j\omega) = \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)};$$


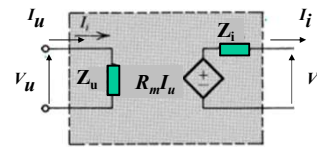
$$T(j\omega) = A_s(j\omega) = \frac{I_i(j\omega)}{I_u(j\omega)};$$


15. oktobar 2019. Uvod 71
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala Dodatak

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

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


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


15. oktobar 2019. Uvod 72
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Izlazni signal = Odziv pojačavača na prostoperiodični pobudni signal frekvencije ω 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.

15. oktobar 2019. Uvod 73
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)
 (obnoviti kompleksnu analizu iz matematuke)

Moduo prenosne funkcije meri se kao odnos amplituda odziva (izaz) i pobude (ulaz) pojačavača na frekvenciji ω .

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

15. oktobar 2019. Uvod 74
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)
 (obnoviti kompleksnu analizu iz matematuke)

Po definiciji moduo i faza kompleksnog broja određuju se kao

$$|T(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}\{T(j\omega)\}^2 + \text{Im}\{T(j\omega)\}^2} = \sqrt{T(j\omega) \cdot T(-j\omega)};$$

$$\angle T(\omega) = \varphi(\omega) = \arctg \left[\frac{\text{Im}\{T(j\omega)\}}{\text{Re}\{T(j\omega)\}} \right].$$

Za analizu ponašanja pojačavača u zavisnosti od frekvencije ω pogodniji je drugačiji pristup.

15. oktobar 2019. Uvod 75
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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

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

15. oktobar 2019. Uvod 76
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Dodatak

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (obnoviti kompleksnu analizu iz matematike)

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

kada je funkcija poznata u obliku **ili** kada je funkcija poznata u obliku

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

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 77

Dodatak

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (obnoviti iz matematike)

Faza se može izračunati kao:

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

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 78

Dodatak

Pojačanje signala

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 79

Dodatak

Pojačanje signala

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

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

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

$$= \arctg \left[\frac{\omega}{0} \right] + \arctg \left[\frac{\omega}{4} \right] - \arctg \left[\frac{\omega}{1} \right] - \arctg \left[\frac{\omega}{2} \right] - \arctg \left[\frac{\omega}{3} \right] =$$

$$= \frac{\pi}{2} + \arctg \left[\frac{\omega}{4} \right] - \arctg \left[\frac{\omega}{1} \right] - \arctg \left[\frac{\omega}{2} \right] - \arctg \left[\frac{\omega}{3} \right]$$

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 80

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 81

Pojačanje signala

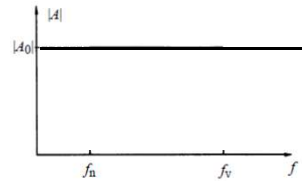
Amplitudska karakteristika (veoma važno)

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

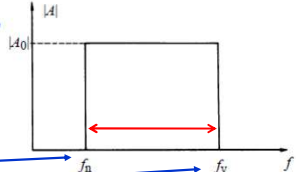


15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 82

Pojačanje signala

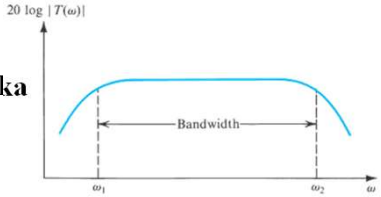
Amplitudska karakteristika (

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



$BW=f_v-f_n$

Amplitudska karakteristika realnog pojačavača*



*Zašto?

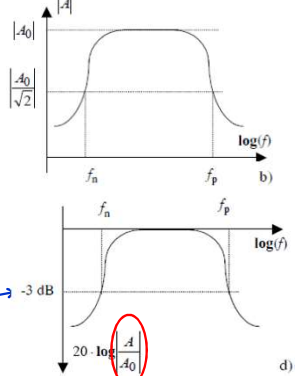
15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 83

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 84

Pojačanje signala

Amplitudska karakteristika (Način prikazivanja)

Ordinata:

$|A|$

$a=20 \log(|A|)$
normalizovano

$|A/A_0|$

$a=20 \log(|A/A_0|)$

Apscisa:

f

ω

f/f_0

ω/ω_0

$\log(f)$

$\log(\omega)$

$\log(f/f_0)$

$\log(\omega/\omega_0)$

sve kombinacije!!!

