

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

| | | |
|--|-----|-----|
| Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe) | 10% | 10% |
| Odbranjene laboratorijske vežbe | 10% | 10% |
| Kolokvijum I (25.11.2017.) | 50% | 20% |
| Kolokvijum II (20.01.2018.) | 50% | 20% |



120% 60%

Savet: Lakše preko kolokvijuma

19. oktobar 2017.

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

1

Sadržaj

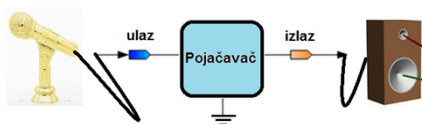
1. Uvod

- 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

20. oktobar 2015.

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.

19. oktobar 2017.

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.

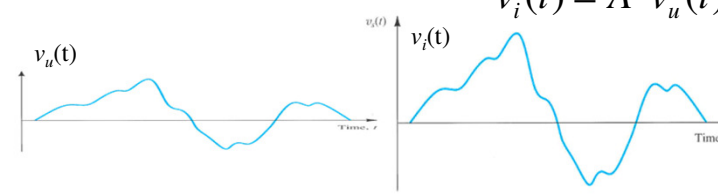
Modeli pojačavača:
GENERALIZOVANI model na *FUNKCIONALNOM* nivou nivo_ponašanja = biheioralni (gledamo ŠTA rade, a ne kako i na osnovu čega obavljaju funkciju).
Na funkcionalnom nivou klasifikujemo pojačavače prema *tipu signala*

19. oktobar 2017. 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 $A = const.$

19. oktobar 2017. 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?

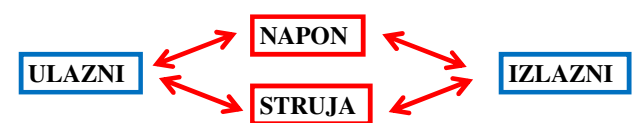
Odgovor kasnije - tokom kursa [dalje](#) [da](#) 

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

Pojačanje signala

Rekli smo SIGNAL
Kakvi signali postoje? 

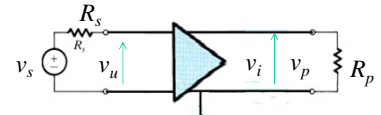
Zvučni, video, elektromagnetni,...
U elektronici svi se oni konvertuju u



19. oktobar 2017. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 8

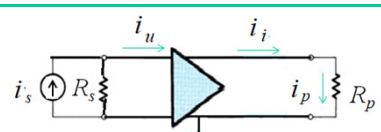
Pojačanje signala

Pojačavač napona



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

Pojačavač struje

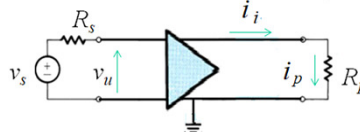


Pojačanje struje $A_s = \frac{i_i(t)}{i_u(t)}$

19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 9

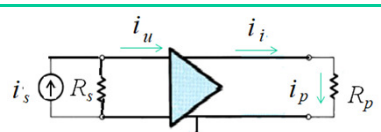
Pojačanje signala

Transkonduktanski



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

Transrezistantni

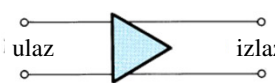


Pojačanje struje u napon $R_m = \frac{v_i(t)}{i_u(t)}$

19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 10

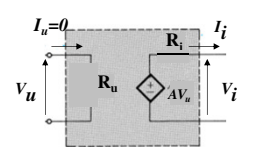
Pojačanje signala

Model pojačavača napona



GENERALIZOVANI model na FUNKCIONALNOM nivou

Idealni




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

19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 11

Pojačanje signala

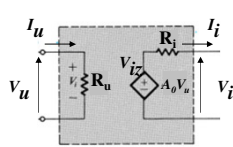
Model pojačavača napona



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

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

Realni



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

Zašto je ovo važno? 🤔

19. oktobar 2017. 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 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

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

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

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

Pojačanje napona

Pojačanje struje

Pojačanje snage

19. oktobar 2017. Uvod 17
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Jedinica mere pojačanja?

$A = \frac{v_i}{v_u}$
 V/V,

$A_s = \frac{i_i}{i_u}$
 A/A,

$A_p = \frac{P_i}{P_u}$
 W/W

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

$a_v = 20 \log |A|$

$a_s = 20 \log |A_s|$

dB

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

dB

19. oktobar 2017. Uvod 18
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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).

