

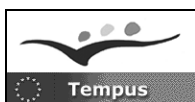


**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U BEOGRADU**  
**ODSEK ZA ELEKTRONIKU**

**Milan Prokin      Radivoje Đurić      Jovan Vujašinović**

# **Priručnik za Laboratorijske vežbe iz elektronike 1**

**prvi deo-osnovi analogne elektronike**



JEP 17028-02

**Beograd, 2015.**

## **OSNOVI ANALOGNE ELEKTRONIKE-priručnik za laboratorijske vežbe**

**Autori:**

**dr Milan Prokin**

**mr Radivoje Đurić**

**Jovan Vujasinović**

**Recenzent:**

**dr Predrag Pejović**

---

**Napomena:**

**Autorska prava su zaštićena i zabranjeno je svako umnožavanje i publikovanje-u celini ili u delovima bez  
odobrenja autora**

---

# **SADRŽAJ**

<b>1. OPERACIONI POJAČAVAČ</b>	<b>1</b>
<b>2. PRIMENA OPERACIONIH POJAČAVAČA: INTEGRATOR I PRECIZNI USMERAČ</b>	<b>7</b>
<b>3. PRIMENA OPERACIONIH POJAČAVAČA: SABIRAČ, DIFERENCIJALNI I INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČ</b>	<b>14</b>
<b>4. FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE POJAČAVAČA</b>	<b>20</b>
<b>5. FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE: ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČ SA NAPONSKIM I STRUJNIM PROCESIRANJEM-PSPICE</b>	<b>26</b>
<b>6. ŠUM U ELEKTRONSKIM KOLIMA-PSPICE</b>	<b>30</b>
<b>7. ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE KORIŠĆENIH POLUPROVODNIČKIH KOMPONENTI</b>	<b>34</b>
<b>8. LITERATURA</b>	<b>40</b>
<b>9. EVIDENCIJA IZRADE LABORATORIJSKIH VEŽBI</b>	<b>41</b>



## UVOD

Laboratorijske vežbe iz Osnova analogne elektronike izvode studenti Odseka za elektroniku. Ove vežbe su usklađene sa predmetom Osnovi analogne elektronike na II godini studija i služe za upotpunjavanje znanja i sticanje praktičnih iskustava u laboratoriji.

Sve vežbe se izvode na univerzalnoj radnoj ploči-protobordu. Uz pripremljeni set potrebnih komponenti i instrumenata, ovaj koncept omogućava lak i jednostavan eksperimentalni rad.

Praksa je pokazala da su laboratorijske vežbe znatno efektivnije ako studenti dolaze pripremljeni na njih. Iako se vežbe izvode u parovima svaki student je dužan da se adekvatno pripremi za vežbu. Ovaj priručnik pruža mogućnost pripreme vežbi, ali i kasnijeg korišćenja eksperimentalnih rezultata.

Za uspešan rad je potrebno pridržavati se pravila o radu u laboratoriji i pravilno upotrebljavati mernu opremu. Pre uključivanja eksperimentalnih kola i merne opreme na napon za napajanje potrebno je pozvati dežurnog u laboratoriji radi provere ispravnosti veza.

Laboratorijske vežbe su tematski vezane za ispitivanje osobina i primenu operacionih pojačavača i ispitivanje karakteristika pojačavačkih kola na niskim i visokim učestanostima.

Prva vežba se bavi određivanjem polarizacionih struja i ofseta operacionih pojačavača, kao i analizom osnovnih pojačavačkih kola sa operacionim pojačavačem. Druga vežba analizira uticaj jednosmernih neidealnosti operacionih pojačavača na rad integratorskih kola i pokazuje karakteristične načine za kompenzaciju ovih uticaja. Ova vežba razmatra i precizne usmerače sa operacionim pojačavačima. U trećoj vežbi se pokazuje primena operacionih pojačavača u sabiračima i diferencijalnim pojačavačima. Takođe se analizira i standardni instrumentacioni pojačavač. Analiza frekvencijskih karakteristika karakterističnih pojačavača sa operacionim pojačavačima i osnovnih pojačavačkih stepena sa bipolarnim tranzistorima tema je četvrte vežbe. Peta i šesta vežba se izvode primenom programa za simulaciju elektronskih kola PSPICE. U petoj vežbi se analiziraju širokopojasni pojačavači, sa naponskim i strujnim procesiranjem. Analiza uticaja šuma u kolima sa operacionim pojačavačima, diskretnim bipolarnim i integrisanim CMOS pojačavačima je tema šeste vežbe.

Izdavanje ovog priručnika je finansirano korišćenjem sredstava Tempus projekta JEP 17028-2.

Sve dobronamerne sugestije i primedbe će biti primljene za zahvalnošću.

U Beogradu 12.08.2006.

Autori



## VEŽBA 1

### OPERACIONI POJAČAVAČ

#### OPIS VEŽBE

Koriste se šeme pojačavača prikazane na slikama 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 i 1.7 koje treba ostvariti na univerzalnoj radnoj ploči. Kola se napajaju iz dve baterije za napajanje  $V_{CC} = 12\text{ V}$  i  $V_{EE} = -12\text{ V}$ , koje treba priključiti na protobord.

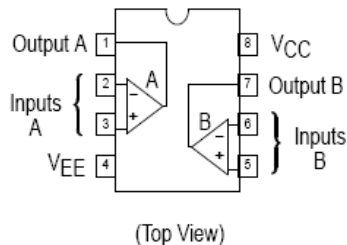
Pri snimanju prenosnih karakteristika, na ulaz pojačavača se dovodi prostoperiodični napon iz signal generatora, koga takođe treba priključiti na protobord.

Merenje jednosmernih i promenljivih napona obavlja se pomoću osciloskopa. Za snimanje prenosnih karakteristika koristi se osciloskop u modu prikazivanja XY.

#### Pribor, instrumenti i materijal

- dva izvora za napajanje 12V
- osciloskop
- signal generator
- univerzalna radna ploča
- operacioni pojačavač MC 1458
- otpornici tolerancije 1% i snage 0,25 W sledećih vrednosti: 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$ , 10 M $\Omega$

#### PIN CONNECTIONS

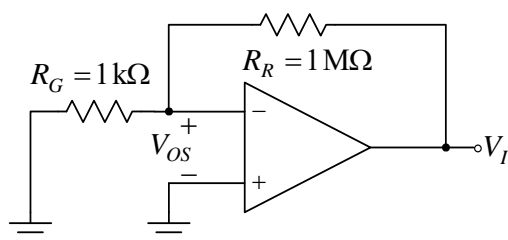


Na slici 1.0 prikazana je šema sa rasporedom priključaka operacionih pojačavača u integrisanom kolu sa oznakom MC 1458. Na kraju priručnika su date karakteristike ovih operacionih pojačavača.

Slika 1.0 Raspored priključaka integrisanog kola MC 1458

#### ZADATAK

##### 1. MERENJE NAPONSKOG OFSETA $V_{OS}$ OPERACIONOG POJAČAVAČA



Slika 1.1. Kolo za merenje naponskog ofseta operacionog pojačavača.

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 1.1. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona ofseta

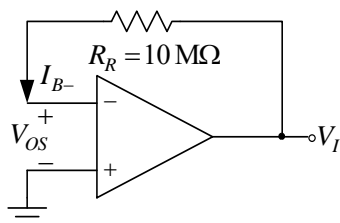
$$V_I \cong V_{OS} \left( 1 + \frac{R_R}{R_G} \right).$$

Merenje naponskog ofseta se obavlja merenjem izlaznog napona.

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 1.1.
2. Na izlaz kola vezati osciloskop.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Izmeriti izlazni napon  $V_I = \underline{\hspace{2cm}}$  [V] .
5. Izračunati naponski ofset  $V_{OS} = \underline{\hspace{2cm}}$  [V] .

## 2. MERENJE ULAZNE STRUJE $I_{B-}$ OPERACIONOG POJAČAVAČA



Slika 1.2. Kolo za merenje ulazne struje minus priključka operacionog pojačavača.

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 1.2. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona ofseta i ulazne struje minus priključka operacionog pojačavača

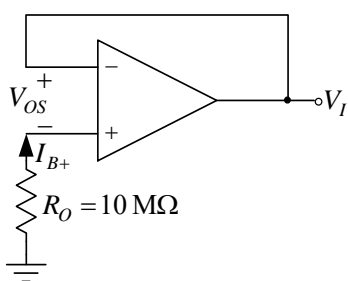
$$V_I = V_{OS} + R_R I_{B-} .$$

Merenje ulazne struje minus priključka se obavlja merenjem izlaznog napona.

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 1.2.
2. Na izlaz kola vezati osciloskop.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Izmeriti izlazni napon  $V_I = \underline{\hspace{2cm}}$  [V] .
5. Izračunati ulaznu struju minus priključka  $I_{B-} = \underline{\hspace{2cm}}$  [nA] .

## 3. MERENJE ULAZNE STRUJE $I_{B+}$ OPERACIONOG POJAČAVAČA



Slika 1.3. Kolo za merenje ulazne struje plus priključka operacionog pojačavača.

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 1.3. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona ofseta i ulazne struje plus priključka operacionog pojačavača

$$V_I = V_{OS} - R_O I_{B+} .$$

Merenje ulazne struje plus priključka se obavlja merenjem izlaznog napona.

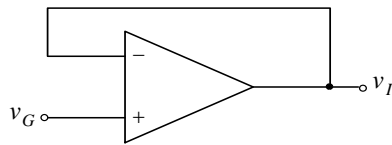
### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 1.3.
2. Na izlaz kola vezati osciloskop.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Izmeriti izlazni napon  $V_I = \underline{\hspace{2cm}}$  [V] .
5. Izračunati ulaznu struju plus priključka  $I_{B+} = \underline{\hspace{2cm}}$  [nA] .
6. Izračunati struju ofseta  $I_{OS} = I_{B+} - I_{B-} = \underline{\hspace{2cm}}$  [nA] .

## 4. MERENJE PRENOSNE KARAKTERISTIKE JEDINIČNOG BAFERA

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 1.4. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača  $v_I = v_G$  .



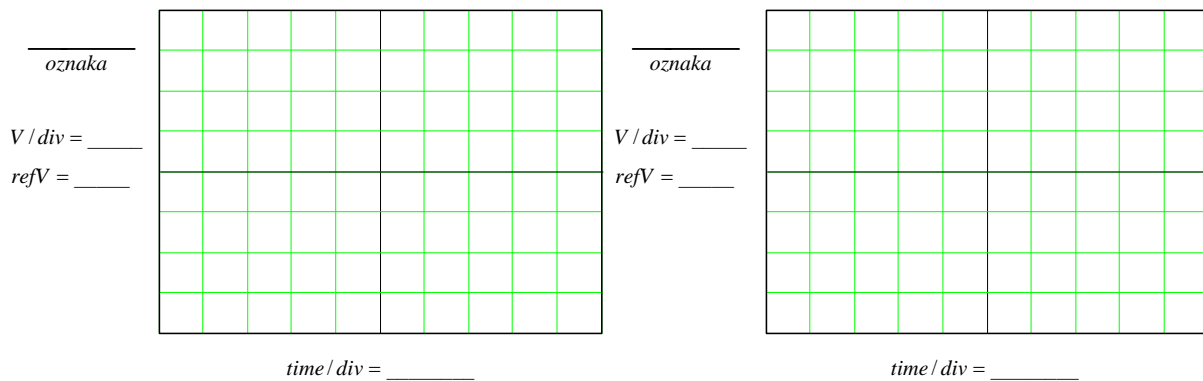


Merenje prenosne karakteristike jediničnog bafera se obavlja merenjem izlaznog napona.

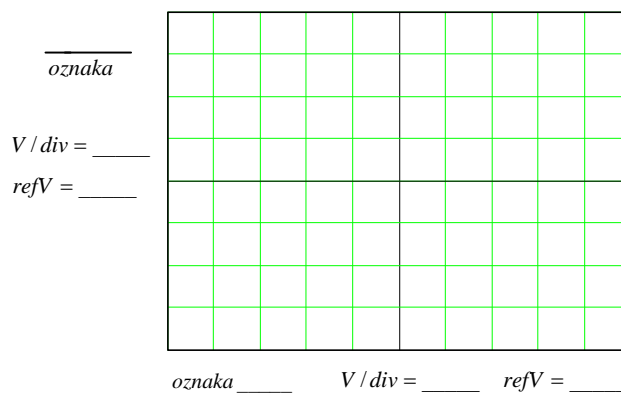
### Postupak pri merenju

Slika 1.4. Jedinični bafer.

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 1.4.
2. Na izlaz kola vezati drugi kanal osciloskopa.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Smanjiti napone  $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ , sa 12 V na 8 V.
5. Na ulaz kola dovesti generator.
6. Uključiti generator.
7. Na ulaz kola vezati prvi kanal osciloskopa.
8. Podesiti generator, tako da na izlazu generise prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 1\text{ V}$  i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ .
9. Na grafike prikazane na slici 1.4a ucrtati vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona.
10. Povećati amplitudu napona generatora na  $V_{gm} = 10\text{ V}$ .
11. Prebaciti osciloskop u mod prikazivanja XY.
12. Na grafik prikazan na slici 1.4b ucrtati prenosnu karakteristiku jediničnog bafera.



Slika 1.4a Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznog i izlaznog napona jediničnog bafera

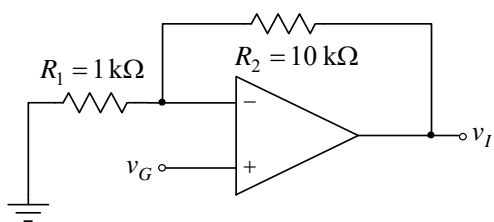


Slika 1.4b Eksperimentalno određena prenosna karakteristika jediničnog bafera

## 5. MERENJE PRENOSNE KARAKTERISTIKE NEINVERTUJUĆEG POJAČAVAČA

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 1.5. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača

$$v_I = v_g \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).$$

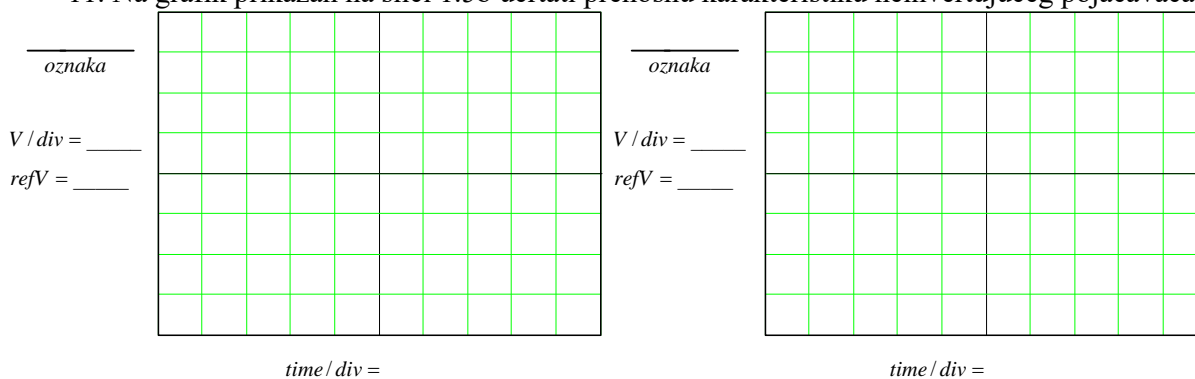


Slika 1.5. Neinvertujući pojačavač.

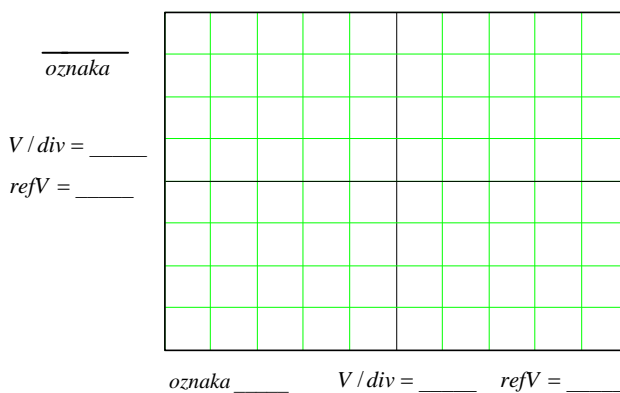
Merenje prenosne karakteristike neinvertujućeg pojačavača se obavlja merenjem izlaznog napona.

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 1.5.
2. Na izlaz kola vezati drugi kanal osciloskopa.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Na ulaz kola dovesti generator.
5. Uključiti generator.
6. Na ulaz kola vezati prvi kanal osciloskopa.
7. Podesiti generator, tako da na izlazu generise prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 0.5 \text{ V}$  i učestanosti  $f = 1 \text{ kHz}$ .
8. Na grafike prikazane na slici 1.5a ucrtati vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona.
9. Povećati amplitudu napona generatora na  $V_{gm} = 2 \text{ V}$ .
10. Prebaciti osciloskop u mod prikazivanja XY.
11. Na grafik prikazan na slici 1.5b ucrtati prenosnu karakteristiku neinvertujućeg pojačavača.