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> **Normalizovano pojačanje**

Pojačanje signala

Amplitudska karakteristika (Način prikazivanja)

Ordinata:

$|A|$

$a=20 \log(|A|)$

normalizovano

$|A/A_0|$

$a=20 \log(|A/A_0|)$

Granice:

$A_0/\sqrt{2}=0,707 A_0$

$a_0-3\text{dB}$

normalizovano

$1/\sqrt{2}=0,707$

-3dB

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> **Normalizovano pojačanje**

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 87

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

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

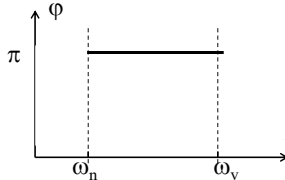
$$v_i(\omega t) = 4 \cdot (0.1 \cdot \sin(\omega t)) + 2 \cdot (0.05 \cdot \sin(2\omega t))$$

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 88

Pojačanje signala

Fazna karakteristika (veoma važno)
Idealna fazna karakteristika pojačavača:
 faza nezavisna od frekvencije – konstantna
Zahtev Konstantna faza



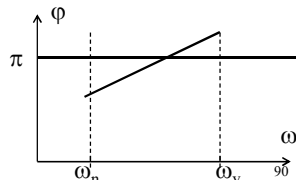
To je nerealno
Zahtev: PODJEDNAKO ZAKASNITI odnosi se na sve *potrebne spektralne* komponente

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 89

Pojačanje signala

Fazna karakteristika (veoma važno)
Idealna fazna karakteristika pojačavača:
 Konstantna faza ALI i LINEARNA zavisnost faze od frekvencije ne unosi fazna izobličenja

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

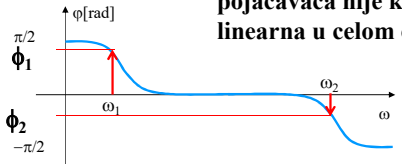


15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

Pojačanje signala

Realna fazna karakteristika (važno)

Fazna karakteristika realnog pojačavača nije konstantna ni linearna u celom opsegu.



To znači da signali različitih frekvencija neće biti podjednako zakašnjeni.
 Posledica?
Linearna fazna izobličenja

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 91

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

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 92

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

Amplitudska karakteristika

fazna karakteristika

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 93

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Osnovu za analizu ponašanja pojačavača u prisustvu reaktivnih komponenata predstavlja poznavanje ponašanja pasivnih RC kola.15.10.2019

(a) (b)

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 94

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

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

$$T(j\omega) = \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + (s/\omega_0)}$$

$s = j\omega$
 $\omega_0 = 1/\tau = 1/RC$

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 95

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

$$|T(s)| = 1/(1 + s/\omega_0)$$

$$\left. \begin{aligned} s &= j\omega \\ \omega_0 &= \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC} \end{aligned} \right\}$$

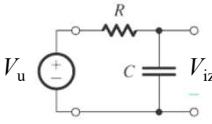
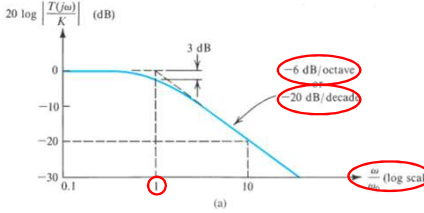
$$20 \log(|T(j\omega)|) = 20 \log \left(\frac{1}{\{1\}^2 + \left\{\frac{\omega}{\omega_0}\right\}^2} \right) =$$

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 96

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

$$20 \log(|T(j\omega)|) = -\left(\frac{1}{2}\right) 20 \log\left(\left\{1\right\}^2 + \left\{\frac{\omega}{\omega_0}\right\}^2\right)$$

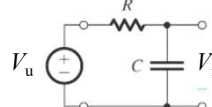
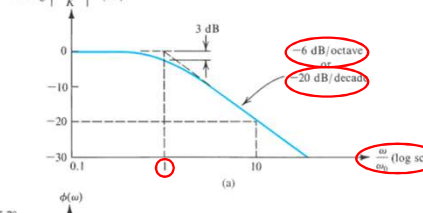
$$20 \log(|T(j\omega)|) \approx -20 \log\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \Big|_{\omega \gg \omega_0}$$

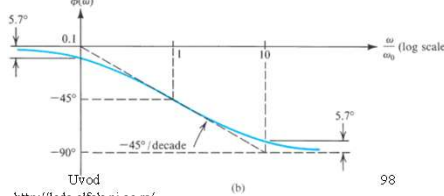
15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 97

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

$$|T(s)| = 1 / (1 + s / \omega_0)$$


15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 98

Pojačanje signala

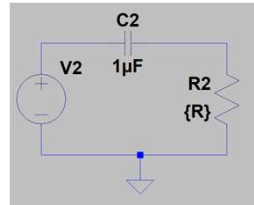
Frekvencijske karakteristike **Domaći 2.3**

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?



