

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:	U JANUARU	OSTALO
Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (prva nedelja u decembru)	50%	20%
Kolokvijum II (poslednja nedelja predavanja)	50%	20%



120% 60%

Savet: Lakše preko kolokvijuma

23. oktobar 2019.

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

1

Sadržaj

1. Uvod

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

2

Šta smo do sada naučili? (Elementarno)

- Uloga pojačavača**
- Razlika između frekvencijskih i prenosne karakteristike pojačavača**

23. oktobar 2019.

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

3

Šta smo do sada naučili? (Osnovno)

- Karakteristike prostoperiodičnog signala u vremenskom i frekvencijskom domenu (amplituda, efektivna vrednost, perioda, faza, frekvencija, kružna frekvencija, frekvencijski spektar).**
- Simbol pojačavača**
- Model idealnih i realnih pojačavača**
- Uzroci izobličenja izlaznog signala pojačavača**
- Frekvencijske karakteristike pojačavača**

23. oktobar 2019.

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

4

Ispitna pitanja 1

1. Šta su transdjuseri?
2. Odrediti vrednosti parametara ekvivalentnog Tevenenovog i Nortonovog modela generatora na kome je izmeren napon praznog hoda od 10V i struja kratkog spoja od 500mA.
3. Koliki je napon na izlazu neopterećenog realnog generatora nominalnog napona 10V koji ima unutrašnju otpornost 10Ω (praznog hoda)? Koliko iznosi struja kratkog spoja?
4. Koliki je napon na izlazu generatora nominalnog napona 10V koji ima unutrašnju otpornost 100Ω , ako je opterećen otpornošću od 100Ω ?
5. Karakteristike složenoperiodičnog signala u vremenskom i frekvencijskom domenu.
6. Karakteristike aperiodičnog signala u vremenskom i frekvencijskom domenu.

23. oktobar 2019.

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

5

Ispitna pitanja 2

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)

23. oktobar 2019.

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

6

Pitanja za ispit:

Elementarna	2
Obavezna	5
Ispitna	15
Na kraju ove nedelje biće ih	3+8+24

Ukoliko još niste počeli da učite - grešite!!!

Ali još uvek nije suviše kasno

Hajde da se propitamo!!!

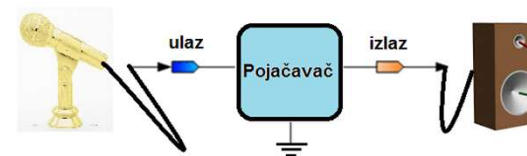
23. oktobar 2019.

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

7

Osnovi elektronike

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



23. oktobar 2019.

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

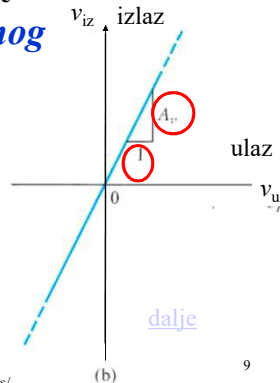
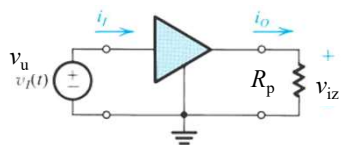
8

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Prenosna karakteristika pojačavača

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

Prenosna karakteristika linearnog pojačavača napona je prava = linearna funkcija



23. oktobar 2019.

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

9

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike (veoma važno)

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, $T(j\omega)$:

$$X_i(j\omega) = T(j\omega) \cdot X_u(j\omega).$$

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

23. oktobar 2019.

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

10

Da se podsetimo: 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

23. oktobar 2019.

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

11

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike realnog pojačavača

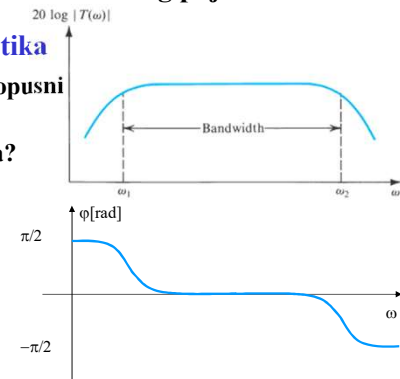
Amplitudska karakteristika

Šta je i kako se određuje propusni opseg?

Šta je dekada? Šta je oktava?

Nagib po dekadi/oktavi?

Fazna karakteristika



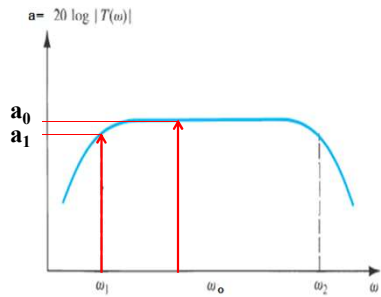
23. oktobar 2019.

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

12

Da se podsetimo: 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.

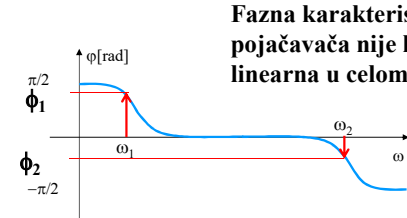
23. oktobar 2019.

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

13

Da se podsetimo: 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

23. oktobar 2019.

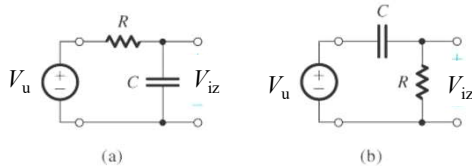
Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

14

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

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



23. oktobar 2019.

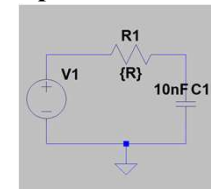
Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

15

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



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

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

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

23. oktobar 2019.