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

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

dB

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


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

dBm


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

Pojačanje signala

Koliki se napon očekuje na izlazu pojačava pobudenog 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) | |

19. oktobar 2017. Uvod 20
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Domaći 2.1 Pojačanje signala

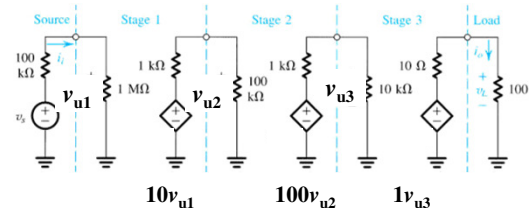
Zadatak: Pojačavač sa pojačanjem $A_o=40\text{dB}$, $R_u=10\text{k}$, $R_{iz}=1\text{k}$, pobuđuje potrošač od $R_p=1\text{k}$.
Izračunati ukupno naponsko pojačanje i pojačanje snage iskazano u dB.

(50 V/V; 44dB)



Domaći 2.2 Pojačanje signala

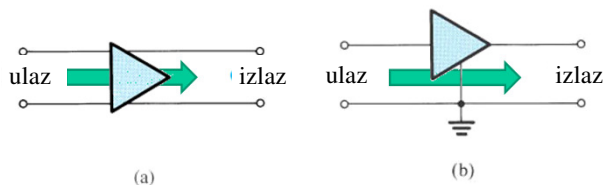
Zadatak: Izračunati ukupno naponsko i pojačanje snage trostepenog pojačavača sa slike pobuđenog izvorom čija je izlazna otpornost 100k i opterećenog potrošačem od 100Ω .



(743,6 V/V; 57,4 dB; 66,9 10⁸ W/W; 98,3dB)

Pojačanje signala

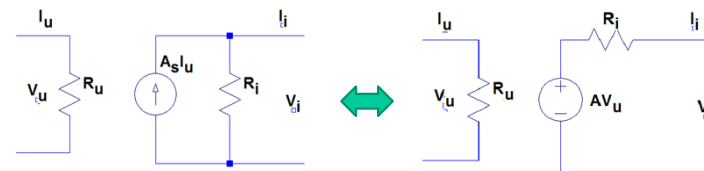
Svi prikazani modeli su *unilateralni*: prenose signal samo u jednom pravcu - sa ulaza prema izlazu.



Pojačanje signala

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

Primer:



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

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

Pojačanje signala

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

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

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

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

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

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

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

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

Uvod 25
<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?

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

Pojačanje signala

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

Pojačanje $A = const.$

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

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

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

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

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

19. oktobar 2017.
Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
29

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](#)

19. oktobar 2017.
Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
30

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

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

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

19. oktobar 2017.
Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
31

Pojačanje signala

2. Različito pojačanje na različitim frekvencijama

Ulazni signal

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

Izlazni signal

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

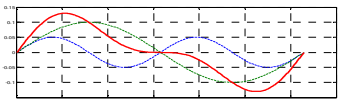
$$v_i(\omega) = 1 \cdot (0.1 \cdot \sin(\omega t)) + 2 \cdot (0.05 \cdot \sin(2\omega t))$$

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

19. oktobar 2017.
Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
32

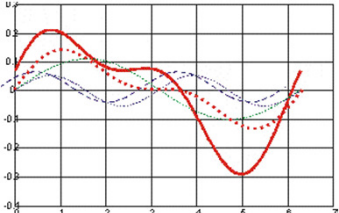
Pojačanje signala

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

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

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

19. oktobar 2017. Uvod 33
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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.

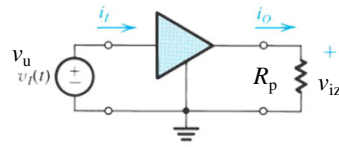
[dalje](#) [dalje2](#)

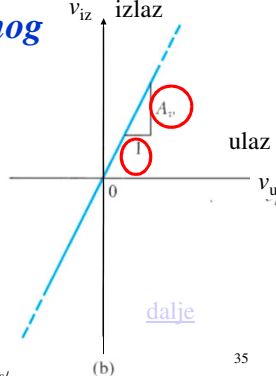
19. oktobar 2017. Uvod 34
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

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

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona je prava = linearna funkcija





(b)

19. oktobar 2017. Uvod 35
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

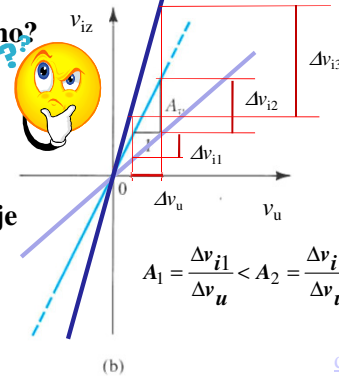
Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno? 🤔

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

Nagib ↔ Pojačanje



(b)

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

[dalje](#)

19. oktobar 2017. Uvod 36
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?