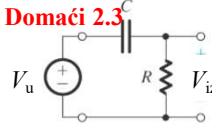
15. oktobar 2019. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 99

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.


Domaći 2.3



$$T(j\omega) = \frac{s / \omega_0}{1 + (s / \omega_0)} \Big|_{\substack{s=j\omega \\ \omega_0=1/\tau=1}}$$

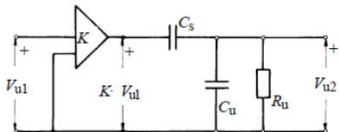
15. oktobar 2019. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala



Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike. Za vežbu 2.2




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

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

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

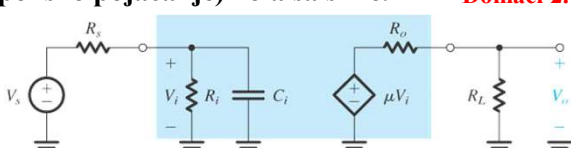
15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 101

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)
- Grafičnu 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)

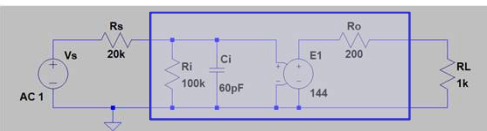
15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 104

Pojačanje signala



Frekvencijske karakteristike

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

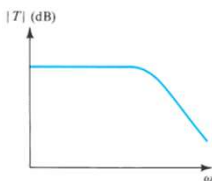


Rešenje:

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


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

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

$$\omega_0 = 1/\tau$$


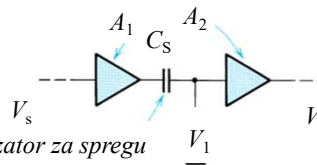
15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> (b)

Pojačanje signala

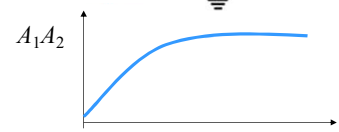


Frekvencijske karakteristike

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



Rešenje:



15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 104

Šta smo naučili?

- **Razlika između frekvencijskih i prenosne karakteristike pojačavača**
 - Model idealnih i realnih pojačavača
 - Uzroci izobličenja izlaznog signala pojačavača
 - Frekvencijske karakteristike pojačavača

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

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu

15. oktobar 2019.

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

105

Osnovi elektronike

Zablude:

- ~~1. Učicu samo ODGOVORE na Elementarna i osnovna pitanja (to mi je dovoljno za 6)~~
- ~~2.a Radiću samo zadatke sa vežbi~~
- ~~2.b Radiću samo zadatke za domaći~~

Zašto ovo nije dobro?

- ✓ Gubite celinu, kontekst, a time i suštinu
- ✓ Bubate definicije koje nerazumete (njihova slobodna interpretacija je katastrofalna – za YouTube)
- ✓ Inženjerski (ljudski) mozak nije copy-paste mašina, lakše pamti kada shvati zašto i kako nešto radi

15. oktobar 2019.

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

106

Osnovi elektronike

Savet:

1. Učite SVE da biste shvatili suštinu!!!

Učenje:

Pogledam svesku i prezentaciju sa predavanja
pitam se ZAŠTO i KAKO, pročitam u knjizi

Provera:

Dajem ODGOVORE na Elementarna/osnovna pitanja
if OK then „Ispina pitanja“
else Učenje
endif;

15. oktobar 2019.

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

107

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)

15. oktobar 2019.