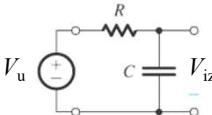
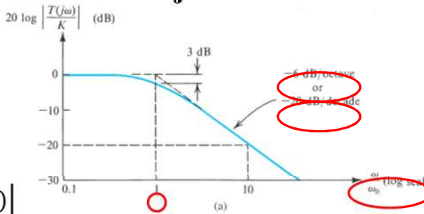
Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/

16

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

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

$$s = j\omega$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

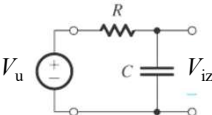
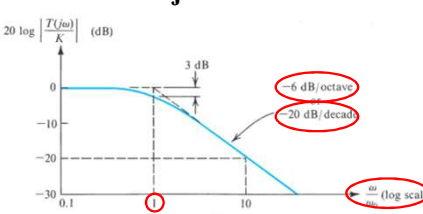
$$20 \log(|T(j\omega)|) = 20 \log\left(\frac{1}{\{1\}^2 + \left\{\frac{\omega}{\omega_0}\right\}^2}\right) =$$

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 17

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

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

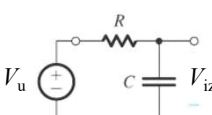
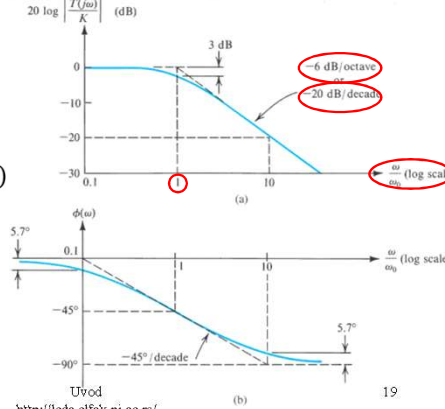
$$20 \log(|T(j\omega)|) \approx -20 \log\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \Big|_{\omega \gg \omega_0}$$

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 18

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

Primer 2.1: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

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

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 19

Da se podsetimo: Pojačanje signala

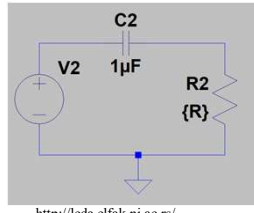
Frekvencijske karakteristike **Domaći 2.3**

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?



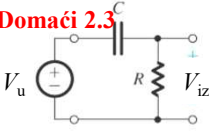
23. oktobar 2019. http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 20

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

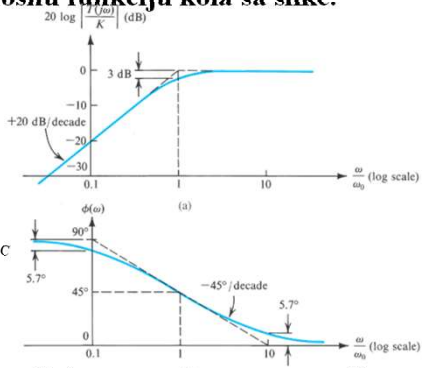
Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

Domaći 2.3



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

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

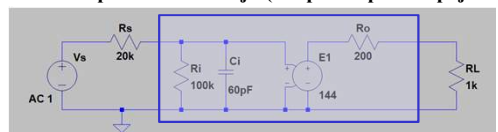


23. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 21

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

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

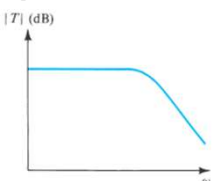


Rešenje:

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

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

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

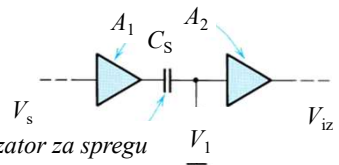
$$\omega_o = 1/\tau$$


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

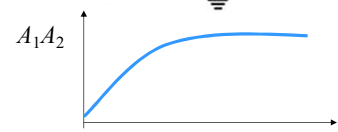
Da se podsetimo: Pojačanje signala

Frekvencijske karakteristike

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



Rešenje:



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

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Uloga pojačavača:

Da pojača ulazni signal **BEZ IZOBLIČENJA**

Kako može doći do izobličenja?

1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala (uzrok: *nelinearna prenosna karakteristika*)
2. Različito pojačanje na različitim frekvencijama (spektralne komponente) (uzrok: *amplitudska karakteristika nije konstantna*)
3. Različito kašnjenje na različitim frekvencijama (spektralne komponente) (uzrok: *fazna karakteristika nije konstantna ni linearna*)

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

Da se podsetimo: 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 $|v_u| > 0.1V$

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

Da se podsetimo: 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
 $v_u = 0.2 \cdot \sin(\omega t)$

Talasni oblik napona v_i : izobličenje signala

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

Da se podsetimo: Pojačanje signala

1. Različito pojačanje malih i velikih ulaznih signala

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

Na izlazu pojačavača koji različito pojačava signale različitih amplituda (ima nelinearnu prenosnu karakteristiku) javljaju se nelinearna amplitudska izobličenja.

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

Da se podsetimo: Pojačanje signala

2. Različito pojačanje na različitim frekvencijama

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

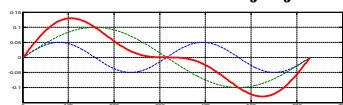
Izlazni signal
 $v_i(\omega t) = 1 \cdot v_u(\omega t) + 2 \cdot v_u(2\omega t)$
 $v_i(\omega t) = 1 \cdot (0.1 \cdot \sin(\omega t)) + 2 \cdot (0.05 \cdot \sin(2\omega t))$

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

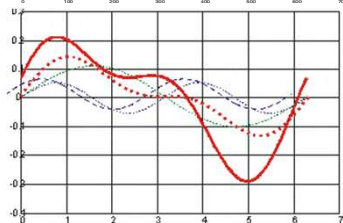
23. oktobar 2019. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 28

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

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

23. oktobar 2019.