[dalje](#)

19. oktobar 2017. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 37

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?

[dalje](#)

19. oktobar 2017. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 38

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona

Zašto je ovo važno?

[dalje](#)

19. oktobar 2017. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 39

Pojačanje signala

Talasi oblik napona v_i :

neinvertorski pojačavač

ne obrće fazu


Zašto je ovo važno?

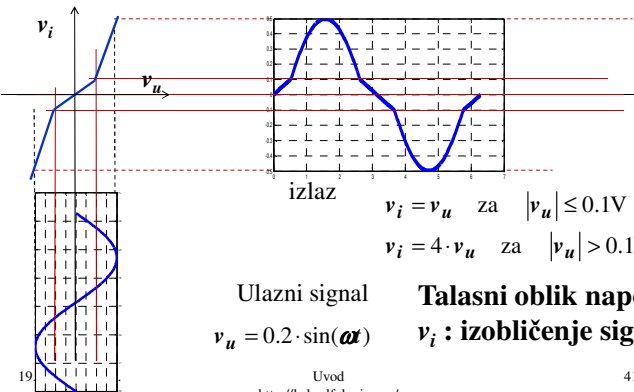
invertorski pojačavač $A < 0$

obrće fazu

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

Pojačanje signala

Prenosna karakteristika Šta ako nije linearna? 



izlaz

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

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

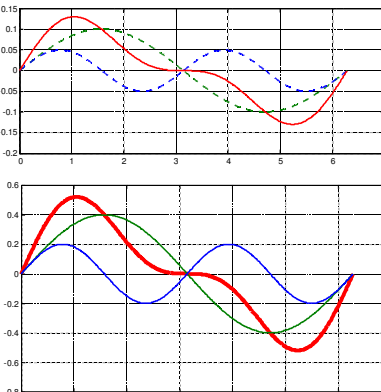
Ulazni signal **Taladni oblik napona**
 $v_u = 0.2 \cdot \sin(\omega t)$ **v_i : izobličenje signala**

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

19 41

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

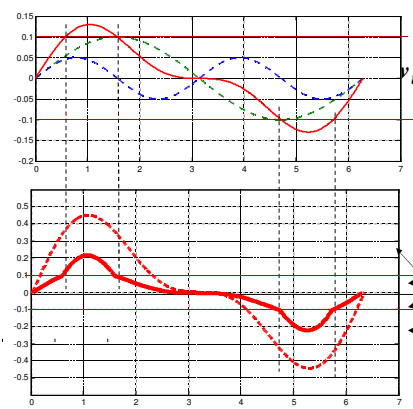
$$v_{iz} = A \cdot v_u = 4 \cdot (0.1 \cdot \sin(\omega t) + 0.05 \cdot \sin(2\omega t))$$

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

42

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

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


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

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

43

Pojačanje signala

1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala



Izlaz

Ulaz

Na izlazu pojačavača sa nelinearnom prenosnom karakteristikom javljaju se nelinearna amplitudska izobličenja. (biće reči i nešto kasnije)

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

44

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Da se podsetimo

Vremenski domen

Frekvencijski domen

[nazad](#)
[dalje](#)

19. oktobar 2017.
Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/
45

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

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

Linearni pojačavač

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

19. oktobar 2017.
Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/
46

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

Faza se razlikuje → signal *kasni*

kašnjenje signala → izlaz *kompleksna* veličina

Odakle potiče kompleksni karakter?

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

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

19. oktobar 2017.
Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/
47

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_p, I_i).

Funkcija koja povezuje izlaznu i ulaznu veličinu i određuje ponašanje odziva na frekvenciji ω zove se

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

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

19. oktobar 2017.
Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/
48

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

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

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

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

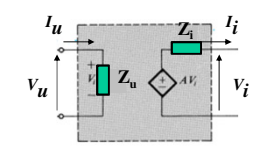
$$\angle T(j\omega) = \varphi(\omega).$$

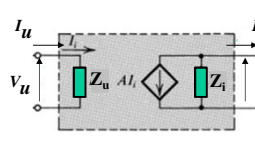
19. oktobar 2017. Uvod 49
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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 .

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


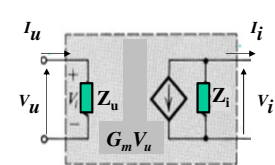
$$T(j\omega) = A_s(j\omega) = \frac{I_i(j\omega)}{I_u(j\omega)}$$


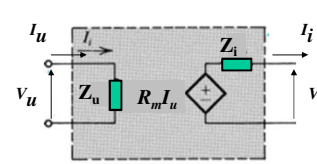
19. oktobar 2017. Uvod 50
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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 .