Slika 1.5a Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznog i izlaznog napona neinvertujućeg pojačavača



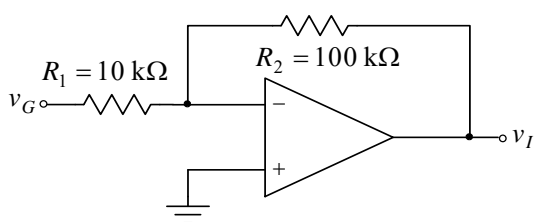
Slika 1.5b Eksperimentalno određena prenosna karakteristika neinvertujućeg pojačavača

## 6. MERENJE PRENOSNE KARAKTERISTIKE INVERTUJUĆEG POJAČAVAČA

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 1.6. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača

$$v_I = -\frac{R_2}{R_1} v_g.$$

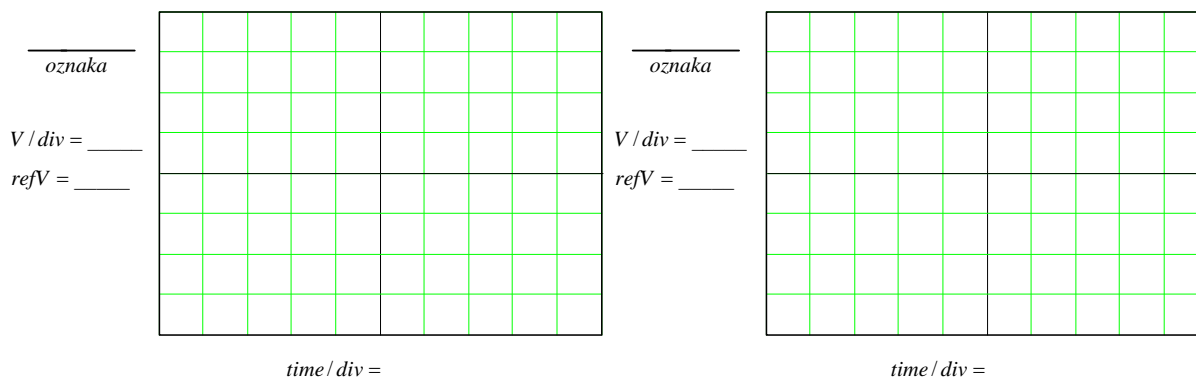
Merenje prenosne karakteristike invertujućeg pojačavača se obavlja merenjem izlaznog napona.



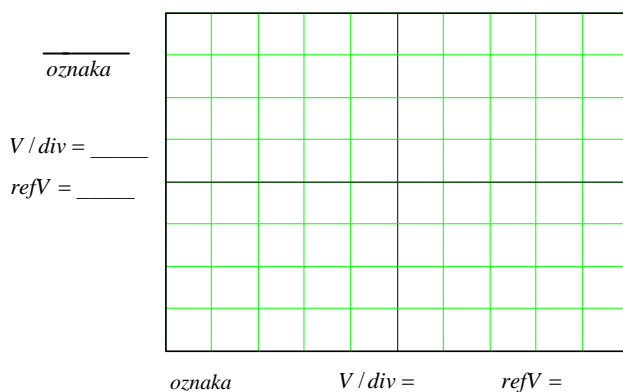
Slika 1.6. Invertujući pojačavač.

## Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 1.6.
2. Na izlaz kola vezati drugi kanal osciloskopa.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Na ulaz kola dovesti generator.
5. Uključiti generator.
6. Na ulaz kola vezati prvi kanal osciloskopa.
7. Podesiti generator, tako da na izlazu generise prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 0.5 \text{ V}$  i učestanosti  $f = 1 \text{ kHz}$ .
8. Na grafike prikazane na slici 1.6a ucrtati vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona.
9. Povećati amplitudu napona generatora na  $V_{gm} = 2 \text{ V}$ .
10. Prebaciti osciloskop u mod prikazivanja XY.
11. Na grafik prikazan na slici 1.6b ucrtati prenosnu karakteristiku invertujućeg pojačavača.

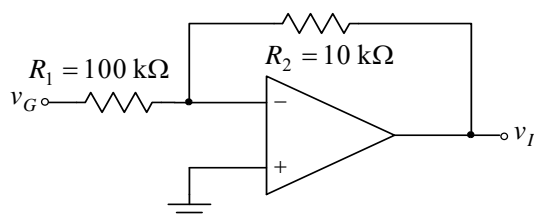


Slika 1.6a Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznog i izlaznog napona invertujućeg pojačavača



Slika 1.6b Eksperimentalno određena prenosna karakteristika invertujućeg pojačavača

## 7. MERENJE PRENOSNE KARAKTERISTIKE INVERTUJUĆEG OSLABLJIVAČA



Slika 1.7. Invertujući oslabljivač.

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 1.7. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača

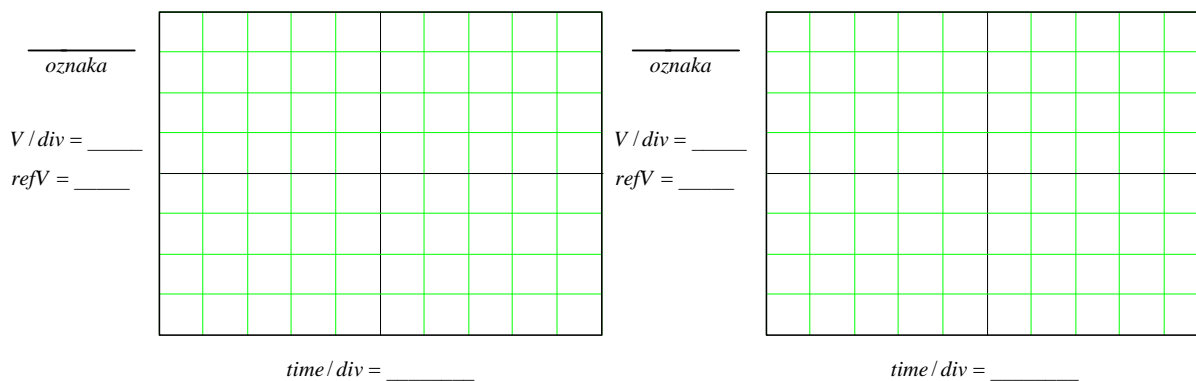
$$v_I = -\frac{R_2}{R_1} v_g.$$

Merenje prenosne karakteristike invertujućeg

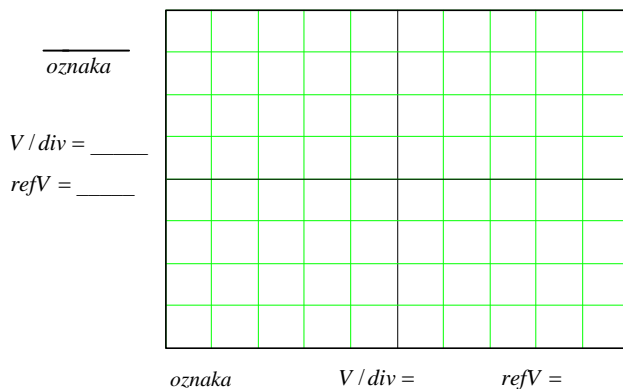
oslabljivača se obavlja merenjem izlaznog napona.

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 1.7.
2. Na izlaz kola vezati drugi kanal osciloskopa.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Na ulaz kola dovesti generator.
5. Uključiti generator.
6. Na ulaz kola vezati prvi kanal osciloskopa.
7. Podesiti generator, tako da na izlazu generiše prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 1\text{ V}$  i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ .
8. Na grafike prikazane na slici 1.7a ucrtati vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona.
9. Povećati amplitudu napona generatora na  $V_{gm} = 10\text{ V}$ .
10. Prebaciti osciloskop u mod prikazivanja XY.
11. Na grafik prikazan na slici 1.7b ucrtati prenosnu karakteristiku invertujućeg oslabljivača.



Slika 1.7a Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznog i izlaznog napona invertujućeg oslabljivača



Slika 1.7b Eksperimentalno određena prenosna karakteristika invertujućeg oslabljivača

## VEŽBA 2

PRIMENA OPERACIONIH POJAČAVAČA:  
INTEGRATOR I PRECIZNI USMERAČ**OPIS VEŽBE**

Koriste se šeme pojačavača prikazane na slikama 2.2, 2.4, 2.6, 2.7, 2.10 i 2.14 koje treba ostvariti na univerzalnoj radnoj ploči (protobord).

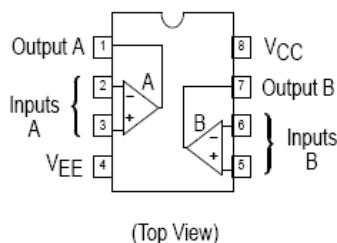
Kola se napajaju iz dve baterije za napajanje  $V_{CC} = 12\text{ V}$  i  $V_{EE} = -12\text{ V}$ , koje treba priključiti na protobord.

Na protobord se dovode i signali iz generatora signala.

Merenje jednosmernih i promenljivih napona obavlja se pomoću osciloskopa. Za snimanje prenosnih karakteristika koristi se osciloskop u modu prikazivanja XY.

**Pribor, instrumenti i materijal**

- dve baterije za napajanje od 12V
- osciloskop
- signal generator
- univerzalna radna ploča
- operacioni pojačavač MC1458
- diode 1N4148  $\times 2$
- trimmer-potenciometar 5k $\Omega$
- otpornici tolerancije 1% i snage 0,25W sledećih vrednosti: 1k $\Omega$ , 10k $\Omega \times 2$ , 1M $\Omega \times 2$  i 10M $\Omega$
- keramički kondenzator 10nF



Na slici 2.1 prikazana je šema sa rasporedom priključaka operacionih pojačavača u integrisanom kolu sa oznakom MC1458. Operacioni pojačavač ima ulazni diferencijalni pojačavač sa NPN tranzistorima. Električne karakteristike ovog operacionog pojačavača date su u prilogu na kraju priručnika.

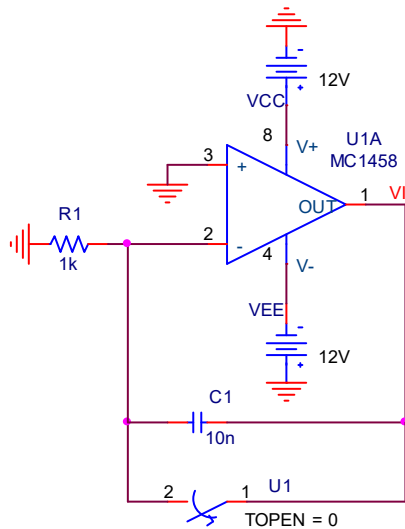
Slika 2.1. Raspored priključaka integrisanog pojačavača MC1458.

**ZADATAK****1. MERENJE NAPONSKOG OFSETA  $V_{OS}$  OPERACIONOG POJAČAVAČA POMOĆU INTEGRATORA**

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 2.2.

Pre merenja je potrebno izvesti vezu koja definiše zavisnost izlaznog napona od vremena sve dok operacioni pojačavač ne ode u zasićenje

$$v_I(t) = V_{OS} + \frac{V_{OS}}{R_1 C_1} t + \frac{I_B^-}{C_1} t.$$



Slika 2.2. Kolo za merenje naponskog ofseta pomoću integratora.

Kada je  $\frac{V_{OS}}{R_1} \gg I_B^-$ , izlazni napon je

$$v_I(t) \approx V_{OS} + \frac{V_{OS}}{R_1 C_1} t.$$

Merenje naponskog ofseta obavlja se merenjem vremena  $t_x$  za koje operacioni pojačavač ulazi u zasićenje. Međutim, zbog nepoznatog polariteta naponskog ofseta, izlaz operacionog pojačavača može biti u pozitivnom ili negativnom zasićenju. U prvom slučaju je

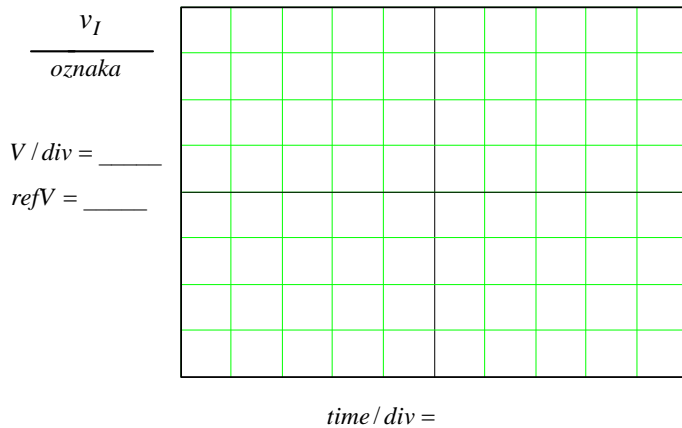
$$V_{OS} \approx v_{I\max} \frac{R_1 C_1}{t_x}, \quad v_{I\max} \gg V_{OS},$$

dok je u drugom slučaju

$$V_{OS} \approx v_{I\min} \frac{R_1 C_1}{t_x}.$$

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 2.2. Prekidač treba da je zatvoren.
2. Na izlaz kola vezati osciloskop, uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ), a zatim otvoriti prekidač.
3. Operacioni pojačavač će, zavisno od polariteta naponskog ofseta  $V_{OS}$ , otići u pozitivno ili u negativno zasićenje.
4. Potom zatvoriti prekidač, a zatim podesiti **Triger** na osciloskopu u zavisnosti da li je izlaz operacionog pojačavača bio u pozitivnom ili negativnom zasićenju.
5. Pritiskom na taster TRIG MENU otvoriti meni za sinhronizaciju (trigerovanje) osciloskopa. U ovom meniju postaviti **Type** na **Edge**, **Slope** na **Rising** (ukoliko je operacioni pojačavač bio u pozitivnom zasićenju) ili **Falling** (ukoliko je operacioni pojačavač bio u negativnom zasićenju).
6. Pritiskom na taster **SINGLE SEQ** osciloskop je spreman da sledeću pojavu napona, čiji nivo će ga trigerovali, prikaže. Potencijometrom **Level** podesiti da referentni napon za sinhronizaciju bude 6V (ukoliko je operacioni pojačavač bio u pozitivnom zasićenju) ili -6V (ukoliko je operacioni pojačavač bio u negativnom zasićenju). Početnu vrednost vremenske baze postaviti na 250 ms.



Slika 2.3. Eksperimentalno određen vremenski oblik izlaznog napona pomoću koga se određuje naponski ofset operacionog pojačavača.

7. Potom otvoriti prekidač i pričekati nekoliko sekundi dok se na osciloskopu ne pojavi dijagram punjenja (pražnjenja) kondenzatora i ulazak operacionog pojačavača u zasićenje. Ukoliko se na osciloskopu ne vidi kompletan dijagram ulaska operacionog pojačavača u zasićenje, povećati vremensku bazu i ponoviti postupak iz tačke 6. Ukoliko je potrebno koristiti i taster **RUN/STOP**.
8. Dobijeni vremenski dijagram izlaznog napona ucrtati u grafik

prikazan na slici 2.3.

- Na osnovu vremenskog dijagrama na osciloskopu izmeriti vreme za koje operacioni pojačavač odlazi u zasićenje, a zatim i vrednost naponskog ofseta ovog operacionog pojačavača (voditi računa i o znaku naponskog ofseta)

$$t_x = \text{_____}, V_{OS} = \text{_____}.$$

## 2. MERENJE ULAZNE STRUJE POLARIZACIJE $I_B^-$ OPERACIONOG POJAČAVAČA POMOĆU INTEGRATORA

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 2.4. I ovde se koristi relacija

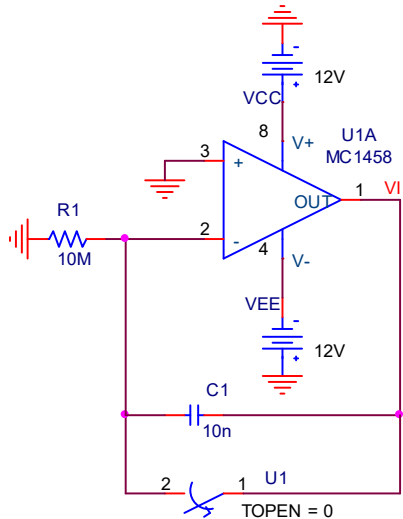
$$v_I(t) = V_{OS} + \frac{V_{OS}}{R_1 C_1} t + \frac{I_B^-}{C_1} t.$$

Međutim, za razliku od prethodnih merenja, ovde je  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ , što znači da je

$$\frac{V_{OS}}{R_1} \ll I_B^-.$$

Merenje ulazne struje polarizacije obavlja se merenjem vremena  $t_y$  za koje će operacioni pojačavač ući u pozitivno zasićenje

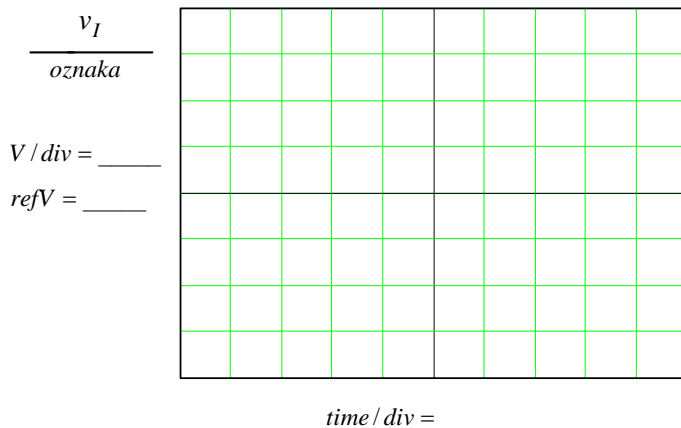
$$I_B^- = v_{I \max} \frac{C_1}{t_y}, \frac{V_{OS}}{R_1} \ll I_B^-, v_{I \max} \gg V_{OS}.$$



Slika 2.4. Kolo za merenje polarizacione struje  $I_B^-$  pomoću integratora.