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

108

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (poslednja nedelja u novembru)	50%	20%
Kolokvijum II (poslednja nedelja nastave)	50%	20%
	120%	60%



Savet: Lakše preko kolokvijuma


15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 109

Dodatak

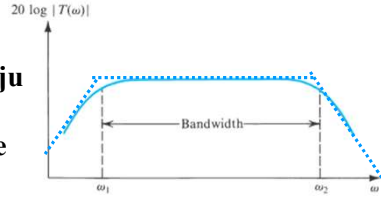
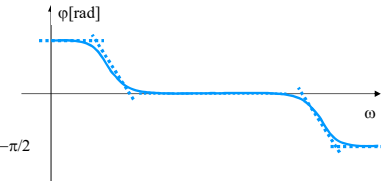
Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

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



Hendrik Wade Bode
(1905–1982)

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 110

Dodatak

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

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:

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 111

Dodatak

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

Postupak crtanja biće objašnjen na primeru funkcije

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 112

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača
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 $\omega = 10^5$

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 113

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 114

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

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 $\omega = 10^2$

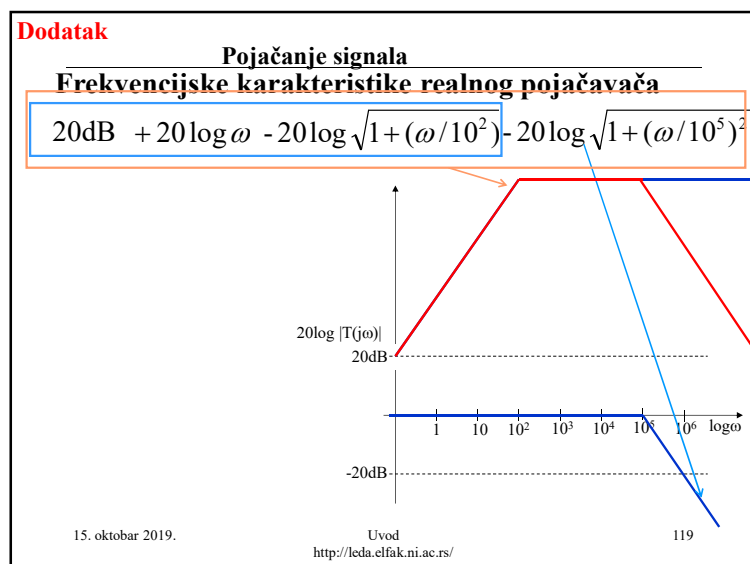
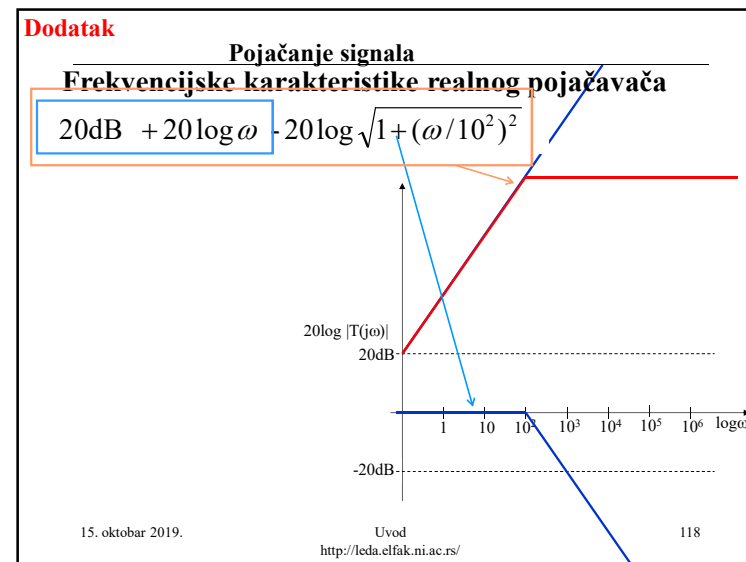
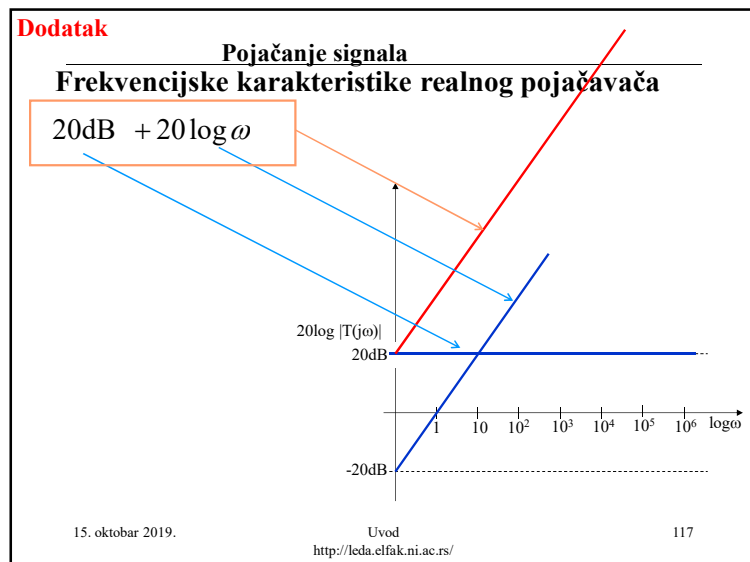
15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 115