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


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


19. oktobar 2017. Uvod 51
<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.

19. oktobar 2017. Uvod 52
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

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

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

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

19. oktobar 2017. Uvod 53
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala

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

Po definiciji moduo i faza kompleksnog broja određuju se kao

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

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

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

19. oktobar 2017. Uvod 54
<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

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

19. oktobar 2017. Uvod 55
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala Dodatak

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

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

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

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

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

19. oktobar 2017. Uvod 56
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala Dodatak

Frekvencijske karakteristike (obnoviti iz matematike)

Faza se može izračunati kao:

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

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

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

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

19. oktobar 2017. Uvod 57
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala Dodatak

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

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

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

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

Pojačanje signala Dodatak

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

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

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

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

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

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

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

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

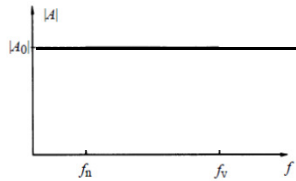
Pojačanje signala

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



19. oktobar 2017. Uvod 61
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

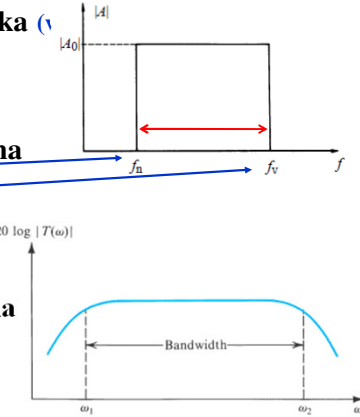
Pojačanje signala

Amplitudska karakteristika (1)

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

$BW = f_v - f_n$

Amplitudska karakteristika realnog pojačavača*



*Zašto?

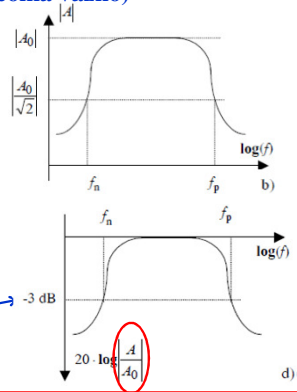
19. oktobar 2017. Uvod 62
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

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

19. oktobar 2017. Uvod 63
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

Pojačanje signala

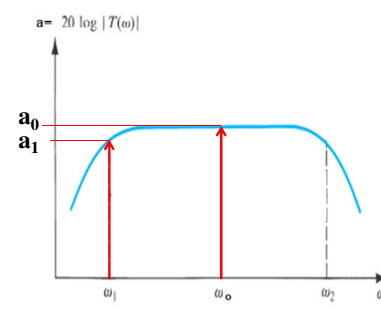
Amplitudska karakteristika (veoma važno)

Amplitudska karakteristika realnog pojačavača nije konstantna.

To znači da signali različitih frekvencija neće biti podjednako pojačani.

Posledica?

Linearna amplitudska izobličenja – videti slajd 7

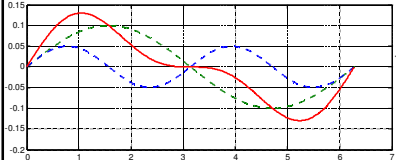


19. oktobar 2017. Uvod 64
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

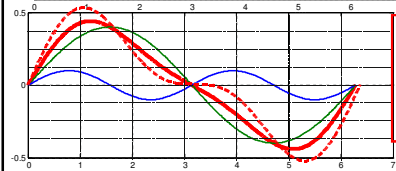
Pojačanje signala

Različito pojačanje na različitim frekvencijama

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



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

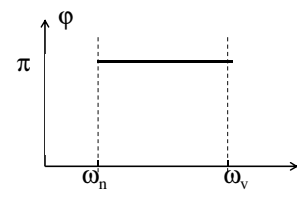


Na izlazu linearnog pojačavača koji različito pojačava signale različitih frekvencija javljaju se **linearna amplitudska izobličenja**.

19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 65

Pojačanje signala

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



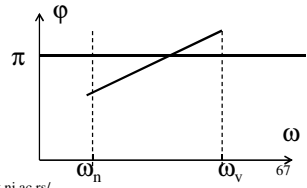
To je nerearno
Zahtev: PODJEDNAKO ZAKASNITI odnosi se na sve **potrebne spektralne** komponente

19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 66

Pojačanje signala

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

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

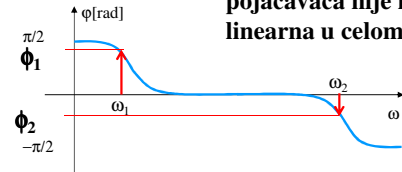


19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 67

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

19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 68

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

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

19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 69

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

Amplitudska karakteristika

fazna karakteristika

19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 70

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

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

(a) (b)

19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 71

Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.