### Postupak pri merenju

- Na protobordu povezati šemu prema slici 2.4. Prekidač treba da je zatvoren.
- Na izlaz kola vezati osciloskop, uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ), a zatim otvoriti prekidač.
- Po otvaranju prekidača, zbog polarizacione struje koja puni kondenzator, operacioni pojačavač će otići u pozitivno u zasićenje.
- Potom zatvoriti prekidač, a zatim podesiti **Trigger** na osciloskopu.



Slika 2.5. Eksperimentalno određen vremenski oblik izlaznog napona pomoću koga se određuje polarizaciona struja  $I_B^-$  operacionog pojačavača.

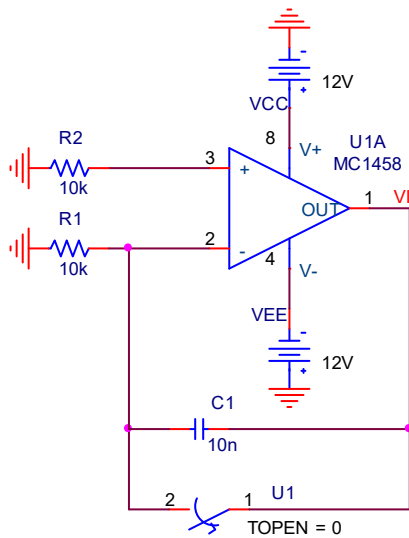
- Pritiskom na taster **TRIG MENU** otvoriti meni za sinhronizaciju (trigerovanje) osciloskopa. U ovom meniju postaviti **Type** na **Edge, Slope** na **Rising**.
- Pritiskom na taster **SINGLE SEQ** osciloskop je spreman da sledeću pojavu napona, čiji nivo će ga trigerovali, prikaže. Potenciometrom **Level** podesiti da referentni napon za sinhronizaciju bude **6V**. Početnu vrednost vremenske baze postaviti na **250 ms**.
- Potom otvoriti prekidač i pričekati nekoliko sekundi dok

se na osciloskopu ne pojavi dijagram punjenja kondenzatora i ulazak operacionog pojačavača u zasićenje. Ukoliko se na osciloskopu ne vidi kompletan dijagram ulaska operacionog pojačavača u zasićenje, povećati vremensku bazu i ponoviti postupak iz tačke 6. Ukoliko je potrebno koristiti i taster **RUN/STOP**.

8. Dobijeni vremenski dijagram izlaznog napona ucrtati u grafik prikazan na slici 2.5.
9. Na osnovu vremenskog dijagrama na osciloskopu izmeriti vreme za koje operacioni pojačavač odlazi u zasićenje, a zatim i vrednost polarizacione struje ovog operacionog pojačavača

$$t_y = \underline{\hspace{2cm}}, I_B^- = \underline{\hspace{2cm}}.$$

### 3. KOMPENZACIJA UTICAJA POLARIZACIONE STRUJE $I_B^-$ SA $I_B^+$ I MERENJE STRUJNOG OFSETA POMOĆU INTEGRATORA



Slika 2.6. Kolo za kompenzaciju uticaja polarizacione struje  $I_B^-$  na rad integratora.

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 2.6. Potrebno je izvesti relaciju koja daje zavisnost izlaznog napona u funkciji strujnog i naponskog ofseta pre ulaska pojačavača u zasićenje

$$v_I(t) = V_{OS} + \frac{V_{OS}}{R_1 C_1} t - \frac{I_{OS}}{C_1} t, \quad R_1 = R_2, \quad I_{OS} = I_B^+ - I_B^-.$$

Pošto je  $\frac{V_{OS}}{R_1} > I_{OS}$ , izlaz operacionog pojačavača će otići u pozitivno ili negativno zasićenje u zavisnosti od znaka naponskog ofseta, dakle, u isto stanje kao u kolu sa slike 2.2.

Na osnovu vrednosti naponskog ofseta iz prvog dela ove vežbe, vodeći računa i o znaku, merenjem vremena  $t_z$  za koje operacioni pojačavač ode u zasićenje, dobija se

$$v_{I\max} \approx \frac{t_z}{C_1} \left( \frac{V_{OS}}{R_1} - I_{OS} \right) \Rightarrow I_{OS} \approx \frac{V_{OS}}{R_1} - \frac{C_1}{t_z} v_{I\max}$$

$$\text{ili } I_{OS} \approx \frac{V_{OS}}{R_1} - \frac{C_1}{t_z} v_{I\min}.$$

#### Postupak pri merenju

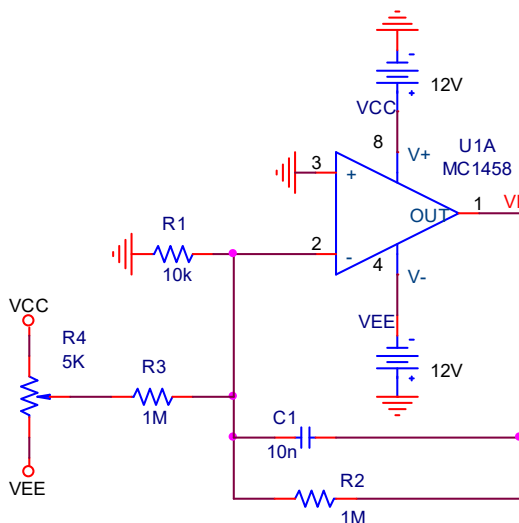
Procedura određivanja vremena  $t_z$  i strujnog ofseta ista je kao u prvom delu vežbe (određivanje naponskog ofseta operacionog pojačavača).

Merenjem je ustanovljeno da je

$$t_z = \underline{\hspace{2cm}} \Rightarrow I_{OS} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

### 4. KOMPENZACIJA UTICAJA POLARIZACIONIH STRUJA I NAPONSKOG OFSETA U KOLU INTEGRATORA

Kompenzacija se obavlja pomoću potencijometra R4, slika 2.7. Potencijetrom se podešava nulta vrednost izlaznog napona.

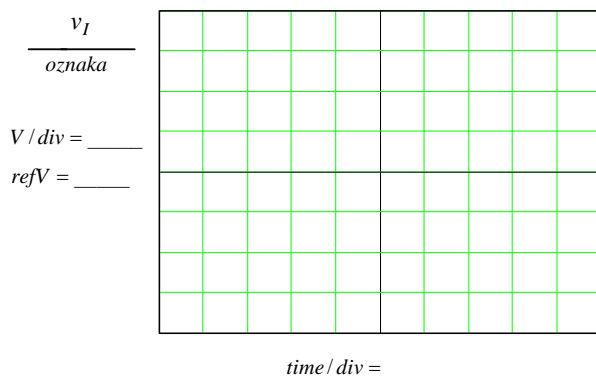


Slika 2.7. Integrator sa kolom za kompenzaciju razdešenosti.

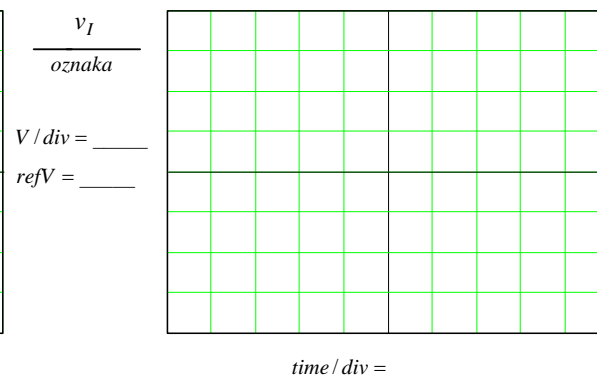


### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 2.7.
2. Na izlaz kola vezati osciloskop.
3. Potencijetrom R4 podesiti da je izlazni napon nula.
4. Potom između ulaza i mase iz signal generatora dovesti povorku bipolarnih simetričnih pravougaonih impulsa amplitude 1V, srednje vrednosti nula i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ .
5. Na grafik sa slike 2.8 ucrtati i dobijeni vremenski dijagram i dijagram ulaznog napona.
6. Ponoviti tačku 4 ako je ulazni napon prostoperiodičan sa nepromenjenom amplitudom i učestanošću.
7. Na grafik sa slike 2.9 ucrtati vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona u ovom slučaju.



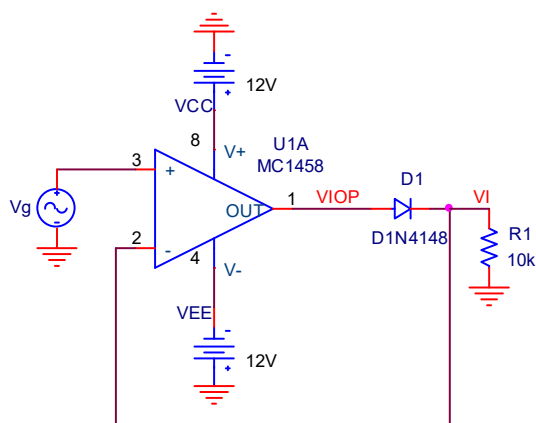
Slika 2.8. Vremenski dijagrami napona na izlazu i ulazu integratora pri simetričnim pravougaonim pobudnim impulsima.



Slika 2.9. Vremenski dijagrami napona na izlazu i ulazu integratora pri prostoperiodičnoj pobudi.

## 5. PRECIZNI USMERAČI

### 5.1. PRECIZNI USMERAČ SA JEDNOM DIODOM



Slika 2.10. Precizni usmerač sa jednom diodom.

Na slici 2.10 je prikazano kolo preciznog usmerača sa jednom diodom. Izlazni napon je

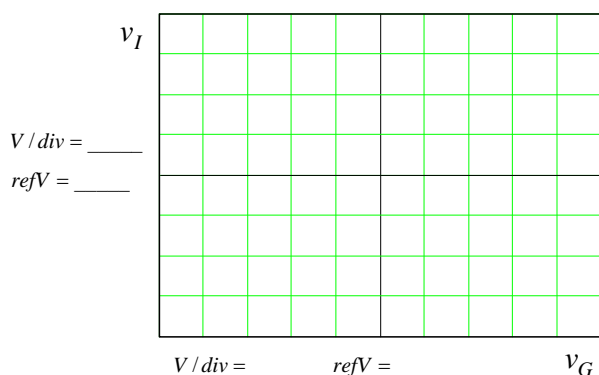
$$v_I = \begin{cases} v_G, & v_G \geq 0 \\ 0, & v_G \leq 0 \end{cases}$$

### Postupak pri merenju

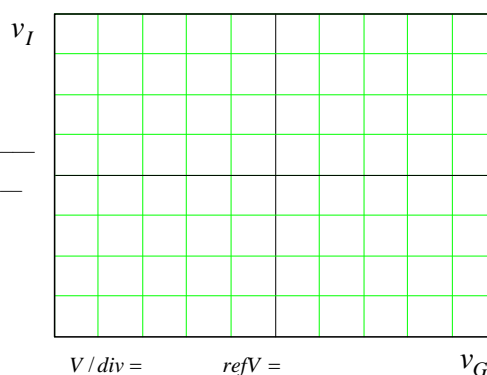
1. Na protobordu povezati šemu prema slici 2.10.
2. Na izlaz kola vezati drugi kanal osciloskopa, a na ulaz prvi.
3. Osciloskop podesiti za XY merenja. Pritiskom na taster **DISPLAY** otvoriće se meni u kome sa **FORMAT** treba podesiti XY merenja.
4. Na ulaz kola dovesti prostoperiodični napon

$$v_G = V_m \sin(2\pi ft), V_m = 10\text{ V}, f = 100\text{ Hz},$$

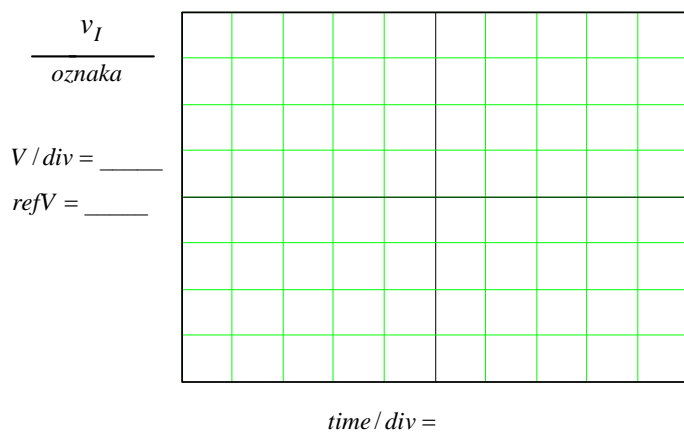
a zatim na grafik sa slike 2.11 ucrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$ .



**Slika 2.11. Eksperimentalno određena zavisnost  $v_I = f(v_G)$  preciznog usmerača sa jednom diodom.**



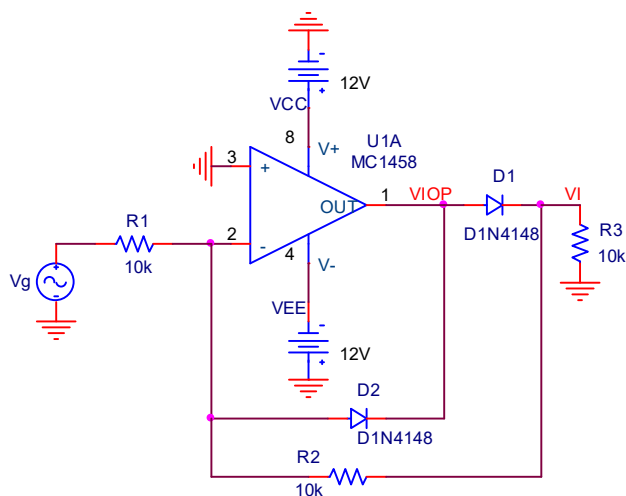
**Slika 2.12. Eksperimentalno određena zavisnost  $v_{IOP} = g(v_G)$  preciznog usmerača sa jednom diodom.**



**Slika 2.13. Eksperimentalno određen izlazni napon  $v_I(t)$  preciznog usmerača sa jednom diodom.**

- Drugi kanal osciloskopa postaviti na izlaz operacionog pojačavača i snimiti zavisnost  $v_{IOP} = g(v_G)$ . Dobijeni dijagram ucrtati na sliku 2.12.
- Na ulaz kola dovesti prostoperiodični napon  $v_G = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $V_m = 1\text{ V}$ ,  $f = 5\text{ kHz}$ , a zatim na grafik sa slike 2.13 ucrtati vremenski oblik izlaznog napona  $v_I(t)$ .

## 5.2. PRECIZNI USMERAČ SA DVE DIODE



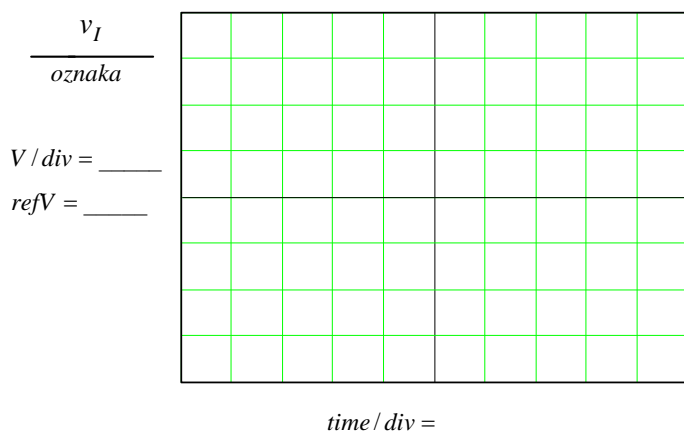
**Slika 2.14. Precizni usmerač sa dve diode.**

Na slici 2.14 je prikazano kolo preciznog usmerača sa dve diode. Izlazni napon je

$$v_I = \begin{cases} 0, & v_G \geq 0 \\ -v_G, & v_G \leq 0 \end{cases}$$

### Postupak pri merenju

- Na protobordu povezati šemu prema slici 2.14.
- Na ulaz kola dovesti prostoperiodični napon  $v_G = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $V_m = 1\text{ V}$ ,  $f = 5\text{ kHz}$ , a zatim na grafik sa slike 2.15 ucrtati vremenski oblik izlaznog napona  $v_I(t)$ .



Slika 2.15. Eksperimentalno određen izlazni napon  $v_I(t)$  preciznog usmerača sa dve diode.

3. Objasniti razliku vremenskih dijagrama sa slika 2.13 i 2.15.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## VEŽBA 3

## PRIMENA OPERACIONIH POJAČAVAČA: SABIRAČ, DIFERENCIJALNI I INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČ

OPIS VEŽBE

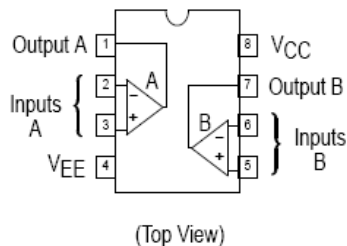
Koriste se šeme pojačavača prikazane na slikama 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 i 3.5 koje treba ostvariti na protobordu. Kolo se napaja iz dve baterije za napajanje  $V_{CC} = 12\text{ V}$  i  $V_{EE} = -12\text{ V}$ , koje treba priključiti na protobord.

Pri snimanju prenosnih karakteristika i izlaznog napona, na ulaz pojačavača se dovodi prostoperiodični napon iz signal generatora, koga takođe treba priključiti na protobord.

Merenje jednosmernih i promenljivih napona obavlja se pomoću osciloskopa. Za snimanje prenosnih karakteristika koristi se osciloskop u modu prikazivanja XY.