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

29

Da se podsetimo: Pojačanje signala

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

Kakve karakteristike treba da ima da bi obavio tu ulogu? 

- a) Linearnost: izlazni signal A puta veći od ulaznog.
- b) Isto pojačanje na svim frekvencijama spektar
- c) 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.

23. oktobar 2019.

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

30

Pojačanje signala

Zašto smo ovo ponavljali? 

ZATO ŠTO JE VAŽNO

23. oktobar 2019.

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


31

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Uloga pojačavača:

Da *pojača* ulazni signal *bez izobličenja*

Očekujemo da snaga signala na izlazu bude veća nego na ulazu.

Da li je to realno? 

23. oktobar 2019.



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

32

Da se podsetimo: Pojačanje signala

Primer 1.1: Mikrofon koji daje na izlazu napon efektivne vrednosti od 10mV i ima izlaznu otpornost od 600Ω treba priključiti na potrošač od 8Ω. Izračunati naponsko i pojačanje snage kada se priključi:

- a) direktno
- b) preko pojačavača sa $A_o=100V/V$, $R_u=10\Omega$ i $R_{iz}=1M\Omega$
- c) preko **baferskog pojačavača** sa $A_o=1$, $R_u=1M\Omega$ i $R_{iz}=10\Omega$

 $A_p = \frac{P_p}{P_s} = \frac{2.42\mu W}{10pW} = 242 \text{ [W/W]} > 1$ 

Pojačanje signala

ODAKLE se dobija pojačanje?

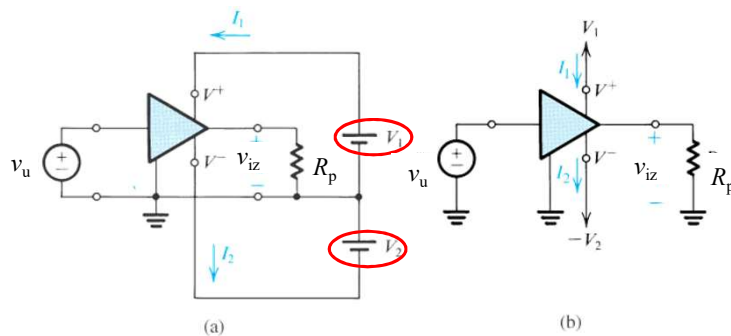
Da li je prekršen zakon o očuvanju energije?



Neophodno je obezbediti jednosmerne izvore za napajanje pojačavača (do sada ih nismo prikazivali)

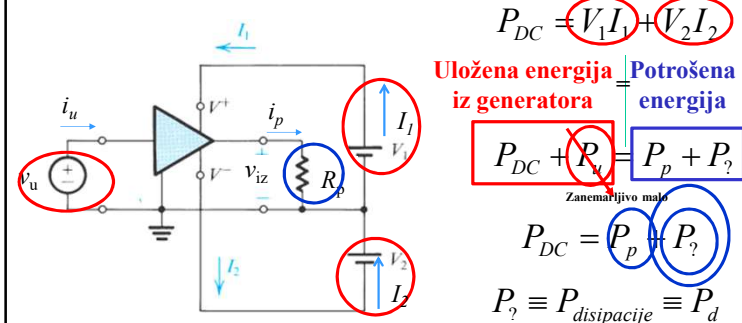
Pojačanje signala

Napajanje pojačavača – jednosmernim naponom



Pojačanje signala


Jednosmerno napajanje pojačavača



Troši se, gubi, disipira, (nepotrebno ali neophodno) snaga na samom pojačavaču

Efikasnost – stepen iskorišćenja pojačavača

$$\eta = \frac{P_p}{P_{DC}} \cdot 100 \text{ [%]}$$


Pojačanje signala 

Primer 3.1 Pojačavač koji se napaja sa +/-10V i pobuđuje sinusnim naponom amplitude 1V, daje napon amplitude 9 V na potrošaču od 1k. Izmerena je struja kroz svaki izvor napajanja od po 9,5mA i ulazna struja amplitude 0.1mA.

Odrediti:

- pojačanje napona,
- Pojačanje struje,
- pojačanje snage,
- snagu DC izvora napajanja,
- disipiranu snagu i
- stepen iskorišćenja

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 37

Pojačanje signala 

Rešenje :

a) pojačanje napona, $A_v = \frac{9}{1} = 9 \text{ V/V}$
 $A_v = 20 \log 9 \cong 19.1 \text{ dB}$


b) pojačanje struje,

$$I_i = \frac{V_i}{R_p} = \frac{9 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9 \text{ mA}$$

$$A_s = \frac{I_i}{I_u} = \frac{9 \text{ mA}}{0.1 \text{ mA}} = 90 \text{ A/A}$$

$$A_s = 20 \log 90 \cong 39.1 \text{ dB}$$

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 38

Pojačanje signala 

Rešenje : c) pojačanje snage

Aktivna snaga na potrošaču

$$P_p = V_{ieff} I_{ieff} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \frac{I_i}{\sqrt{2}} = \frac{9 \text{ V}}{\sqrt{2}} \frac{9 \text{ mA}}{\sqrt{2}} = 40.5 \text{ mW}$$

Aktivna snaga na ulazu


$$P_u = V_{ueff} I_{ueff} = \frac{V_u}{\sqrt{2}} \frac{I_u}{\sqrt{2}} = \frac{1 \text{ V}}{\sqrt{2}} \frac{0.1 \text{ mA}}{\sqrt{2}} = 0.05 \text{ mW}$$