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

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 $\omega = 10^5$

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 116



Dodatak

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača
Postupak crtanja asimptotske *fazne* karakteristike

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

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

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

15. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 120

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

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

15. oktobar 2019. Uvod 121
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

II $-\arctg\left[\frac{\omega}{10^2}\right]$ za $\omega = 10^2$ $\varphi = -\arctg[1] = -\frac{\pi}{4}$
za $\omega \ll 10^2 (= 10^2 / 10)$ $\varphi = -\arctg[0] = 0$
za $\omega \gg 10^2 (= 10^2 * 10)$ $\varphi = -\arctg[\infty] = -\frac{\pi}{2}$

15. oktobar 2019. Uvod 122
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

III $-\arctg\left[\frac{\omega}{10^5}\right]$ za $\omega = 10^5$ $\varphi = -\arctg[1] = -\frac{\pi}{4}$
za $\omega \ll 10^5 (= 10^5 / 10)$ $\varphi = -\arctg[0] = 0$
za $\omega \gg 10^5 (= 10^5 * 10)$ $\varphi = -\arctg[\infty] = -\frac{\pi}{2}$

15. oktobar 2019. Uvod 123
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

$\varphi = \arctg\left[\frac{\omega}{0}\right]$

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

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

15. oktobar 2019. Uvod 124
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Sledeće nedelje:

Osnovi pojačavačke tehnike (nastavak)

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

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

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu

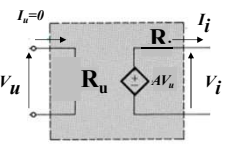
15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 125

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

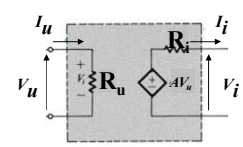
Naponski: $V_u \rightarrow V_i$

Idealni



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

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? 🤔

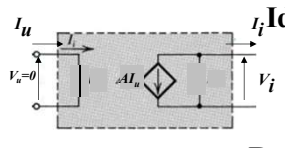
15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 126

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

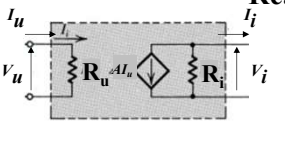
Strujni: $I_u \rightarrow I_i$

Idealni



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

Realni



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

$$A_s = A_{s0} = \left. \frac{I_i}{I_u} \right|_{V_i=0} \text{ [A/A]};$$

Zašto je ovo važno? 🤔

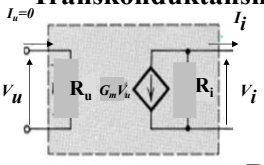
15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 127

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

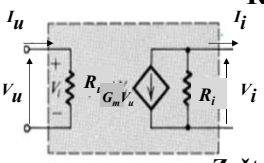
Transkonduktanski: $V_u \rightarrow I_i$ (napon u struju)

Idealni



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

Realni



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

$$G_m = G_{m0} = \left. \frac{I_i}{V_u} \right|_{V_i=0} \text{ [A/V]};$$

Zašto je ovo važno? 🤔

15. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 128

Pojačanje signala Dodatak

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

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

Idealni

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

$R_u = 0$
 $R_i = 0$

Realni

$R_u > 0 \quad R_i > 0$

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

15. oktobar 2019.
Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
129

Osnovi elektronike

Savet:

2. Zadatci se rade uz papir i olovku!!!

Vežba:

**Pročitam zadatak (vežbe/domaći),
rešavam=pišem_na_papiru, ne gledajući rešenje
if OK then „Novi zadatak“;
else
gledam rešenje da vidim gde/zašto grešim;
rešavam ponovo, ne gledajući rešenje;
endif;**

Provera:

**Ponovi postupak za zadatke sa prethodnih rokova;
ako rešenje nije dobro > pitam asistenta.**

15. oktobar 2019.

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

130