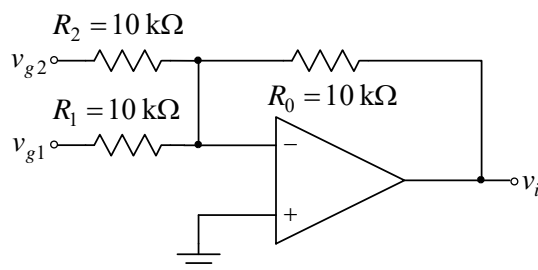
**Pribor, instrumenti i materijal**

- dva izvora za napajanje 12V
- osciloskop
- signal generator
- univerzalna radna ploča
- operacioni pojačavač MC 1458
- otpornici tolerancije 1% i snage 0,25 W sledećih vrednosti: 1 k $\Omega$ , 6x10 k $\Omega$ , 3x100 k $\Omega$ .

**PIN CONNECTIONS**

Na slici 3.0 prikazana je šema sa rasporedom priključaka operacionih pojačavača u integrisanom kolu sa oznakom MC 1458. Na kraju priručnika date su karakteristike ovih operacionih pojačavača.

Slika 3.0 Raspored priključaka integrisanog kola MC 1458

**ZADATAK****1. SABIRAČ**

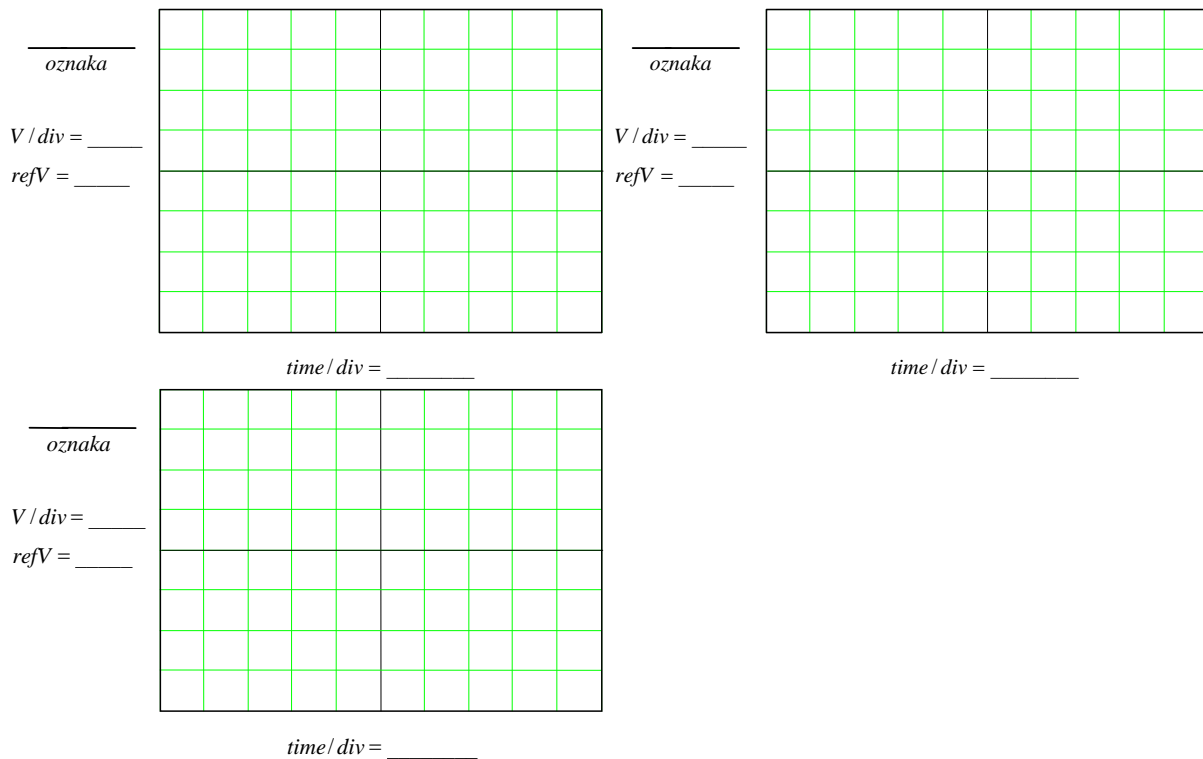
Slika 3.1. Sabirač.

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 3.1. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača:

$$v_i = -\frac{R_0}{R_1} v_{g1} - \frac{R_0}{R_2} v_{g2}.$$

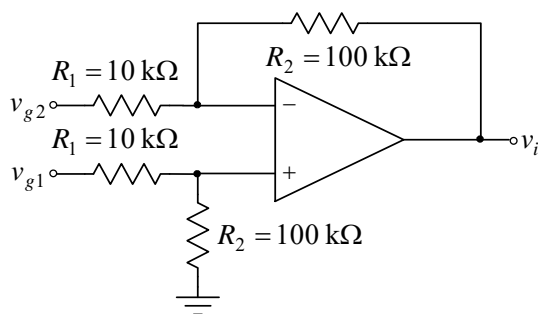
### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 3.1.
2. Na izlaz kola vezati osciloskop.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Na ulaz kola  $v_{g1}$  dovesti generator.
5. Uključiti generator.
6. Podesiti generator, tako da na njegovom izlazu generiše prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 5\text{ V}$  i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ .
7. Na ulaz kola  $v_{g2}$  dovesti jednosmerni napon od  $5\text{ V}$ .
8. Na grafike prikazane na slici 3.1a ucrtati vremenske dijagrame ulaznih i izlaznog napona.



Slika 3.1a. Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznih i izlaznog napona sabirača.

## 2. DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ



Slika 3.2. Diferencijalni pojačavač.

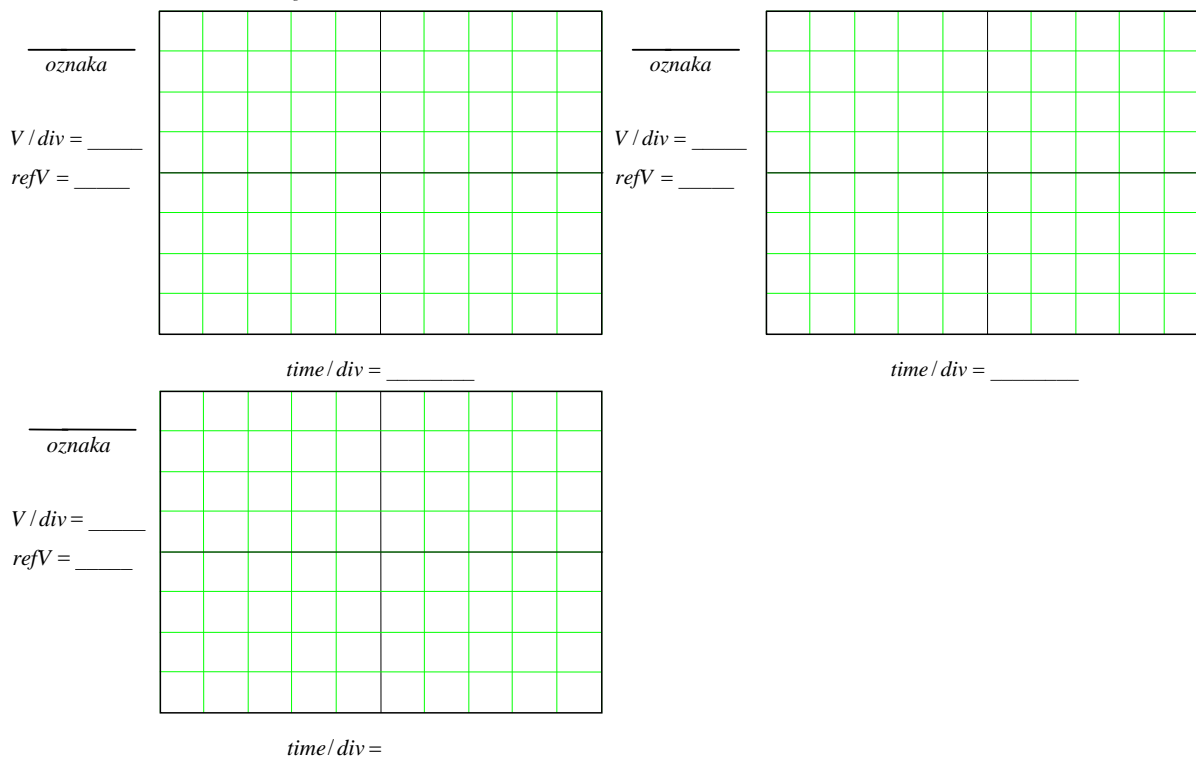
Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 3.2. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača:

$$v_i = -\frac{R_2}{R_1}(v_{g1} - v_{g2}).$$

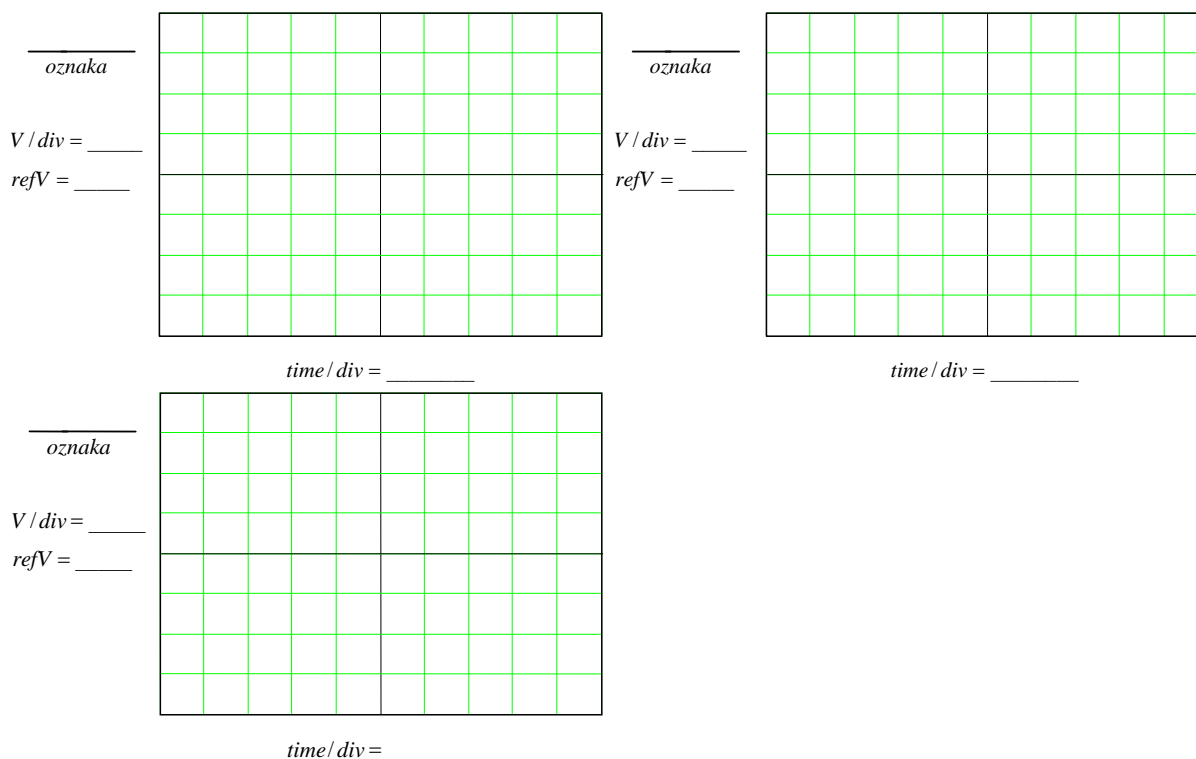
### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 3.2.
2. Na izlaz kola vezati osciloskop.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).

4. Na ulaz kola  $v_{g1}$  dovesti generator.
5. Uključiti generator.
6. Podesiti generator, tako da na njegovom izlazu generiše prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 0.4 \text{ V}$  i učestanosti  $f = 1 \text{ kHz}$ .
7. Na ulaz kola  $v_{g2}$  dovesti jednosmerni napon od  $0.4 \text{ V}$ .

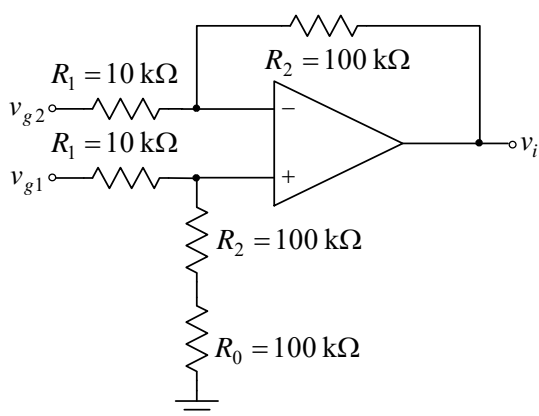


Slika 3.2a. Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznih i izlaznog napona diferencijalnog pojačavača.



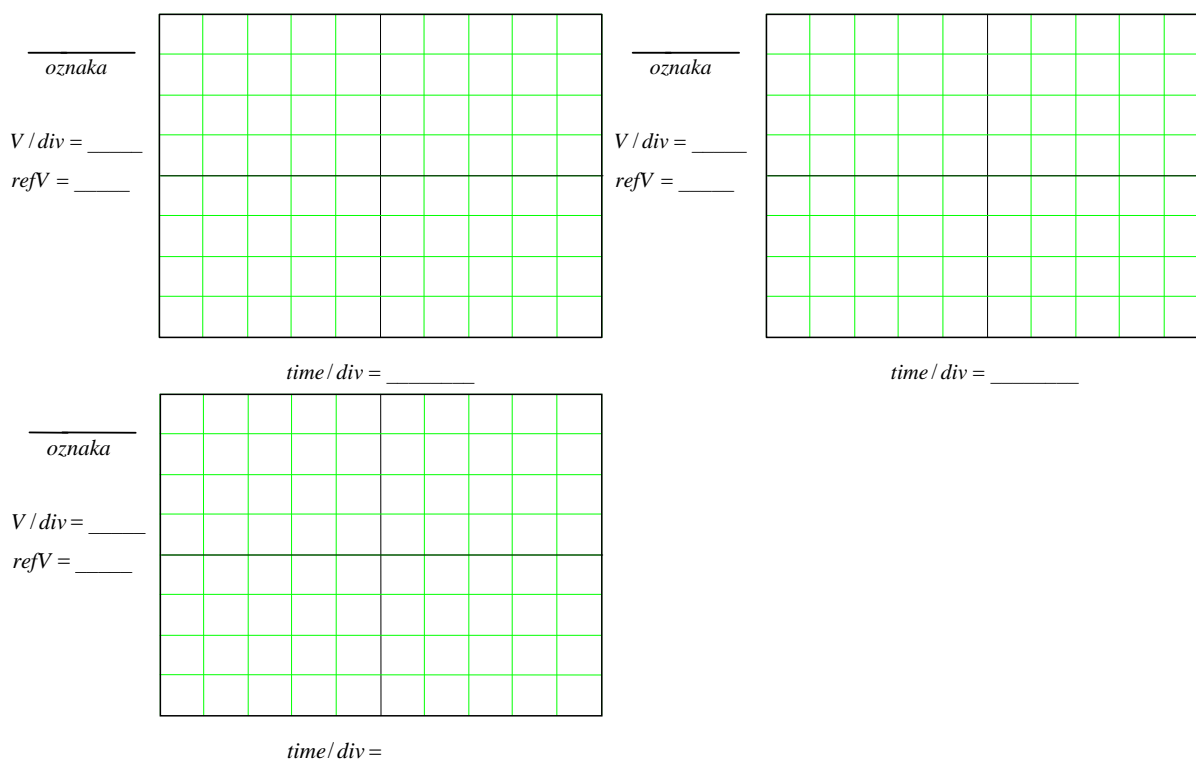
Slika 3.2b. Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznih i izlaznog napona diferencijalnog pojačavača.

8. Na grafike prikazane na slici 3.2a ucrtati vremenske dijagrame ulaznih i izlaznog napona.
9. Na ulaz kola  $v_{g2}$  dovesti takođe dovesti generator, umesto jednosmernog napona.



Slika 3.3. Modifikovani diferencijalni pojačavač.

10. Na grafike prikazane na slici 3.2b ucrtati vremenske dijagrame ulaznih i izlaznog napona.
11. Isključiti generator.
12. Isključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
13. Na protobordu modifikovati šemu dodavanjem otpornika  $R_0$  na red sa otpornikom  $R_2$ , kao što je to prikazano na slici 3.3.
14. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
15. Uključiti generator.
16. Na grafike prikazane na slici 3.3a ucrtati vremenske dijagrame ulaznih i izlaznog napona.



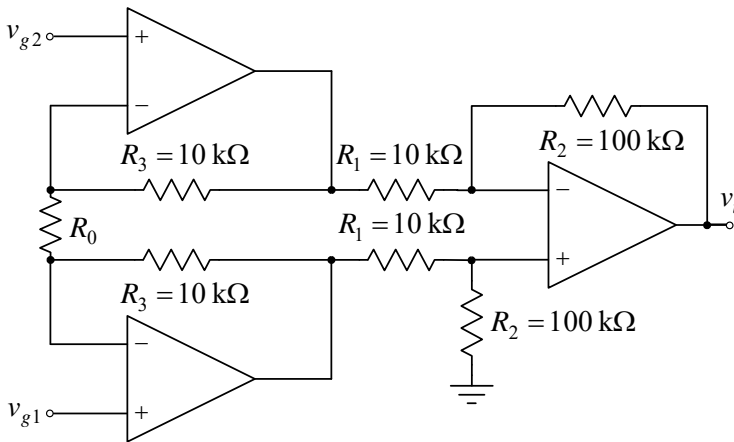
Slika 3.3a. Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznih i izlaznog napona diferencijalnog pojačavača.