Pojačanje snage

$$A_p = \frac{P_p}{P_u} = \frac{40.5}{0.05} = 810 \text{ W/W}$$

$$A_p = 10 \log 810 \cong 29.1 \text{ dB}$$

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 39

Pojačanje signala 

Rešenje :

d) snaga izvora za napajanje

$$P_{DC} = 10\text{V} \cdot 9,5\text{mA} + 10\text{V} \cdot 9,5\text{mA} = 190 \text{ mW}$$

e) snaga disipacije

$$P_d = P_{DC} + P_u - P_p = 190\text{mW} + 0.05\text{mW} - 49.5\text{mW} = 149.6 \text{ mW}$$

f) stepen iskorišćenja

$$\eta = \frac{P_p}{P_{DC}} \cdot 100 = 21.3\%$$

80% snage potroši se van potrošača – na pojačavaču

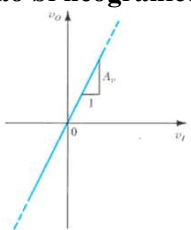
23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 40

Pojačanje signala

Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Praktično, čak i idealizovani pojačavač je linearan samo u ograničenom opsegu ulaznog, odnosno izlaznog napona.

Da nije tako, napon na izlazu rastao bi neograničeno sa porastom ulaznog napona.



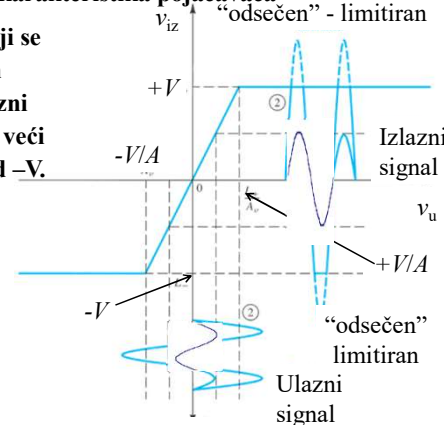
(b)

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

Pojačanje signala

Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Kod pojačavača koji se napaja simetričnim naponom $+V$, izlazni napon ne može biti veći od $+V$, niti manji od $-V$.



*Objasniti talasne oblike

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

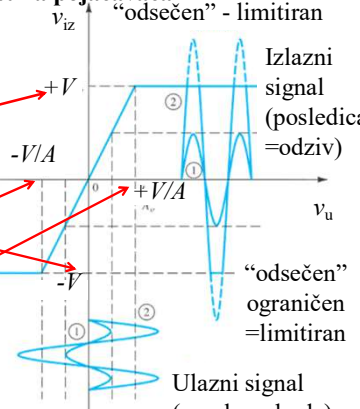
Pojačanje signala

Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Obično je izlaz limitiran na vrednost $L < V$