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

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

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

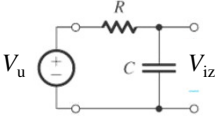
19. oktobar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 72

Pojačanje signala



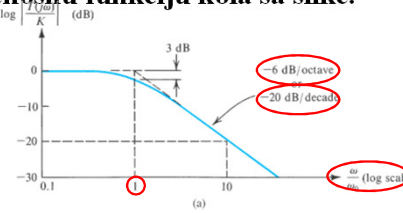
Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



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

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




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

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

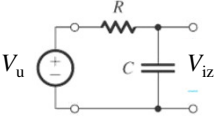
19. oktobar 2017. Uvod 73
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala



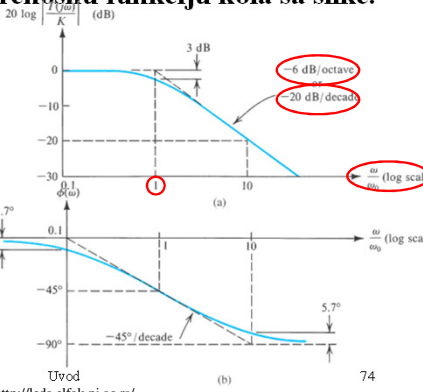
Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.




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

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



19. oktobar 2017. Uvod 74
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Pojačanje signala



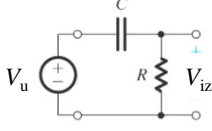
Frekvencijske karakteristike **Domaći 2.3**

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?



19. oktobar 2017. Uvod 75
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

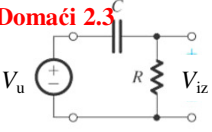
Pojačanje signala



Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

Domaći 2.3




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

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

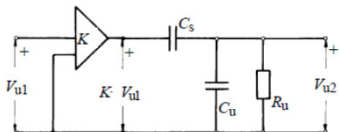
19. oktobar 2017. Uvod 75
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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 $A_0 = K \cdot C_s / (C_s + C_u)$.

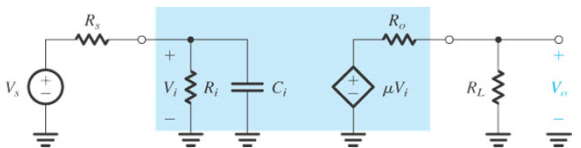
19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 77

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)

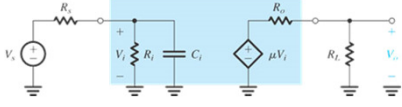
19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 77

Pojačanje signala



Frekvencijske karakteristike

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

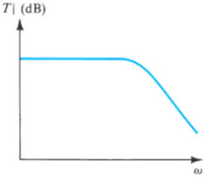


Rešenje:

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


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

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

$$\omega_0 = 1/\tau$$


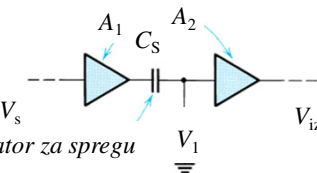
19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 77

Pojačanje signala

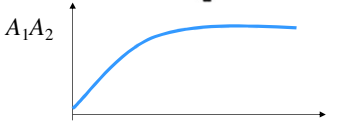


Frekvencijske karakteristike 17.10.2017

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



Rešenje:



19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 80

Šta smo naučili?

- **Razlika između frekvencijskih i prenosa 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

19. oktobar 2017.

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

81

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)

19. oktobar 2017.

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

82

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

| | | |
|--|-----|-----|
| Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe) | 10% | 10% |
| Odbranjene laboratorijske vežbe | 10% | 10% |
| Kolokvijum I (25.11.2017.) | 50% | 20% |
| Kolokvijum II (20.01.2018.) | 50% | 20% |



120% 60%

Savet: Lakše preko kolokvijuma

22. oktobar 2015.

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

83

Dodatak

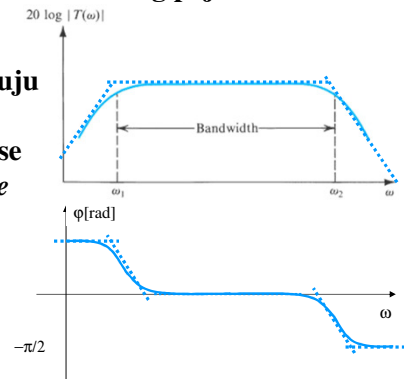
Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

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



Hendrik Wade Bode
(1905–1982)



19. oktobar 2017.