### 3. INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČ

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 3.4. Pre merenja je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača:

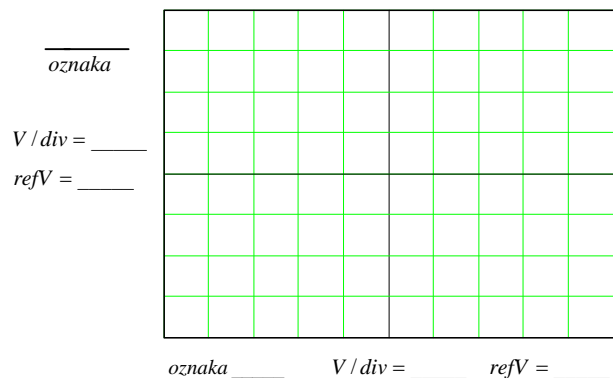
$$v_i = -\frac{R_2}{R_1} \left( 1 + 2 \frac{R_3}{R_0} \right) (v_{g1} - v_{g2}).$$

Merenje prenosne karakteristike instrumentacionog pojačavača se obavlja merenjem izlaznog napona.

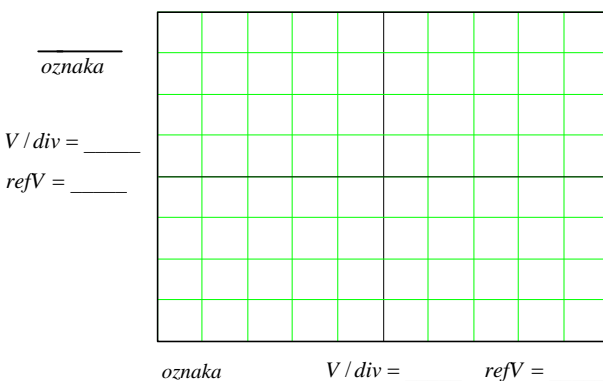


Slika 3.4. Instrumentacioni pojačavač.

7. Na ulaz kola  $v_{g1}$  vezati prvi kanal osciloskopa.
8. Podesiti generator, tako da na njegovom ulazu generiše prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 1.5V$  i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ .
9. Prebaciti osciloskop u mod prikazivanja XY.
10. Na grafik prikazan na slici 3.4a ucrtati prenosnu karakteristiku instrumentacionog pojačavača.



Slika 3.4a. Eksperimentalno određena prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača.



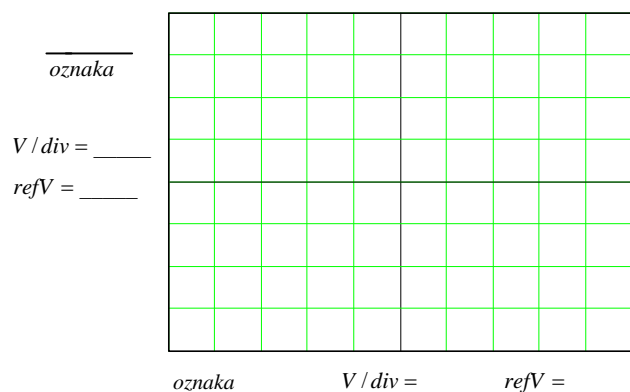
Slika 3.4b. Eksperimentalno određena prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača.

11. Isključiti generator.
12. Isključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
13. Na protobordu podesiti  $R_0 = 1\text{ k}\Omega$ .
14. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
15. Uključiti generator.
16. Podesiti generator, tako da na njegovom izlazu generiše prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 80\text{ mV}$  i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ .
17. Na grafik prikazan na slici 3.4b ucrtati prenosnu karakteristiku instrumentacionog pojačavača.
18. Isključiti generator.
19. Isključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
20. Na protobordu podesiti  $R_0 = 10\text{ k}\Omega$ .
21. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
22. Uključiti generator.
23. Podesiti generator, tako da na njegovom izlazu generiše prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 0.8V$  i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ .
24. Na grafik prikazan na slici 3.4c ucrtati prenosnu karakteristiku instrumentacionog

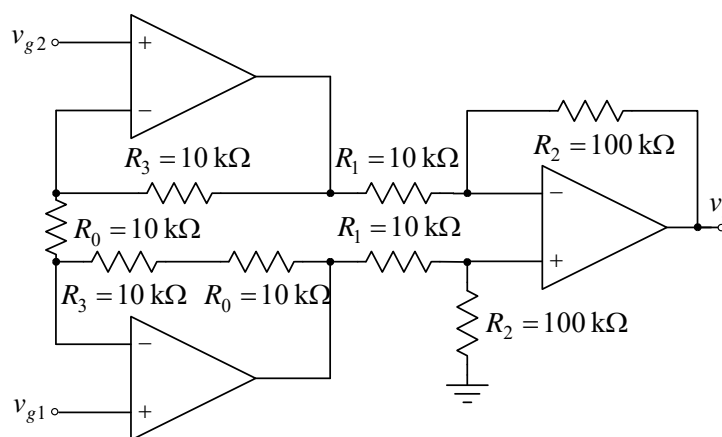
### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 3.4, tako da je  $R_0 \rightarrow \infty$ .
2. Na izlaz kola vezati drugi kanal osciloskopa.
3. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
4. Na ulaz kola  $v_{g1}$  dovesti generator.
5. Ulaz kola  $v_{g2}$  spojiti na masu.
6. Uključiti generator.

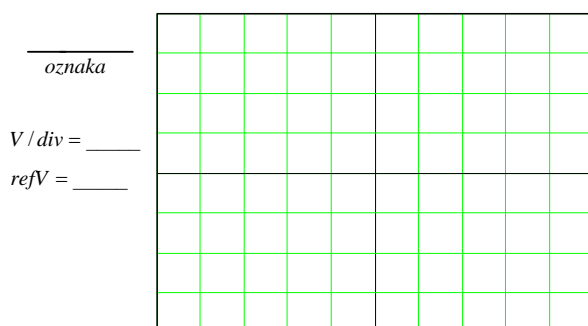




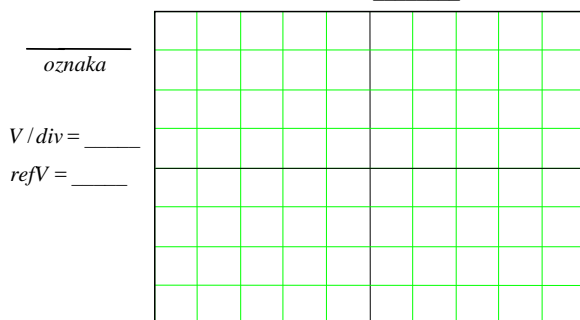
Slika 3.4c. Eksperimentalno određena prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača.



Slika 3.5. Modifikovani instrumentacioni pojačavač.

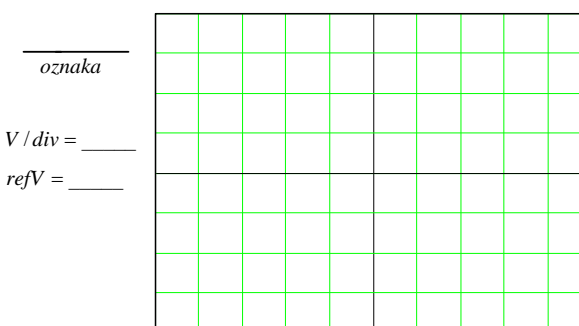


$\text{time} / \text{div} = \underline{\hspace{2cm}}$



$\text{time} / \text{div} = \underline{\hspace{2cm}}$

- pojačavača.
25. Isključiti generator.
  26. Isključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
  27. Na protobordu modifikovati šemu dodavanjem otpornika  $R_0$  na red sa otpornikom  $R_3$ , kao što je to prikazano na slici 3.5.
  28. Ulaz kola  $v_{g2}$  povezati na generator, umesto dotadašnje veze na masu.
  29. Uključiti izvore za napajanje ( $V_{CC}$  i  $V_{EE}$ ).
  30. Uključiti generator.
  31. Podesiti generator, tako da na njegovom izlazu generiše prostoperiodični napon amplitude  $V_{gm} = 5 \text{ V}$  i učestanosti  $f = 1 \text{ kHz}$ .
  32. Osciloskop prebaciti u standardan mod prikazivanja.
  33. Na grafike prikazane na slici 3.5a ucrtati vremenske dijagrame ulaznih i izlaznog napona.



$\text{time} / \text{div} = \underline{\hspace{2cm}}$

Slika 3.5a. Eksperimentalno određeni vremenski oblici ulaznih i izlaznog napona instrumentacionog pojačavača.

## VEŽBA 4

## FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE POJAČAVAČA

## OPIS VEŽBE

Koriste se šeme pojačavača prikazane na slikama 4.2, 4.3, 4.4, 4.7 i 4.8 koje treba ostvariti na protobordu.

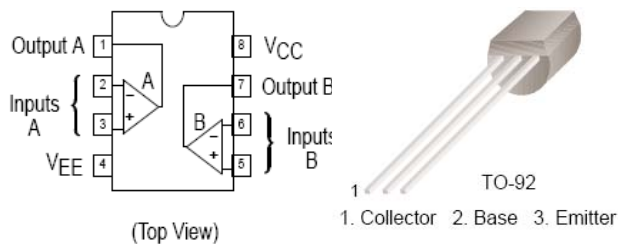
Kola se napajaju iz dve baterije za napajanje  $V_{CC} = 12\text{ V}$  i  $V_{EE} = -12\text{ V}$ , koje treba priključiti na protobord.

Na protobord se dovode i signali iz generatora signala.

Merenje jednosmernih i promenljivih napona obavlja se pomoću osciloskopa.

## Pribor, instrumenti i materijal

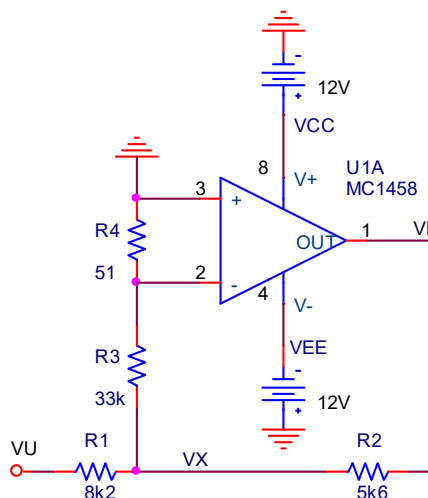
- dve baterije za napajanje od 12V
- osciloskop
- signal generator
- univerzalna radna ploča
- operacioni pojačavač MC1458
- Bipolarni tranzistor BC337×2
- otpornici tolerancije 1% i snage 0,25 W sledećih vrednosti:  $51\Omega$ ,  $100\Omega$ ,  $1\text{k}\Omega \times 2$ ,  $5,6\text{k}\Omega \times 2$ ,  $10\text{k}\Omega \times 2$ ,  $8,2\text{k}\Omega$  i  $33\text{k}\Omega$
- elektrolitski kondenzatori  $10\mu\text{F}/16\text{V}$  i  $100\mu\text{F}/16\text{V}$



Slika 4.1. Raspored priključaka integrisanog pojačavača MC1458 i bipolarnog tranzistora BC337.

Na slici 4.1 je prikazana šema sa rasporedom priključaka operacionih pojačavača u integrisanom kolu sa oznakom MC1458. Operacioni pojačavač ima ulazni diferencijalni pojačavač sa NPN tranzistorima. Na istoj slici prikazan je i raspored priključaka bipolarnog tranzistora BC337. Električne karakteristike ovih komponenti date su u prilogu na kraju priručnika.

## ZADATAK



Slika 4.2. kolo za merenje DC pojačanja operacionog pojačavača.

## 1. MERENJE DC NAPONSKOG POJAČANJA OPERACIONOG POJAČAVAČA

Merenje se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 4.2. Merenjem napona  $V_I$  i  $V_X$  na niskim učestanostima za dve različite pobude (radi eliminisanja uticaja razdešenosti pojačavača) dobija se da je naponsko pojačanje operacionog pojačavača na niskim učestanostima ( $\omega \rightarrow 0$ )

$$A_0 = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \left| \frac{\Delta V_I}{\Delta V_X} \right| = 648,06 \left| \frac{\Delta V_I}{\Delta V_X} \right|.$$

## Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 4.2.
2. Ulaz kola kratko spojiti sa pozitivnom baterijom za napajanje  $V_U = V_{CC} = 12\text{ V}$ .

3. Osciloskopom podešenim za DC merenja izmeriti napone  $V_X$  i  $V_I$  (Pritiskom na taster **MEASURE** dobija se meni u kome treba podesiti **SOURCE** na merni kanal osciloskopa **CH1** ili **CH2** i **TYPE** na **MEAN**)

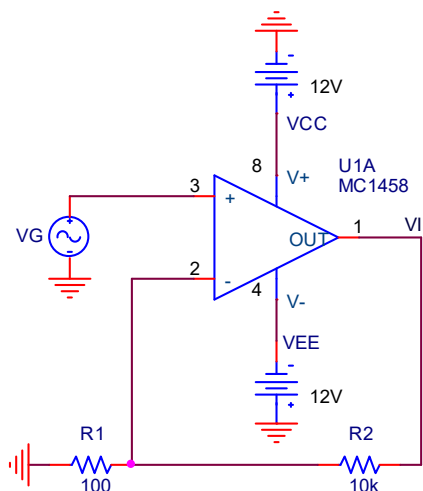
$$V_{X1} = \underline{\hspace{2cm}}, V_{I1} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

4. Ulaz kola kratko spojiti sa negativnom baterijom za napajanje  $V_U = V_{EE} = -12\text{ V}$  i ponoviti tačku 3

$$V_{X2} = \underline{\hspace{2cm}}, V_{I2} = \underline{\hspace{2cm}} \Rightarrow \Delta V_X = V_{X2} - V_{X1} = \underline{\hspace{2cm}},$$

$$\Delta V_I = V_{I2} - V_{I1} = \underline{\hspace{2cm}} \Rightarrow A_0 = 648,06 \left| \frac{\Delta V_I}{\Delta V_X} \right| = \underline{\hspace{2cm}}.$$

## 2. MERENJE PROPUSNOG OPSEGA OPERACIONOG POJAČAVAČA B I UČESTANOSTI JEDINIČNOG POJAČANJA $f_T$



Slika 4.3. Kolo za merenje propusnog opsega i učestanosti jediničnog pojačanja.

Na slici 4.3 je prikazana šema kola koje se koristi pri ovom merenju. Funkcija prenosa operacionog pojačavača sve do učestanosti jediničnog pojačanja može se dobro aproksimirati jednopolnom funkcijom prenosa

$$A_{op}(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_p}.$$

Funkcija prenosa pojačavača sa slike 4.3 je

$$A(s) = \frac{V_i(s)}{V_g(s)} = \frac{A_{op}(s)}{1 + \beta A_{op}(s)}, \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{101} \Rightarrow$$

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} \frac{1}{1 + s/\omega_{p1}}, \quad \omega_{p1} = \omega_p (1 + \beta A_0).$$

Pošto je funkcija prenosa jednopolna, gornja granična učestanost jednaka je učestanosti pola

$$f_H = B = f_{p1} = f_p (1 + \beta A_0), \quad f = \omega/2\pi.$$

Proizvod pojačanja u propusnom opsegu i propusnog opsega predstavlja učestanost jediničnog pojačanja

$$f_T = A_{v0} B = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} f_p (1 + \beta A_0) = A_0 f_p.$$

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 4.3.
2. Na ulaz kola dovesti prostoperiodični napon  $v_g = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $V_m = 10\text{ mV}$ ,  $f = 1\text{ kHz}$ .
3. Na osciloskopu postaviti merenje amplitude izlaznog napona  $V_{imp-p}$ . Pritiskom na taster **MEASURE** dobija se meni u kome treba podesiti **SOURCE** na merni kanal osciloskopa **CH1** ili **CH2** i **TYPE** na **PK-PK**.
4. Osciloskopom podešenim za AC merenja izmeriti amplitudu izlaznog napona

$$V_{im} = \underline{\hspace{2cm}} \Rightarrow A_{v0} = \frac{V_{im}}{V_m} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

5. Ne menjajući amplitudu ulaznog napona povećavati učestanost pobudnog generatora u koracima od po 100 Hz i posmatrati amplitudu izlaznog napona. Učestanost pobudnog napona povećavati sve dok se na osciloskopu ne pojavi vrednost amplitude izlaznog

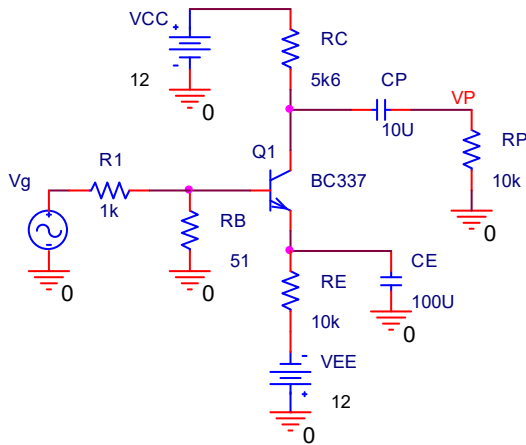
napona  $\frac{V_{imp-p}(1\text{kHz})}{\sqrt{2}} \approx \frac{2\text{V}}{\sqrt{2}} = 1,41\text{V}$ . Zabeležiti vrednost ove učestanosti

$$f_H = B = \underline{\hspace{2cm}} \Rightarrow f_T = A_{v0}B = \underline{\hspace{2cm}}.$$

6. Na osnovu izmerenih vrednosti DC pojačanja operacionog pojačavača  $A_0$  i učestanosti  $f_T$  izračunati učestanost pola

$$f_P = f_T / A_0 = \underline{\hspace{2cm}}.$$

### 3. MERENJE PROPUSNOG OPSEGA POJAČAVAČA SA ZAJEDNIČKIM EMITOROM



Slika 4.4. Pojačavač sa zajedničkim emitorom.