$+V > V_i > -V$

a ulaz limitiran na $-V/A < V_u < +V/A$



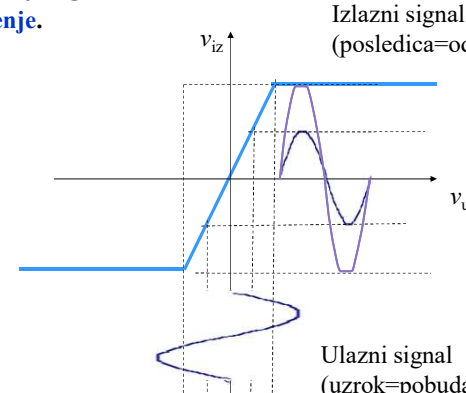
*Objasniti talasne oblike

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

Pojačanje signala

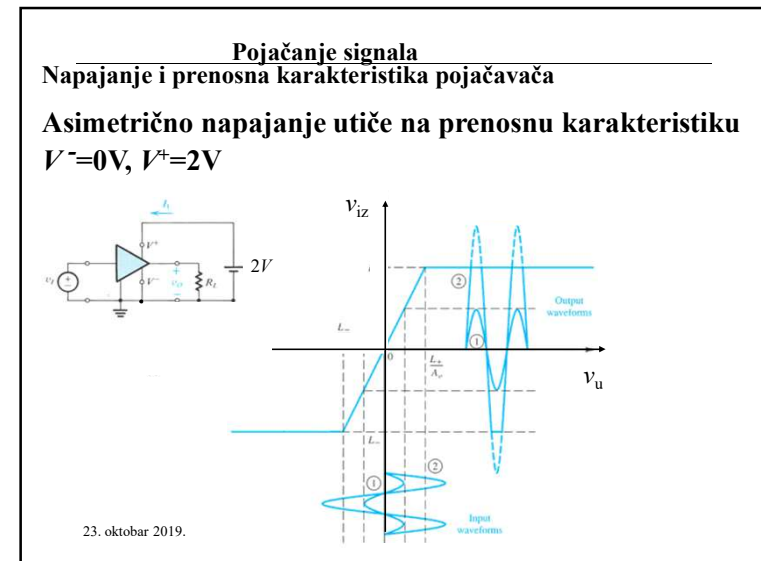
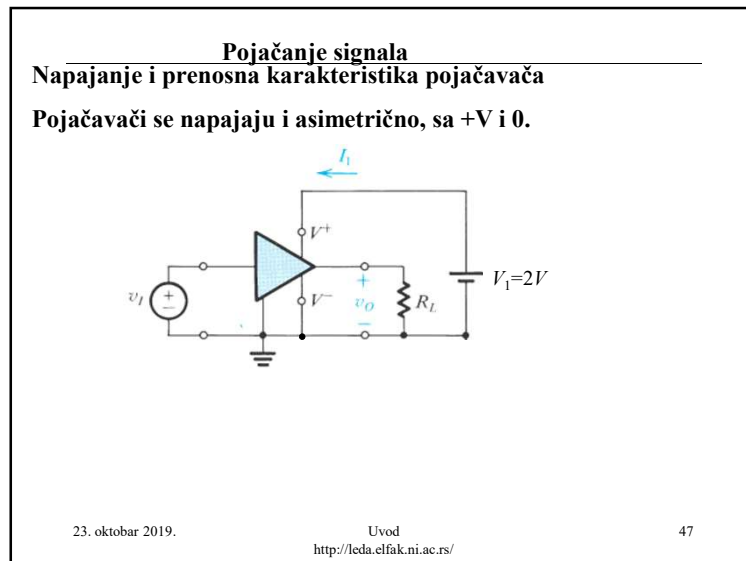
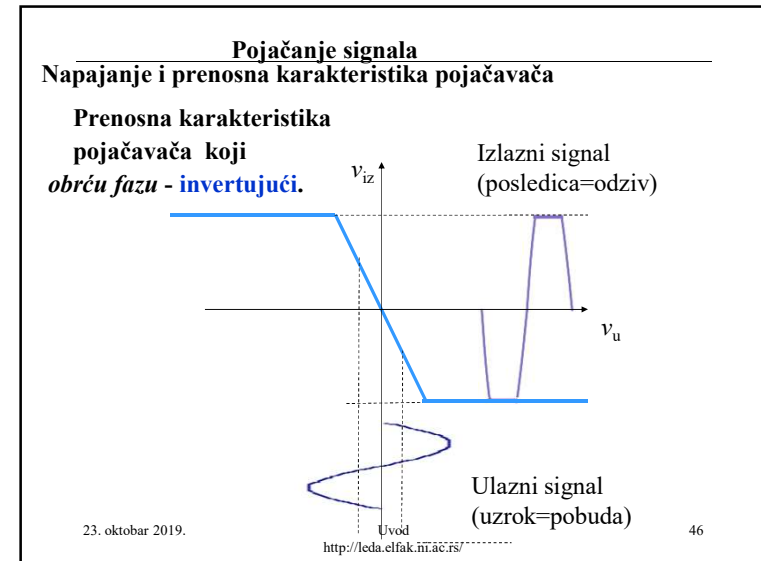
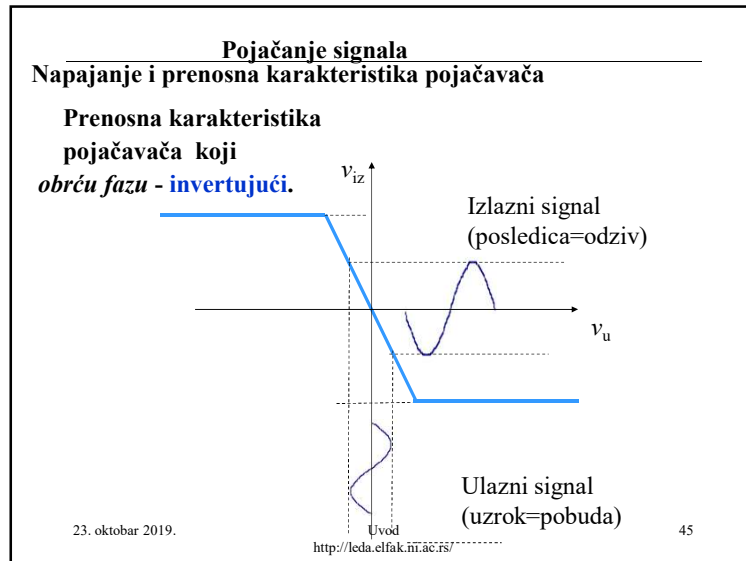
Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Limitiranje signala **izobličenje.**



Uvod

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



Pojačanje signala
Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Simetrično napajanje

Asimetrično napajanje

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

Pojačanje signala
Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Sredina prenosne karakteristika više nije u koordinatnom početku

Pretpolarizacija pojačavača
Naponi u odsustvu signala (jednosmerni=DC)
Mirna radna tačka M

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

Pojačanje signala
Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Prenosna karakteristika realnih pojačavača je *nelinearna*

$$v_o = V_U + v_i(t)$$

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

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

Pojačanje signala
Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

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

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

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

Pojačanje signala

Napajanje i prenosna karakteristika pojačavača

Nelinearnost je veća kada je signal veći i radna tačka dalja od sredine prenosne karakteristike.

Tada je signal više izobličen.

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

a)

23. oktobar 2019. Uvoda
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 53

Pojačanje signala

Nelinearna amplitudska izobličenja

Zašto nelinearna izobličenja nisu poželjna?

Uticaj na prostoperiodični signal => harmonici

Harmonijska izobličenja

23. oktobar 2019. Uvoda
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 54

Pojačanje signala

Kako odrediti i kvantifikovati izobličenje signala?