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

84

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:

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

19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 85

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

Postupak crtanja biće objašnjen na primeru funkcije

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

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

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

19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 86

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 $\omega = 10^5$ |

19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 87

Dodatak Pojačanje signala

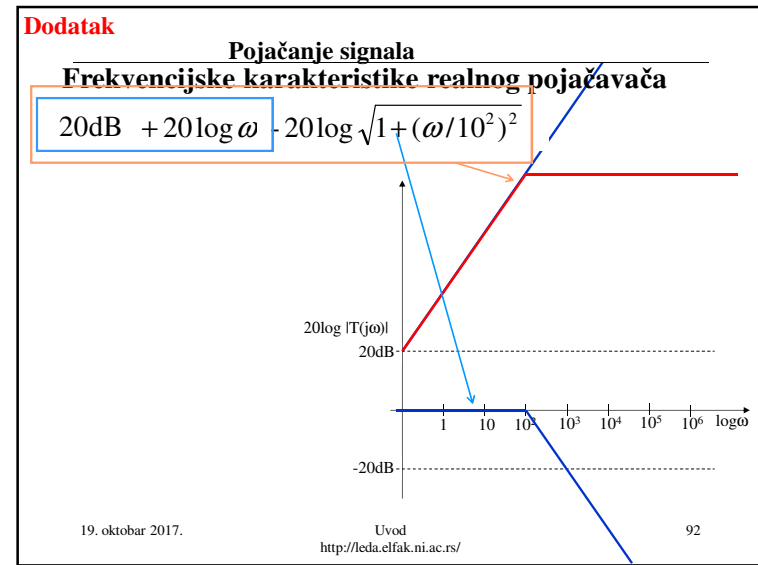
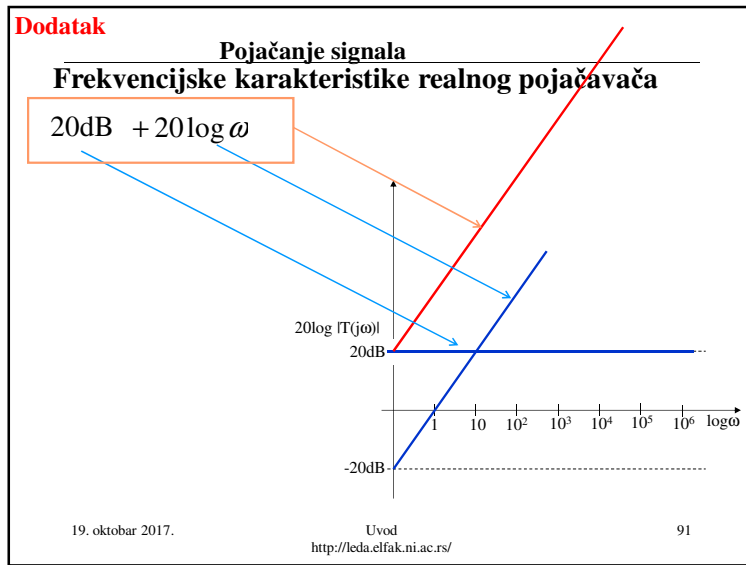
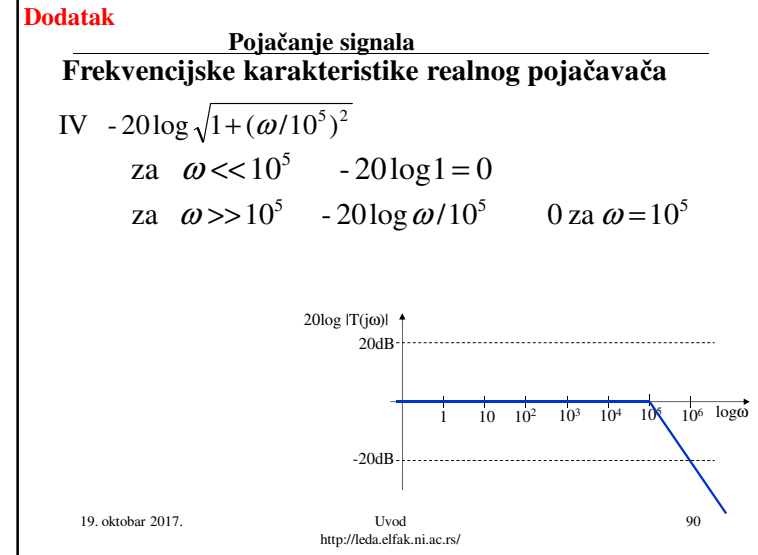
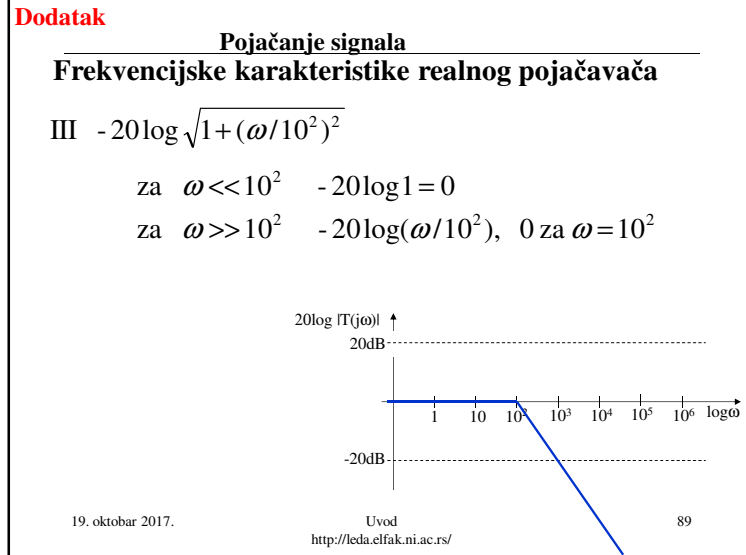
Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