Na slici 4.4 je prikazana šema kola koje se koristi pri ovom merenju. Na niskim učestanostima funkcija prenosa ovog pojačavača je

$$A_L(s) = \frac{V_p(s)}{V_g(s)} = A_{po} \frac{s(s + \omega_{ZE})}{(s + \omega_{PE})(s + \omega_{PP})},$$

$$A_{po} \approx -\frac{R_B}{R_B + R_1} g_m (R_C \parallel R_P), \quad \omega_{PP} = \frac{1}{C_P (R_C + R_P)},$$

$$\omega_{ZE} = \frac{1}{C_E R_E}, \quad \omega_{PE} = \frac{1}{C_E \left( R_E \parallel \frac{1}{g_m} \right)}, \quad r_\pi \gg R_B.$$

Na slici 4.5 je prikazan model bipolarnog tranzistora na visokim učestanostima. Učestanost na kojoj koeficijent strujnog pojačanja  $\beta(jf)$  postaje jedan je

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu}.$$

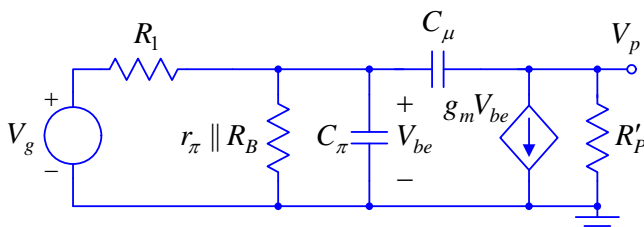
Na visokim učestanostima dominantan uticaj na funkciju prenosa imaju kondenzatori  $C_\pi$  i  $C_\mu$ . Zanemarujući uticaj otpornosti tela baze  $r_b$ , slika 4.6, naponsko pojačanje ovog pojačavača je

$$A_H(s) = \frac{V_p(s)}{V_g(s)} = A_{po} \frac{1 - sC_\mu / g_m}{D(s)},$$

$$D(s) = \left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right) = 1 + s \left( \frac{1}{\omega_{P1}} + \frac{1}{\omega_{P2}} \right) + \frac{s^2}{\omega_{P1}\omega_{P2}}.$$

Obično su učestanosti polova dosta razmaknute, npr.  $\omega_{P2} \gg \omega_{P1}$ , tako da je

$$D(s) \approx 1 + \frac{s}{\omega_{P1}} + \frac{s^2}{\omega_{P1}\omega_{P2}}.$$



Slika 4.6. Šema za male signale pojačavača sa zajedničkim emitorom na visokim učestanostima.

Funkcija prenosa u ovom slučaju je

$$A_H(s) \approx A_{po} \frac{1 - sC_\mu / g_m}{(1 + s / \omega_{P1})(1 + s / \omega_{P2})},$$

$$\omega_{P1} \approx \frac{1}{R'_B (C_\pi + C_\mu (1 + g_m R'_P))},$$

$$R'_B = R_B \parallel r_\pi \parallel R_1, \quad R'_P = R_C \parallel r_{ce} \parallel R_P,$$

$$\omega_{P2} \approx \frac{1}{\omega_{P1}} \frac{1}{C_{\mu} C_{\pi} R'_B R'_P} \gg \omega_{P1}.$$

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 4.4.
2. Na ulaz kola dovesti prostoperiodični napon  $v_g = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $f = 1\text{kHz}$ .
3. Na osciloskopu postaviti merenje amplitude izlaznog napona  $V_{pmp-p}$ . Pritiskom na taster **MEASURE** dobija se meni u kome treba podesiti **SOURCE** na merni kanal osciloskopa **CH1** ili **CH2** i **TYPE** na **PK-PK**.
4. Osciloskop podesiti za AC merenja, a zatim podešavati vrednost amplitude ulaznog napona dok se na potrošaču  $R_P$  ne dobije amplituda  $V_{pmp-p} = 2\text{V}$ .
5. Na osnovu odnosa amplituda napona na potrošaču i ulaznog napona odrediti pojačanje u propusnom opsegu

$$A_{po} = \frac{V_{pmp-p}}{V_{mp-p}} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

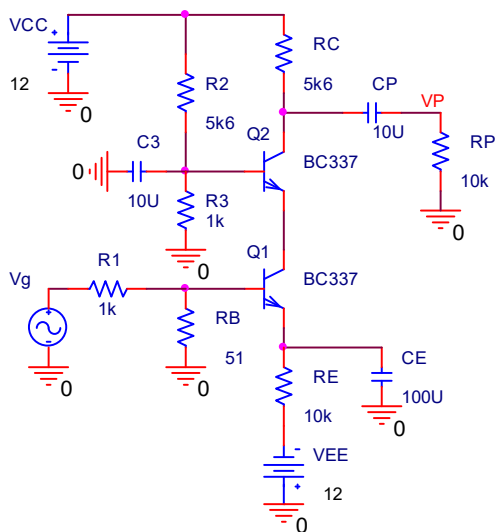
6. Potom ne menjajući amplitudu ulaznog napona smanjivati frekvenciju pobudnog generatora sve dok amplituda napona na potrošaču ne opadne na vrednost  $\frac{V_{pmp-p}(1\text{kHz})}{\sqrt{2}} \approx \frac{2\text{V}}{\sqrt{2}} = 1,41\text{V}$ . Učestanosti pri kojoj se ovo dešava je donja granična učestanost pojačavača

$$f_L = \underline{\hspace{2cm}}.$$

7. Ne menjajući amplitudu ulaznog napona povećavati učestanost pobudnog generatora i posmatrati amplitudu izlaznog napona. Kako se približavamo gornjoj graničnoj učestanosti, učestanost pobudnog generatora treba povećavati u sve manjim koracima. Učestanost pobudnog napona povećavati sve dok se na osciloskopu ne pojavi vrednost amplitude izlaznog napona  $\frac{V_{pmp-p}(1\text{kHz})}{\sqrt{2}} \approx \frac{2\text{V}}{\sqrt{2}} = 1,41\text{V}$ . Gornja granična učestanost i propusni opseg pojačavača su

$$f_H = \underline{\hspace{2cm}} \text{ i } B = f_H - f_L = \underline{\hspace{2cm}}.$$

## 4. MERENJE PROPUSNOG OPSEGA KASKODNOG POJAČAVAČA



Na slici 4.7 je prikazana šema kola koje se koristi pri ovom merenju. U odnosu na stepen sa zajedničim emitorom iz prethodne tačke, na niskim učestanostima funkcija prenosa pojačavača praktično se ne menja

$$A_L(s) = \frac{V_p(s)}{V_g(s)} = A_{po} \frac{s(s + \omega_{ZE})}{(s + \omega_{PE})(s + \omega_{PP})},$$

$$A_{po} \approx -\frac{R_B}{R_B + R_1} g_m (R_C \parallel R_P), \quad \omega_{PP} = \frac{1}{C_P (R_C + R_P)},$$

$$\omega_{ZE} = \frac{1}{C_E R_E}, \quad \omega_{PE} = \frac{1}{C_E \left( R_E \parallel \frac{1}{g_m} \right)}, \quad r_{\pi} \gg R_B.$$

U okolini propusnog opsega na visokim učestanostima funkcija prenosa može se aproksimirati

Slika 4.7. Kaskodni pojačavač.

jednopolnom funkcijom prenosa

$$A_H(s) = \frac{A_{po}}{1 + s/\omega_{PM}}.$$

Učestanost pola  $\omega_{PM}$  određena je preslikanom Milerovom kapacitivnošću  $C_{\mu 1}$  u kolo baze ulaznog tranzistora

$$\omega_{PM} \approx \frac{1}{(C_{\pi 1} + 2C_{\mu 1})R'_B}, \quad R'_B = R_B \parallel R_1.$$

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 4.7.
2. Na ulaz kola dovesti prostoperiodični napon  $v_g = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ .
3. Na osciloskopu postaviti merenje amplitude izlaznog napona  $V_{pmp-p}$ . Pritiskom na taster **MEASURE** dobija se meni u kome treba podesiti **SOURCE** na merni kanal osciloskopa **CH1** ili **CH2** i **TYPE** na **PK-PK**.
4. Osciloskop podesiti za AC merenja, a zatim podešavati vrednost amplitude ulaznog napona dok se na potrošaču  $R_p$  ne dobije amplituda  $V_{pmp-p} = 2 \text{ V}$ .
5. Na osnovu odnosa amplituda napona na potrošaču i ulaznog napona odrediti pojačanje u propusnom opsegu

$$A_{po} = \frac{V_{pmp-p}}{V_{mp-p}} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

6. Potom, ne menjajući amplitudu ulaznog napona, smanjivati frekvenciju pobudnog generatora sve dok amplituda napona na potrošaču ne opadne na vrednost  $\frac{V_{pmp-p}(1 \text{ kHz})}{\sqrt{2}} \approx \frac{2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 1,41 \text{ V}$ . Učestanosti pri kojoj se ovo dešava je donja granična učestanost pojačavača

$$f_L = \underline{\hspace{2cm}}.$$

7. Ne menjajući amplitudu ulaznog napona povećavati učestanost pobudnog generatora i posmatrati amplitudu izlaznog napona. Kako se približavamo gornjoj graničnoj učestanosti, učestanost pobudnog generatora treba povećavati u sve manjim koracima. Učestanost pobudnog napona povećavati sve dok se na osciloskopu ne pojavi vrednost

$$\text{amplitude izlaznog napona } \frac{V_{pmp-p}(1 \text{ kHz})}{\sqrt{2}} \approx \frac{2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 1,41 \text{ V}. \text{ Gornja granična učestanost i}$$

propusni opseg pojačavača su

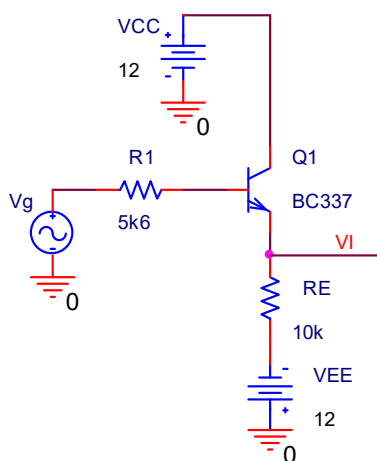
$$f_H = \underline{\hspace{2cm}} \text{ i } B = f_H - f_L = \underline{\hspace{2cm}}.$$

## 5. MERENJE PROPUSNOG OPSEGA POJAČAVAČA SA ZAJEDNIČKIM KOLEKTOROM

Na slici 4.8 prikazana je šema kola koje se koristi pri ovom merenju. Naponsko pojačanje stepena sa zajedničkim kolektorom u funkciji učestanosti je

$$A(s) = \frac{V_i(s)}{V_g(s)} \approx A_{po} \frac{1 + s/\omega_Z}{1 + s/\omega_P}, \quad A_{po} = \frac{(1 + \beta_0)R_E}{R_1 + r_\pi + (1 + \beta_0)R_E}, \quad \omega_Z \approx \frac{g_m}{C_\pi} \approx \omega_T,$$

$$\omega_P = \frac{1}{C_\pi \left( r_\pi \parallel \frac{R_1 + R_E}{1 + g_m R_E} \right)}.$$



Slika 4.8. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom.

### Postupak pri merenju

1. Na protobordu povezati šemu prema slici 4.8.
2. Na ulaz kola dovesti prostoperiodični napon  $v_g = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ .
3. Na osciloskopu postaviti merenje amplitude izlaznog napona  $V_{pmp-p}$ . Pritiskom na taster **MEASURE** dobija se meni u kome treba podesiti **SOURCE** na merni kanal osciloskopa **CH1** ili **CH2** i **TYPE** na **PK-PK**.
4. Osciloskop podesiti za AC merenja, a zatim podešavati vrednost amplitude ulaznog napona dok se na potrošaču  $R_p$  ne dobije amplituda  $V_{imp-p} = 2 \text{ V}$ .
5. Na osnovu odnosa amplituda napona na potrošaču i ulaznog napona odrediti pojačanje u propusnom opsegu

$$A_{po} = \frac{V_{imp-p}}{V_{mp-p}} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

6. Ne menjajući amplitudu ulaznog napona povećavati učestanost pobudnog generatora i posmatrati amplitudu izlaznog napona. Kako se približavamo gornjoj graničnoj učestanosti, učestanost pobudnog generatora treba povećavati u sve manjim koracima. Učestanost pobudnog napona povećavati sve dok se na osciloskopu ne pojavi vrednost amplitude izlaznog napona  $\frac{V_{imp-p}(1 \text{ kHz})}{\sqrt{2}} \approx \frac{2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 1,41 \text{ V}$ . Gornja granična učestanost i propusni opseg pojačavača su

$$f_H = \underline{\hspace{2cm}} \text{ i } B = f_H - f_L = \underline{\hspace{2cm}}.$$

7. Na osnovu rezultata prethodnih merenja ukratko objasniti razlike u propusnim opsezima pojačavača sa zajedničkim emitorom, kaskodnog pojačavača i pojačavača sa zajedničkim kolektorom

---

---

---

---

---

---

---

---

## VEŽBA 5

## FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE: ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČ SA NAPONSKIM I STRUJNIM PROCESIRANJEM-PSPICE

## OPIS VEŽBE

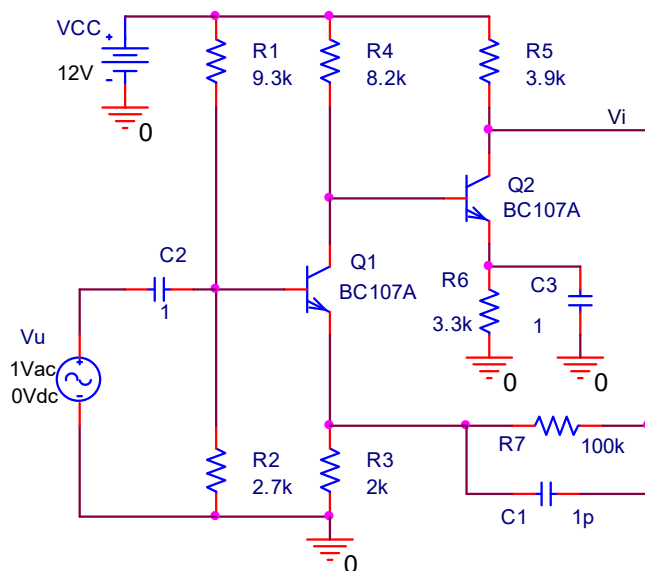
Koriste se šeme pojačavača prikazane na slikama 5.1 i 5.2. Snimaju se frekvencijske karakteristike za različite vrednosti kapacitivnosti i otpornosti. Pored toga snima se i prenosna karakteristika.

## Pribor, instrumenti i materijal

- PC računar sa instaliranim softverskim paketom za analizu elektronskih kola PSPICE

## ZADATAK

## 1. ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČ SA NAPONSKIM PROCESIRANJEM



Simulacija se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 5.1. Pre simulacije je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača bez kondenzatora  $C_1$  u kolu:

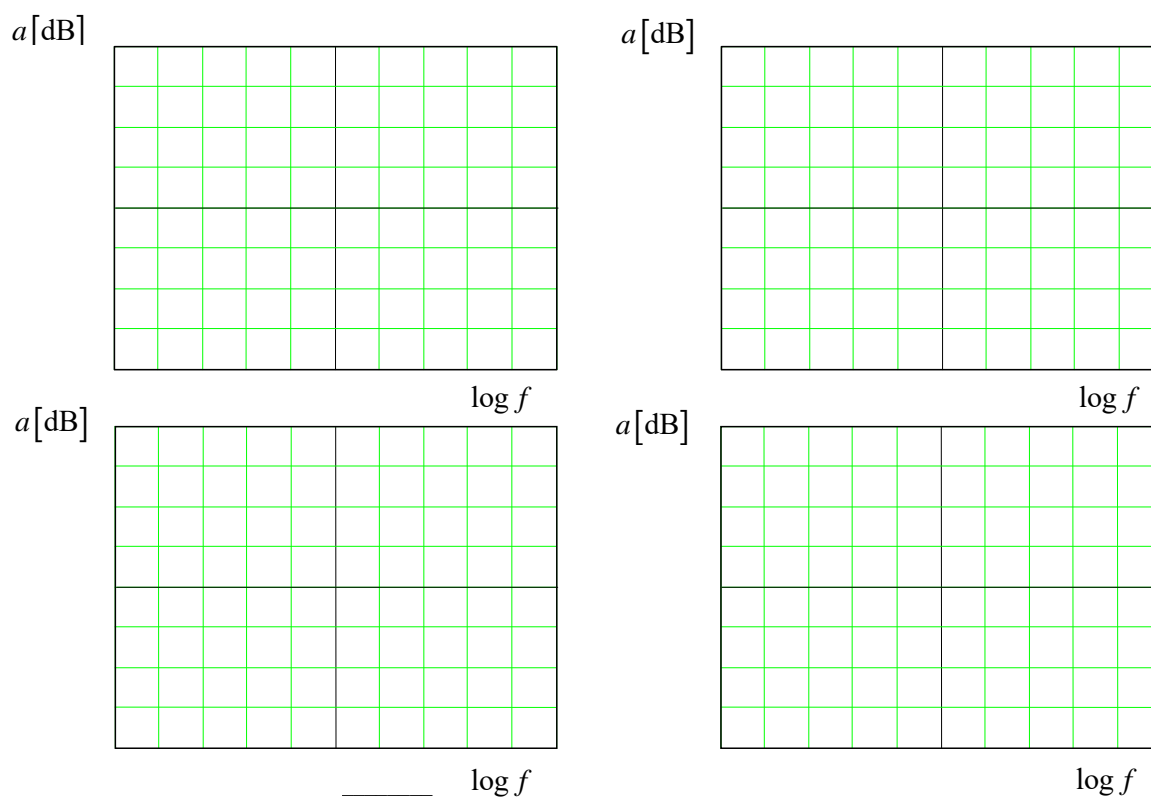
$$v_i = \left( 1 + \frac{R_7}{R_3} \right) v_u.$$

Slika 5.1. Širokopojasni pojačavač sa naponskim procesiranjem.