23. oktobar 2019. Uvoda
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 55

POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA

Izobličenje se meri veličinom koja se naziva *ukupni faktor izobličenja* i označava se sa *THD Total Harmonic Distortion*:

Napona
$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_m^2}}{V_1}$$

gde je V_i efektivna vrednost i -tog harmonika

Struje
$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_m^2}}{I_1}$$

gde je I_i efektivna vrednost i -tog harmonika

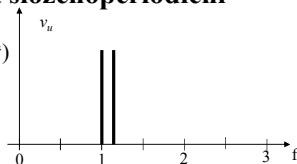
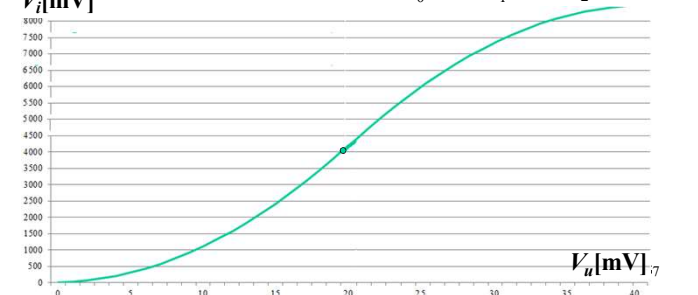
23. oktobar 2019. Uvoda
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 56

Dodatak

Pojačanje signala

Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodični signal

signal $v_u = V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)$
 $\omega_2 = 1.1 \cdot \omega_1$
 $v_i = V_{IM} + Av_u + Av_u^2$

Dodatak

Pojačanje signala

Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodični signal

$v_u = V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)$
 $\omega_2 = 1.1 \cdot \omega_1$

$$v_i = V_{IM} + Av_u + Av_u^2$$

$$v_i = V_{IM} + A(V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)) + A(V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t))^2$$

$$v_i = V_{IM} + A(V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)) + A(V_{u1} \cos(\omega_1 t))^2 + 2A(V_{u1} \cos(\omega_1 t) \cdot V_{u2} \cos(\omega_2 t)) + A(V_{u2} \cos(\omega_2 t))^2$$

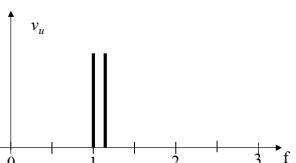
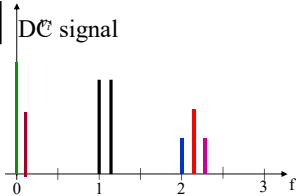
Uvod
 23. oktobar 2019. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 58

Dodatak

Pojačanje signala

Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodični signal

$v_u = V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)$
 $\omega_2 = 1.1 \cdot \omega_1$
 $v_i = V_{IM} + Av_u + Av_u^2$

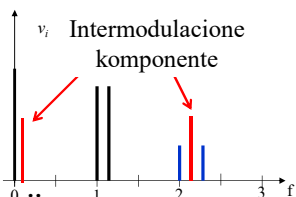
$$v_i = V_{IM} + \frac{A}{2}(V_{u1}^2 + V_{u2}^2) + A(V_{u1} \cos(\omega_1 t) + V_{u2} \cos(\omega_2 t)) + (A/2)V_{u1}^2 \cos(2\omega_1 t) + (A/2)V_{u2}^2 \cos(2\omega_2 t) + AV_{u1}V_{u2} \cos(\omega_1 + \omega_2)t + AV_{u1}V_{u2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$



Uvod
 23. oktobar 2019. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 59

Dodatak

Pojačanje signala

Uticaj nelinearnih izobličenja na složenoperiodični signal



Osim harmonijskih komponenti pojavljuju se i **intermodulacione** na frekvencijama zbira i razlike frekvencija složenog signala!!!
 To znači da mogu da se jave

- smetnje u drugom opsegu frekvencija
- preslikavanje smetnji u korisni opseg

Uvod
 23. oktobar 2019. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 60

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

- Prema nameni
- Prema tipu aktivnog elementa (BJT, MOSFET, JFET)
- Prema konfiguraciji (ZE, ZS, ZC, ZD, ZB, ZG)
- Prema radnoj tački (A, B, AB, C, -- D, E,...)
- Prema strukturi (jednostepeni, dvostepeni, višestepeni)

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 61

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

- Prema nameni
 - Prema tipu signala – videli smo (A, A_v, G_m, R_m)
 - Prema frekvencijskoj karakteristici (NF, VF, BP, širokopojasni, uskopojasni)
 - Prema veličini signala (za male/velike signale)

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 62

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

- Prema nameni
 - Prema frekvencijskoj karakteristici (NF, VF, BP)

The figure contains three graphs of magnitude $|T|$ (dB) versus angular frequency ω (log scale):

- NF (Noise Filter):** Shows a flat response at low frequencies that rolls off at high frequencies.
- VF (Voltage Filter):** Shows a response that increases linearly with a slope of +20 dB/decade at low frequencies and levels off at high frequencies. A detail shows a 3 dB roll-off at the corner frequency.
- BP (Band Pass) (PO):** Shows a bell-shaped response centered around a 'Center frequency'.

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 63

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

- Prema nameni
 - Prema veličini signala (za male/velike signale)

The figure contains two graphs of signal amplitude $v_o(t)$ versus time t :

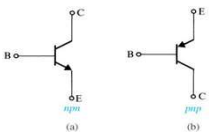
- Small signal:** Shows a linear relationship between input $v_i(t)$ and output $v_o(t)$ with a slope A_v . The output is a clean sine wave.
- Large signal:** Shows non-linear distortion where the output $v_o(t)$ is a distorted sine wave compared to the input $v_i(t)$.