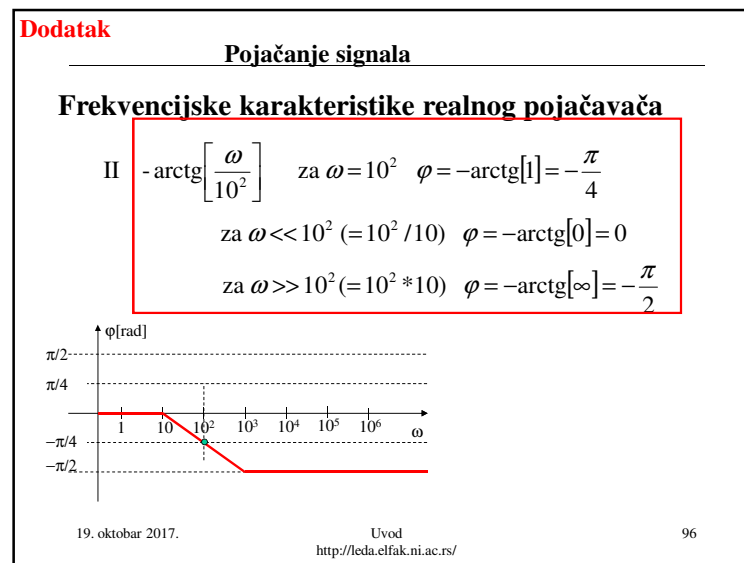
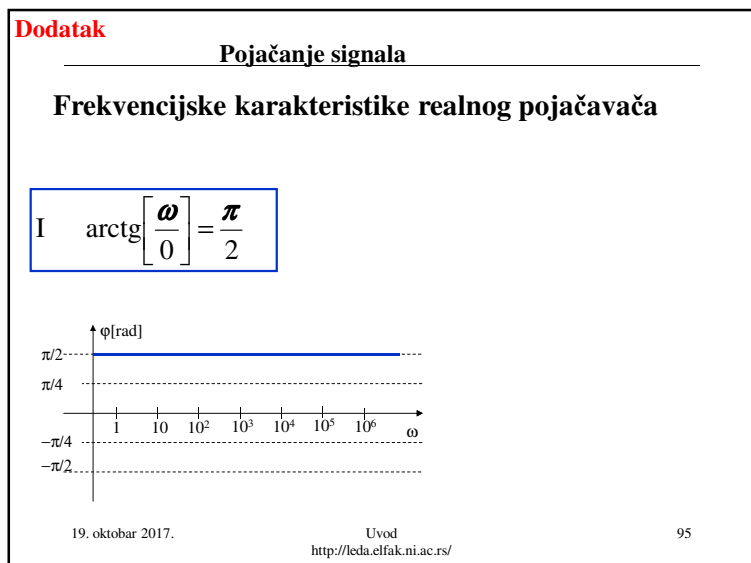
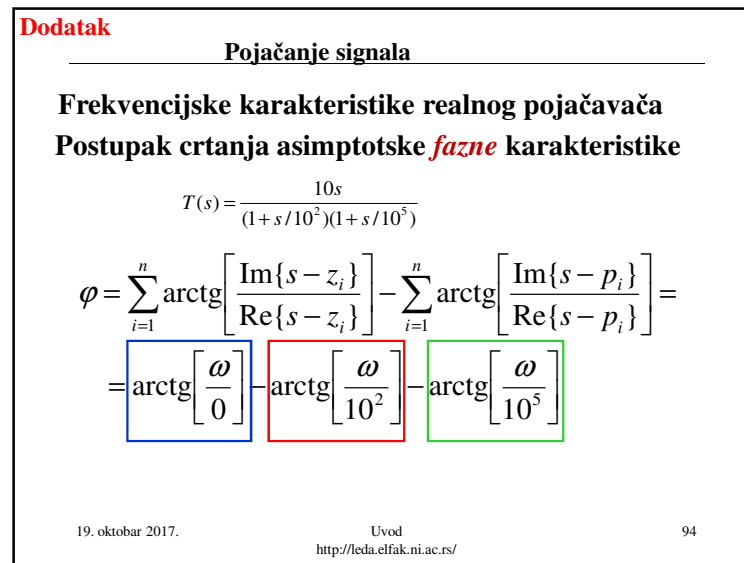
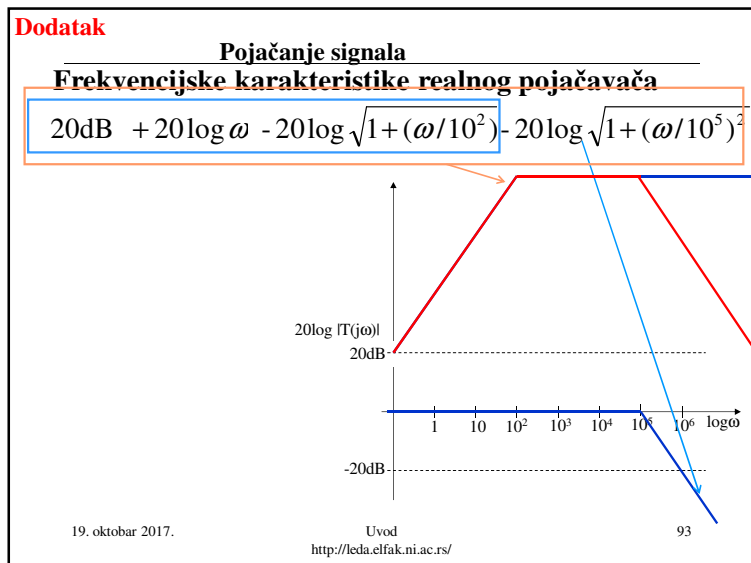
Postoje 4 segmenta asimptotskih pravih u log-log koord.