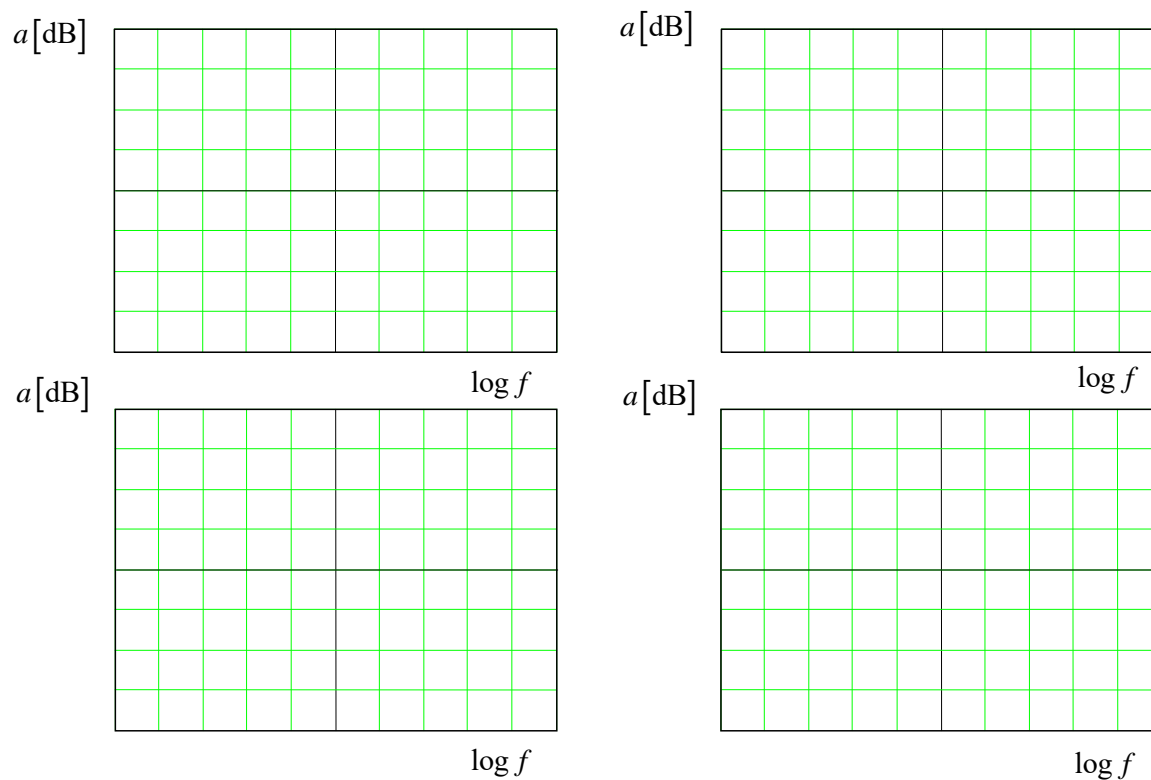
## Postupak pri simulaciji

1. U Pspice Schematics editoru nacrtati šemu prema slici 5.1.
2. Vrednost otpornika  $R_7$  promeniti na  $100 \text{ M}\Omega$ .
3. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1a.
4. Vrednost otpornika  $R_7$  promeniti na  $100 \text{ K}\Omega$ .
5. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1a.
6. Vrednost otpornika  $R_7$  promeniti na  $50 \text{ K}\Omega$ .
7. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1a.
8. Vrednost otpornika  $R_7$  promeniti na  $20 \text{ K}\Omega$ .
9. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1a.





Slika 5.1a. PSPICE simulacijom određene frekventne karakteristike širokopojasnog pojačavača sa naponskim procesiranjem.



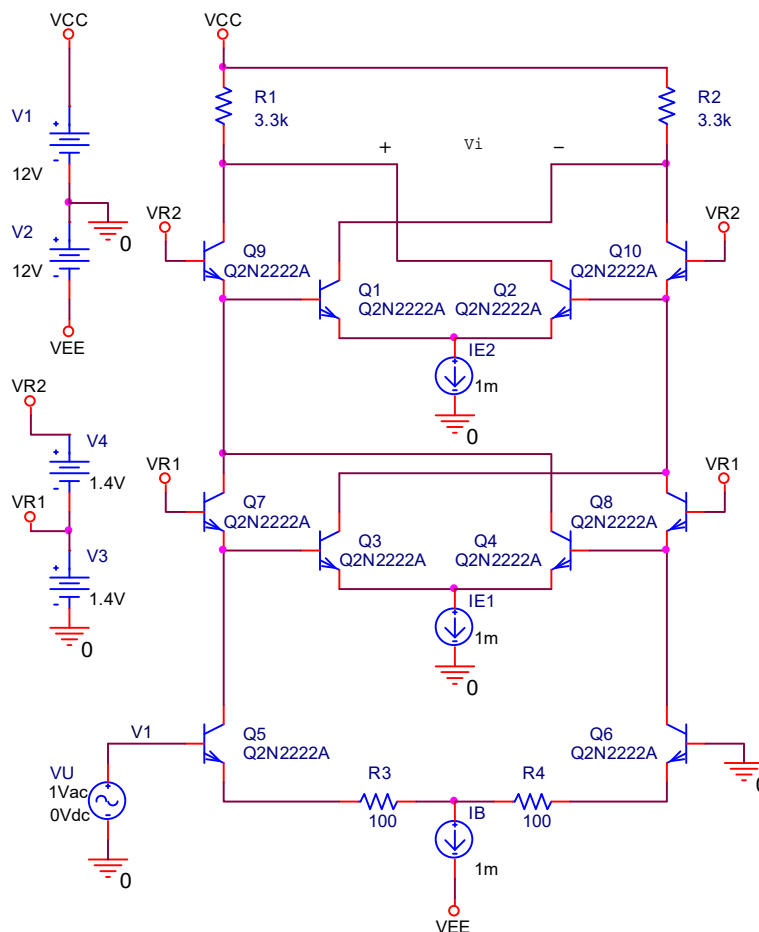
Slika 5.1b. PSPICE simulacijom određene frekventne karakteristike širokopojasnog pojačavača sa naponskim procesiranjem.

10. Vrednost otpornika  $R_7$  fiksirati na  $100\text{ K}\Omega$ .
11. Vrednost kondenzatora  $C_1$  promeniti na  $0,1\text{ pF}$ .
12. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1b.
13. Vrednost kondenzatora  $C_1$  promeniti na  $100\text{ pF}$ .
14. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1b.
15. Vrednost kondenzatora  $C_1$  promeniti na  $100\text{ nF}$ .
16. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1b.
17. Vrednost kondenzatora  $C_1$  promeniti na  $100\text{ }\mu\text{F}$ .
18. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.1b.

## 2. ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČ SA STRUJNIM PROCESIRANJEM

Simulacija se obavlja pomoću kola prikazanog na slici 5.2. Pre simulacije je potrebno izvesti vezu, koja definiše zavisnost izlaznog napona od napona na ulazu pojačavača na niskim učestanostima:

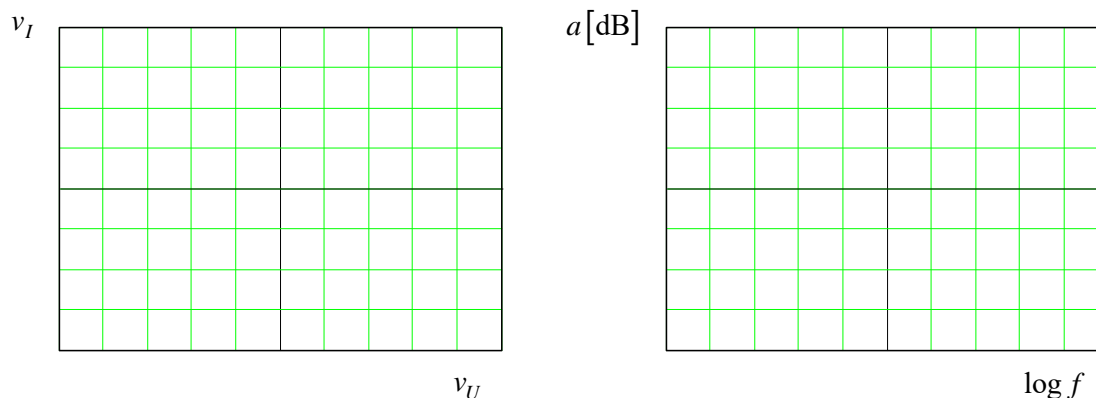
$$v_i = -\frac{R_p}{R_E} \cdot \left(1 + \frac{I_{e1} + I_{e2}}{I_b}\right) \cdot (v_1 - v_2), \quad R_p = R_1 = R_2, \quad R_E = R_3 = R_4.$$



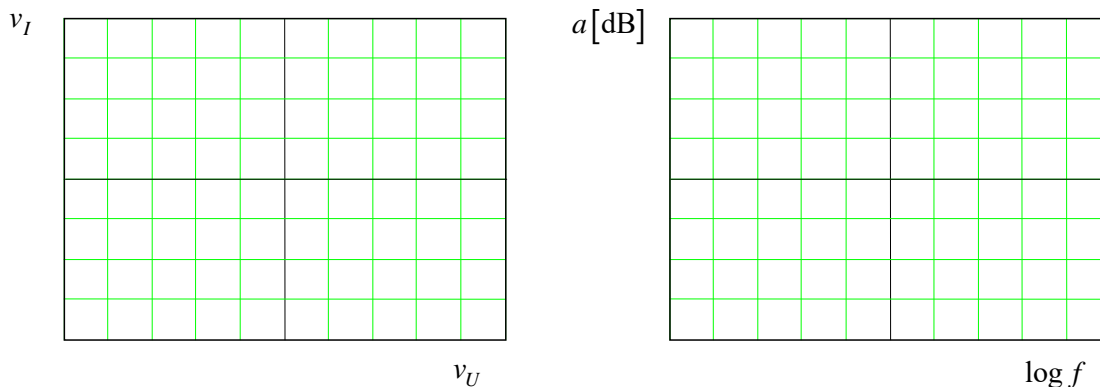
Slika 5.2. Širokopojasni pojačavač sa strujnim procesiranjem.

### Postupak pri simulaciji

1. U Pspice Schematics editoru nacrtati šemu prema slici 5.2.
2. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati funkciju prenosa na grafik prikazan na slici 5.2a.
3. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.2a.
4. Promenuti vrednosti strujnog izvora  $I_B$  na 0.1mA.
5. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati funkciju prenosa (na učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ ) na grafik prikazan na slici 5.2b.
6. Na osnovu PSPICE simulacije ucrtati amplitudsku karakteristiku na grafik prikazan na slici 5.2b.



Slika 5.2a. PSPICE simulacijom određena funkcija prenosa i frekventna karakteristika širokopojasnog pojačavača sa strujnim procesiranjem.



Slika 5.2b. PSPICE simulacijom određena funkcija prenosa i frekventna karakteristika širokopojasnog pojačavača sa strujnim procesiranjem.

## VEŽBA 6

## ŠUM U ELEKTRONSKIM KOLIMA-PSPICE

## OPIS VEŽBE

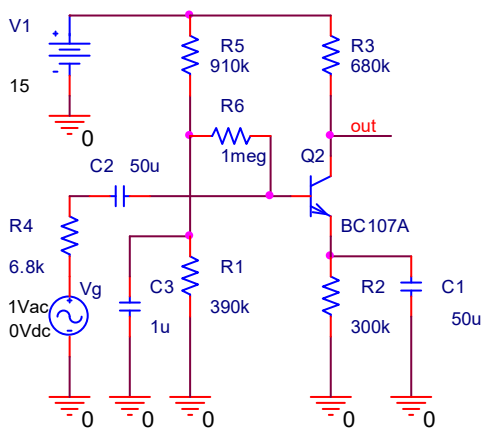
Koriste se šeme pojačavača pokazane na slikama 6.1, 6.5 i 6.8. Snimaju se frekvencijske karakteristike i analiza šuma navedenih pojačavača.

## Pribor, instrumenti i materijal

- PC računar sa instaliranim programom PSPICE

## ZADATAK

## 1. ODREĐIVANJE UTICAJA ŠUMA U POJAČAVAČU SA BIPOLARNIM TRANZISTOROM



Slika 6.1. Stepen sa zajedničkim emitorom.

Na slici 6.1 prikazano je kolo koje se koristi u simulaciji analize uticaja šuma u pojačavaču sa zajedničkim emitorom. Na slici 6.2 prikazan je model tranzistora za male signale na niskim učestanostima. Uticaj šuma sačme u kolu kolektora modelira se strujnim generatorom

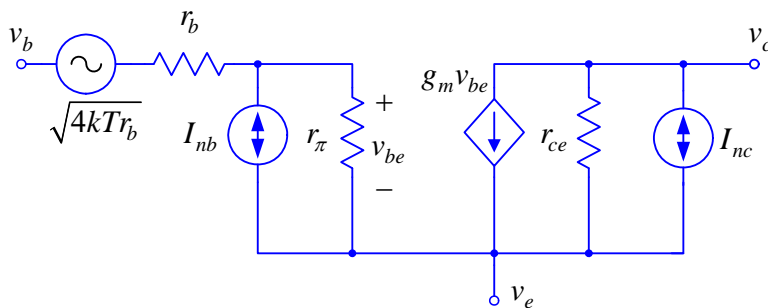
$$I_{nc} = \sqrt{2qI_C}.$$

Uticaj šuma sačme u baznom kolu, kao i uticaj fliker-šuma i generaciono-rekombinacionog šuma predstavljen je preko strujnog generatora čija je spektralna gustina snage

$$I_{nb}^2 = 2qI_B + K_1 \frac{I_B^a}{f} + K_2 \frac{I_B^c}{1 + (f/f_c)^2}.$$

Termički šum generiše otpornost tela baze

$$E_{nb} = \sqrt{4kTr_b}.$$



Slika 6.2. Model šuma u bipolarnom tranzistoru.

## Postupak pri simulaciji

1. Nacrtati šemu kola sa slike 6.1.
2. Zadati AC analizu i analizu šuma. Učestanost se menja po dekadama sa 100 tačaka po dekadi. Početna

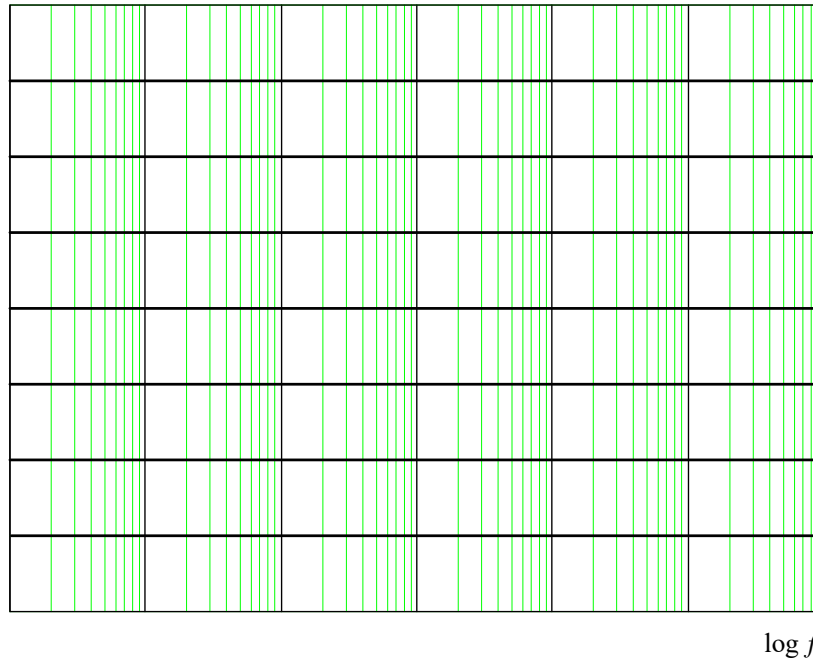
učestanost je 1Hz, a krajnja 100kHz. Za analizu šuma potrebno je selektovati polje **Noise Enabled**. U prazna polja upisati V(out) i Vg, a interval zapisivanja šuma u izlaznu datoteku neka bude isti kao broj tačaka po dekadi.