23. oktobar 2019. Uvod
http://leda.elfak.ni.ac.rs/ 64

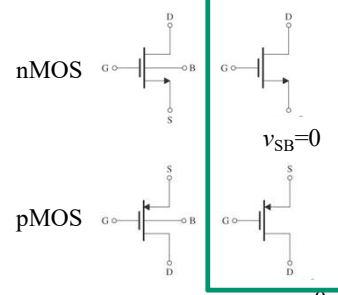
Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

- Prema tipu aktivnog elementa



BJT



MOSFET

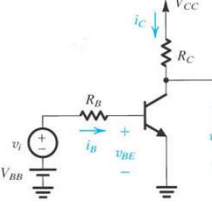
$v_{SB}=0$

23. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 65

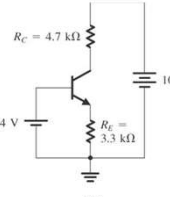
Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

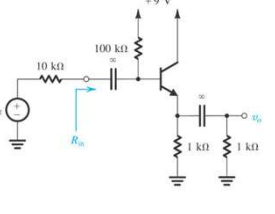
- Prema konfiguraciji



ZE



ZB



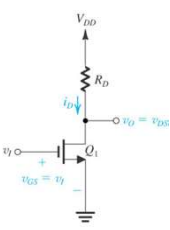
ZC

23. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 66

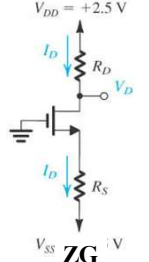
Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

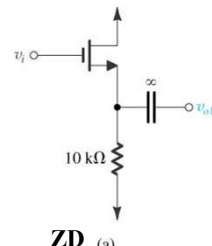
- Prema konfiguraciji



ZS



ZG



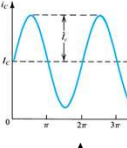
ZD (a)

23. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 67

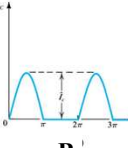
Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

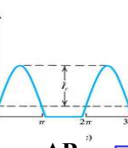
- Prema radnoj tački (A, B, AB, C, -- D, E, ...)



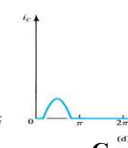
A



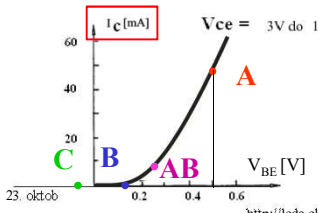
B



AB

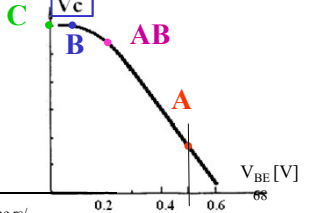


C



I_C [mA]

V_{BE} [V]



V_c

V_{BE} [V]

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

Pojačanje signala

Klasifikacija pojačavača

- Prema strukturi (jednostepeni, dvostepeni, višestepeni,

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

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

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

**Ko do danas nije dolazio na časove izgubio je 2.1% (120-2.1=117.9%)
Još nije kasno iako mu neće biti jasni mnogi pojmovi koje smo pominjali**

**Savet: Ne budite gubitnici
Ne gubite olako ono što imate!**

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

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

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

Propušteno predavanje nije samo izgubljenih 0.7% poena – to je izgubljena šansa da se blagovremeno uoči ono što nije jasno.

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

Osnovi elektronike

Šta smo za ove tri uvodne nedelje naučili?
Samo nabrojite nove pojmove koje ste čuli:
Pojačavač napona, struje, snage, transkonduktanski, modeli pojačavača, prenosna karakteristika, prenosna funkcija, frekvencijske karakteristike, definicija dB, oktava, dekada, propusni opseg, granične frekvencije, uzroci izobličenja signala, linearna/nelinearna izobličenja, amplitudska/fazna izobličenja, faktor izobličenja, napajanje pojačavača, stepen iskorišćenja, disipacija snage, simetrično/asimetrično napajanje, mirna radna tačka, klasa A, B, AB, C, klasifikacija pojačavača prema tipu i veličini signala, prema tipu aktivnog elementa, konfiguraciji, strukturi,...

Ako možete da ih definišete - možemo dalje.
U suprotnom, biće teže da pratite ono što sledi.

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

Šta smo naučili?

- **Pojam jednosmerne radne tačke**
 - Prenosna karakteristika pojačavača sa asimetričnim napajanjem
 - Kako se mere nelinearna izobličenja?
 - Klasifikacija pojačavača

23. oktobar 2019.

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

73

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

23. oktobar 2019.

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

74

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;

23. oktobar 2019.

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

75

Ispitna pitanja?

1. Bilans snage kod pojačavača: uložena, potrošena, korisna i snaga disipacije.
2. Prenosna karakteristika realnog pojačavača sa simetričnim napajanjem.
3. Uticaj položaja mirne radne tačke na talasni oblik signala na izlazu realnog pojačavača napona sa (a)simetričnim napajanjem.
4. Objasniti kako nastaju nelinearna izobličenja na izlazu pojačavača.
5. Klasifikacija pojačavača prema tipu signala.
6. Klasifikacija pojačavača prema frekvencijskom opsegu.
7. Klasifikacija pojačavača prema tipu aktivnog elementa.
8. Klasifikacija pojačavača prema konfiguraciji.
9. Klasifikacija pojačavača prema strukturi.

23. oktobar 2019.

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

76

Sledećeg časa:
Operacioni pojačavači

Na web adresi <http://leda.elfak.ni.ac.rs>
 > EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE
slajdovi u pdf formatu

23. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 77

Rešenje 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.

Pogledati slajdove 1.25; 1.26; 1.44

$$A_o = 40\text{dB} = 100\text{V/V}$$

$$V_i = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} A_o V_{ii} \Rightarrow A = \frac{V_i}{V_{ii}} = \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} A_o = \frac{1\text{k}}{1\text{k} + 1\text{k}} 100 = 50\text{V/V}$$

$$P_i = \frac{V_i^2}{R_p} = \frac{\left(\frac{R_p}{R_{iz} + R_p} A_o V_{ii}\right)^2}{R_p} = \frac{\left(\frac{1}{2} A_o V_{ii}\right)^2}{R_p}$$

$$P_{ii} = \frac{V_{ii}^2}{R_{ii}}$$

$$A_p = \frac{P_i}{P_{ii}} = \frac{\left(\frac{1}{2} A_o V_{ii}\right)^2}{R_p} \cdot \frac{R_{ii}}{V_{ii}^2} = \frac{2500 \cdot 10\text{k}}{1\text{k}} = 25000\text{W/W}$$

$$a_p = 10 \log(A_p) \approx 44\text{dB}$$

23. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 78

Rešenje 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 .