- 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

19. oktobar 2017. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 88





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

19. oktobar 2017. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 97

Dodatak Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

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

19. oktobar 2017. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 98

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

19. oktobar 2017. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 99

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

Naponski: $V_u \rightarrow V_i$

Idealni

$$A = \frac{V_i}{V_u} \text{ [V/V];}$$

$$R_u = \infty$$

$$R_i = 0$$

Realni

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

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

Zašto je ovo važno? 🤔

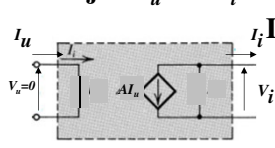
19. oktobar 2017. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 100

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

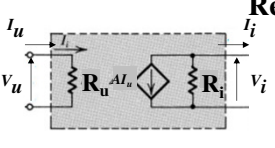
Strujni: $I_u \rightarrow I_i$

Idealni



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

Realni



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

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

Zašto je ovo važno? 🤔

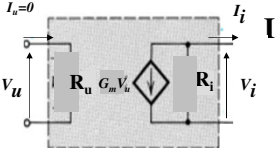
19. oktobar 2017.Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>101

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

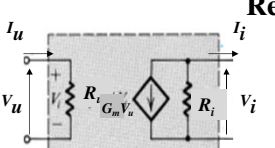
Transkonduktanski: $V_u \rightarrow I_i$ (napon u struju)

Idealni



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

Realni



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

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

Zašto je ovo važno? 🤔

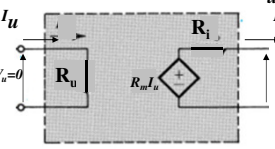
19. oktobar 2017.Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>102

Pojačanje signala Dodatak

Klasifikacija pojačavača prema tipu signala

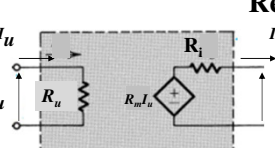
Transrezistanski: $I_u \rightarrow V_i$ (struja u napon)

Idealni



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

Realni



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

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

Zašto je ovo važno? 🤔

19. oktobar 2017.Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>103