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

23. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 79

Rešenje 2.2 Pojačanje signala

$$v_i = A \cdot v_s = 743,9 \cdot v_s$$

$$P_i = \frac{v_i^2}{R_p} = \frac{(A \cdot v_s)^2}{R_p} = \frac{743,9^2}{100} \cdot v_s^2 = 5,53 \cdot 10^3 \cdot v_s^2$$

$$P_{u1} = \frac{v_{u1}^2}{R_{u1}} = \frac{\left(\frac{R_{u1} \cdot v_s}{R_s + R_{u1}}\right)^2}{R_{u1}} = \frac{R_{u1} \cdot v_s^2}{(R_s + R_{u1})^2}$$

$$P_{u1} = \frac{1}{1,21 \cdot 10^6} \cdot v_s^2 = 8,26 \cdot 10^{-7} \cdot v_s^2;$$

$$A_{p_{u1}} = \frac{P_i}{P_{u1}} = \frac{5,53 \cdot 10^3 \cdot v_s^2}{8,26 \cdot 10^{-7} \cdot v_s^2} = 67 \cdot 10^8 \text{ W/W}$$

$$a_{p_{u1}} = 10 \log(67 \cdot 10^8) = 98,2\text{dB}$$

$$P_s = \frac{v_s^2}{R_s + R_{u1}} = \frac{1}{1,1 \cdot 10^6} \cdot v_s^2 = 0,909 \cdot 10^{-6} \cdot v_s^2$$

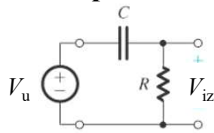
$$A_{p_s} = \frac{P_i}{P_s} = \frac{5,53 \cdot 10^3 \cdot v_s^2}{0,909 \cdot 10^{-6} \cdot v_s^2} = 61 \cdot 10^8 \text{ W/W}$$

$$a_{p_s} = 10 \log(61 \cdot 10^8) = 97,8\text{dB}$$

23. oktobar 2019. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 80

Rešenje 2.3 Pojačanje signala

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



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

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

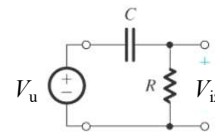
23. oktobar 2019.

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

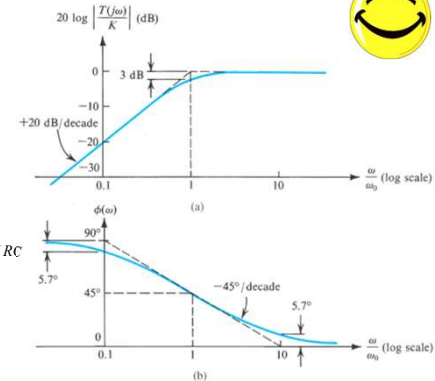
81

Rešenje 2.3 Pojačanje signala

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



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



23. oktobar 2019.

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

82

Rešenje 2.4

Pojačanje signala

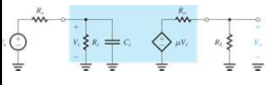
Odrediti prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) kola sa slike.

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

a) Odrediti pojačanje pri $\omega=0$ rad/s (jednosmerno) ($A=100$ V/V)

b) Gračniču frekvenciju (3dB) ($\omega_o=10^6$ rad/s, $f_o=159,2$ kHz)

c) Odrediti frekvenciju pri kojoj A padne na 0dB (10⁸ rad/s)



$$V_i(s) = \frac{Z_i}{Z_i + R_s} V_s(s) = \frac{R_i / (1 + sC_f R_i)}{R_i / (1 + sC_f R_i) + R_s} V_s(s) = \frac{R_i}{R_i + R_s} \frac{1}{1 + sC_f (R_i \parallel R_s)} V_s(s)$$

$$V_o(s) = \frac{R_L}{R_o + R_L} \mu V_i(s) = \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{\mu R_i}{R_i + R_s} \frac{1}{1 + sC_f (R_i \parallel R_s)} V_s(s)$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \mu \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{R_i}{R_i + R_s} \frac{1}{1 + sC_f (R_i \parallel R_s)}$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = A_o \frac{1}{1 + sC_f (R_i \parallel R_s)} = A_o \frac{1}{1 + s\tau}$$

$$\tau = C_f (R_i \parallel R_s) = 10^{-6} \text{ s}$$

$$A_o = \mu \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{R_i}{R_i + R_s} = 144 \frac{1k}{1.2k} \frac{100k}{120k} = 100 \text{ V/V}$$

$$|A(j\omega)| = A_o \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

$$|A(j\omega_{3dB})| = \frac{A_o}{\sqrt{1 + (\omega_{3dB} \cdot \tau)^2}} = \frac{A_o}{\sqrt{2}} \Rightarrow \omega_{3dB} = \frac{1}{\tau}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{\tau} = 10^6 \text{ rad/s}$$

$$|A(j\omega_1)| = \frac{A_o}{\sqrt{1 + (\omega_1 \cdot \tau)^2}} = 1 \Rightarrow \omega_1^2 = \frac{A_o^2 - 1}{\tau^2}$$

$$\omega_1 \approx \frac{A_o}{\tau} = A_o \cdot \omega_{3dB} = 100 \cdot 10^6 \text{ rad/s} = 10^8 \text{ rad/s}$$

23. oktobar 2019.

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