3. Pokrenuti simulaciju.
4. Po završetku simulacije automatski će se pokrenuti program za prikazivanje rezultata **PROBE**. U ovom prozoru startovati ikonicu **Trace**, a potom sa **Add Trace** pronaći i prikazati šum na izlazu pojačavača **V(ONoise)**. Ovaj napon predstavlja efektivnu vrednost napona šuma na izlazu. Dobijeni dijagram ucrtati na grafik prikazan na slici 6.3.
5. Na ovaj način se može posmatrati udeo pojedinih vrsta šuma. Sa **NFID (ime komponente)** i **NFIB ()** može se posmatrati uticaj Fliker-šuma, sa **NSID()**, **NSIB()** i **NSIC()** uticaj šuma sačme, sa **NRB()**, **NRC()**, **NRD()**, **NRE()**, **NRG()**, **NRS()** uticaj termičkog šuma.

6. Posmatrati bez precrtavanja grafika jedan po jedan šum i utvrditi koji od njih je dominantan

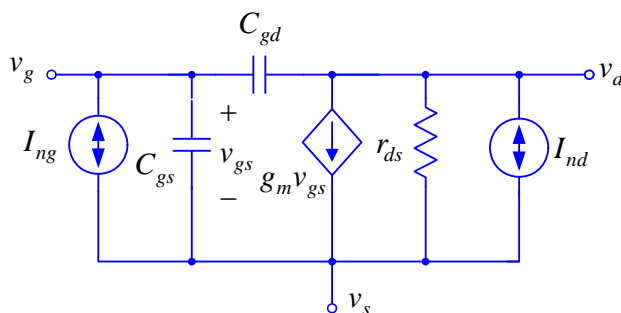
7. Na grafik sa slike 6.3, sa drugom podelom, ucrtati i vrednost napona ekvivalentnog ulaznog šuma  $V(\text{INOISE})$ .

$V(\text{noise})$



Slika 6.3. Dijagrami dobijeni simulacijom šuma u kolu sa slike 6.1.

## 2. ODREĐIVANJE UTICAJA ŠUMA U POJAČAVAČU SA MOS TRANZISTORIMA



Slika 6.4. Model šuma u MOS tranzistoru.

Na slici 6.4 prikazana je ekvivalentna šema za male signale MOS tranzistora sa generatorima koji modeluju uticaj šuma. Šum sačme u gejtju modelovan je strujnim izvorom

$$I_{ng} = \sqrt{2qI_G},$$

dok je uticaj termičkog šuma u kanalu i fliker-šuma predstavljen pomoću strujnog izvora čija je spektralna gustina snage

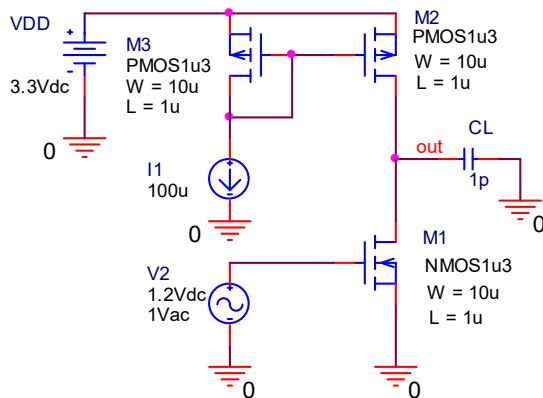
$$I_{nd}^2 = 4kT \frac{2}{3} g_m + K_3 \frac{I_B^a}{f}.$$

### Postupak pri simulaciji

1. Nacrtati šemu kola sa slike 6.5. Modeli tranzistora su:

```
.MODEL NMOS1u3 NMOS LEVEL = 3 TOX = 200E-10 NSUB = 1E17 GAMMA = 0.5 PHI = 0.7 VTO = 0.8
+DELTA = 3.0 UO = 650 ETA = 3.0E-6 THETA = 0.1 KP = 120E-6 VMAX = 1E5 KAPPA = 0.3 RSH = 0
+NFS = 1E12 TPG = 1 XJ = 500E-9 LD = 100E-9 CGDO = 200E-12 CGSO = 200E-12 CGBO = 1E-10
+CJ = 400E-6 PB = 1 MJ = 0.5 CJSW = 300E-12 MJSW = 0.5
.MODEL PMOS1u3 PMOS LEVEL = 3 TOX = 200E-10 NSUB = 1E17 GAMMA = 0.6 PHI = 0.7
+VTO = -0.9 DELTA = 0.1 UO = 250 ETA = 0 THETA = 0.1 KP = 40E-6 VMAX = 5E4 KAPPA = 1
+RSH = 0 NFS = 1E12 TPG = -1 XJ = 500E-9 LD = 100E-9 CGDO = 200E-12 CGSO = 200E-12
+CGBO = 1E-10 CJ = 400E-6 PB = 1 MJ = 0.5 CJSW = 300E-12 MJSW = 0.5
```

2. Zadati AC analizu i analizu šuma. Učestanost se menja po dekadama sa 100 tačaka po dekadi. Početna učestanost je 100Hz, a krajnja 100MEG. Za analizu šuma potrebno je selektovati polje **Noise Enabled**. U prazna polja upisati **V(out)** i **V2**, a polje u kome se zadaje interval zapisivanja šuma u izlaznu datoteku ostaviti prazno.

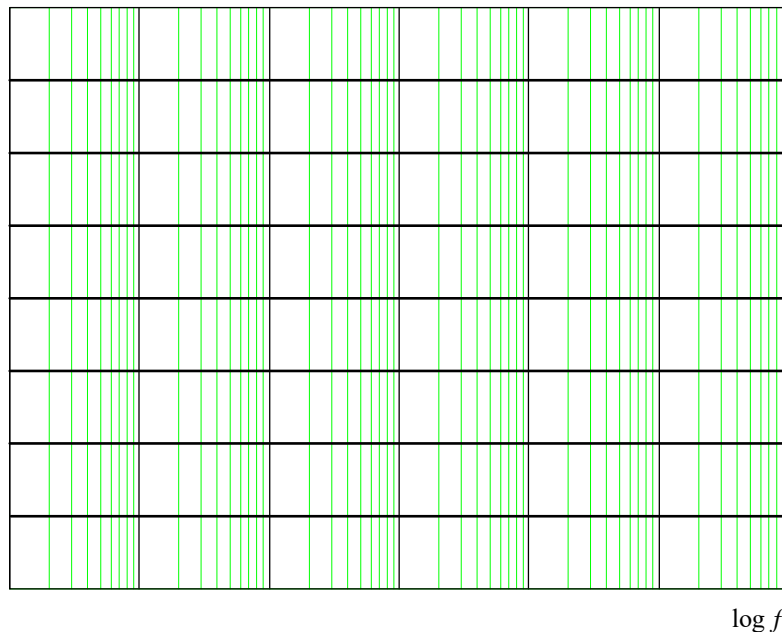


Slika 6.5. CMOS pojačavač.

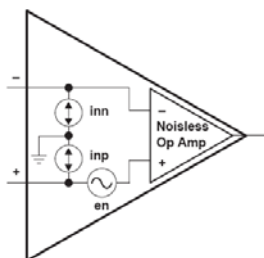
3. Pokrenuti simulaciju.
4. Po završetku simulacije automatski će se pokrenuti program za prikazivanje rezultata **PROBE**. U ovom prozoru startovati ikonicu **Trace**, a potom sa **Add Trace** pronaći i prikazati šum na izlazu pojačavača **V(ONoise)**. Ovaj napon predstavlja efektivnu vrednost napona šuma na izlazu. Dobijeni dijagram ucrtati na grafik prikazan na slici 6.6.
5. Posmatrati bez precrtavanja grafika jedan po jedan šum i utvrditi koji od njih je dominantan

6. Na grafik sa slike 6.6, sa drugom podelom, ucrtati i vrednost napona ekvivalentnog ulaznog šuma **V(INoise)**.

V(onoise)



Slika 6.6. Dijagrami dobijeni simulacijom šuma u kolu sa slike 6.5.



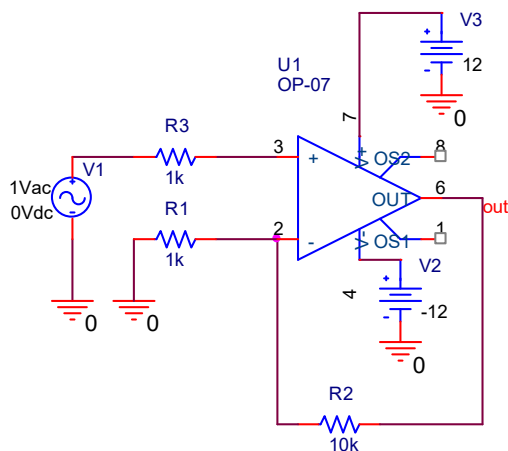
Slika 6.7. Model šuma u operacionom pojačavaču.

### 3. ODREĐIVANJE UTICAJA ŠUMA U KOLIMA SA OPERACIONIM POJAČAVAČEM

Na slici 6.7 prikazan je model realnog operacionog pojačavača preko ekvivalentnih strujnih i naponskih generatora i operacionog pojačavača bez šuma. Generatori šuma u svakom operacionom pojačavaču zavise od konkretne realizacije i tehnologije.

Na slici 6.8 prikazana je šema pojačavača iz koje se određuje uticaj šuma.

## Postupak pri simulaciji



Slika 6.8. Neinvertujući pojačavač u kome se određuje uticaj šuma.

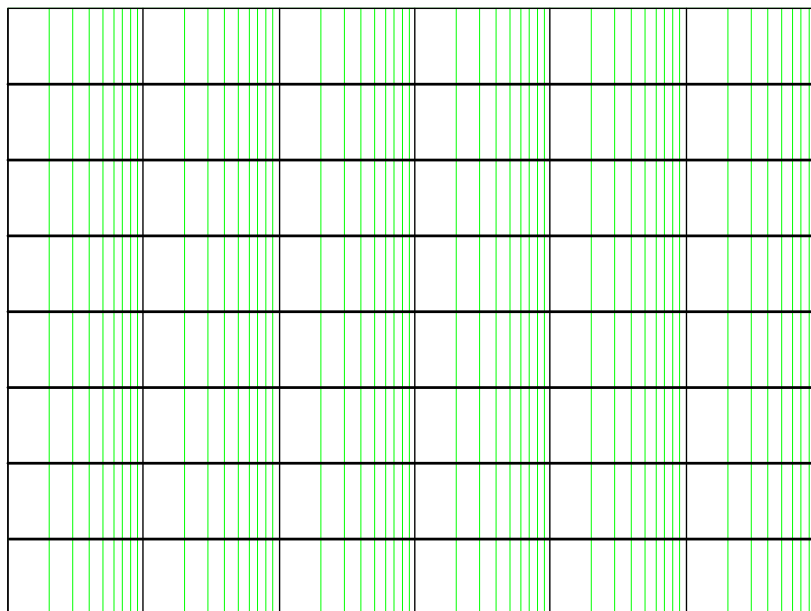
1. Nacrtati šemu kola sa slike 6.8.
2. Zadati AC analizu i analizu šuma. Učestanost se menja po dekadama sa 100 tačaka po dekadi. Početna učestanost je 1Hz, a krajnja 1MEG. Za analizu šuma potrebno je selektovati polje **Noise Enabled**. U prazna polja upisati **V(out)** i **V1**, a polje u kome se zadaje interval zapisivanja šuma u izlaznu datoteku ostaviti prazno.
3. Pokrenuti simulaciju.
4. Po završetku simulacije automatski će se pokrenuti program za prikazivanje rezultata **PROBE**. U ovom prozoru startovati ikonicu **Trace**, a potom sa **Add Trace** pronaći i prikazati šum na izlazu pojačavača **V(ONoise)**. Ovaj napon predstavlja efektivnu vrednost napona šuma na izlazu.

Dobijeni dijagram ucrtati na grafik prikazan na slici 6.9.

5. Posmatrati bez precrtavanja grafika jedan po jedan šum i utvrditi koji od njih je dominantan

6. Na grafik sa slike 6.9, sa drugom podelom, ucrtati i vrednost napona ekvivalentnog ulaznog šuma **V(INoise)**.

$V(\text{onoise})$



$\log f$

Slika 6.9. Dijagrami dobijeni simulacijom šuma u kolu sa slike 6.8.

## ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE KORIŠĆENIH POLUPROVODNIČKIH KOMPONENTI



# 1N4148 / 1N4448

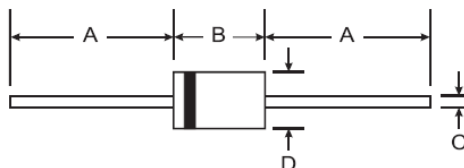
## FAST SWITCHING DIODE

### Features

- Fast Switching Speed
- General Purpose Rectification
- Silicon Epitaxial Planar Construction
- Lead Free Finish, RoHS Compliant (Note 2)

### Mechanical Data

- Case: DO-35
- Case Material: Molded Plastic. UL Flammability Classification Rating 94V-0
- Moisture Sensitivity: Level 1 per J-STD-020C
- Leads: Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Terminals: Finish — Matte Tin. Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Marking: Type Number
- Weight: 0.13 grams (approximate)



DO-35		
Dim	Min	Max
A	25.40	—
B	—	4.00
C	—	0.60
D	—	2.00
All Dimensions in mm		

### Maximum Ratings @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	1N4148	1N4448	Unit
Non-Repetitive Peak Reverse Voltage	$V_{RM}$	100		V
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	$V_{RRM}$ $V_{RWM}$ $V_R$	75		V
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	53		V
Forward Continuous Current (Note 1)	$I_{FM}$	300	500	mA
Average Rectified Output Current (Note 1)	$I_O$	150		mA
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current @ $t = 1.0\text{s}$ @ $t = 1.0\mu\text{s}$	$I_{FSM}$	1.0 2.0		A
Power Dissipation (Note 1) Derate Above $25^\circ\text{C}$	$P_d$	500 1.68		mW mW/ $^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction to Ambient Air (Note 1)	$R_{\theta JA}$	300		K/W
Operating and Storage Temperature Range	$T_J, T_{STG}$	-65 to +175		$^\circ\text{C}$

### Electrical Characteristics @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit	Test Condition
Maximum Forward Voltage 1N4148 1N4448 1N4448	$V_{FM}$	— 0.62 —	1.0 0.72 1.0	V	$I_F = 10\text{mA}$ $I_F = 5.0\text{mA}$ $I_F = 100\text{mA}$
Maximum Peak Reverse Current	$I_{RM}$	—	5.0 50 30 25	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$ nA	$V_R = 75\text{V}$ $V_R = 70\text{V}, T_J = 150^\circ\text{C}$ $V_R = 20\text{V}, T_J = 150^\circ\text{C}$ $V_R = 20\text{V}$
Capacitance	$C_j$	—	4.0	pF	$V_R = 0, f = 1.0\text{MHz}$
Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	—	4.0	ns	$I_F = 10\text{mA}$ to $I_R = 1.0\text{mA}$ $V_R = 6.0\text{V}, R_L = 100\Omega$

- Notes: 1. Valid provided that device terminals are kept at ambient temperature.  
2. RoHS revision 13.2.2003. Glass and High Temperature Solder Exemptions Applied, see EU Directive Annex Notes 5 and 7.

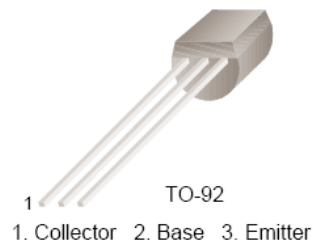




## BC337/338

### Switching and Amplifier Applications

- Suitable for AF-Driver stages and low power output stages
- Complement to BC327/BC328



### NPN Epitaxial Silicon Transistor

#### Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$V_{CES}$	Collector-Emitter Voltage		
	: BC337	50	V
	: BC338	30	V
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage		
	: BC337	45	V
	: BC338	25	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage	5	V
$I_C$	Collector Current (DC)	800	mA
$P_C$	Collector Power Dissipation	625	mW
$T_J$	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
$T_{STG}$	Storage Temperature	-55 ~ 150	$^\circ\text{C}$

#### Electrical Characteristics $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
$BV_{CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$I_C=10\text{mA}$ , $I_B=0$				
	: BC337		45			V
	: BC338		25			V
$BV_{CES}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$I_C=0.1\text{mA}$ , $V_{BE}=0$				
	: BC337		50			V
	: BC338		30			V
$BV_{EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E=0.1\text{mA}$ , $I_C=0$	5			V
$I_{CES}$	Collector Cut-off Current					
	: BC337	$V_{CE}=45\text{V}$ , $I_B=0$		2	100	nA
	: BC338	$V_{CE}=25\text{V}$ , $I_B=0$		2	100	nA
$h_{FE1}$ $h_{FE2}$	DC Current Gain	$V_{CE}=1\text{V}$ , $I_C=100\text{mA}$	100		630	
		$V_{CE}=1\text{V}$ , $I_C=300\text{mA}$	60			
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=500\text{mA}$ , $I_B=50\text{mA}$			0.7	V
$V_{BE(on)}$	Base Emitter On Voltage	$V_{CE}=1\text{V}$ , $I_C=300\text{mA}$			1.2	V
$f_T$	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE}=5\text{V}$ , $I_C=10\text{mA}$ , $f=50\text{MHz}$		100		MHz
$C_{ob}$	Output Capacitance	$V_{CB}=10\text{V}$ , $I_E=0$ , $f=1\text{MHz}$		12		pF

#### $h_{FE}$ Classification

Classification	16	25	40
$h_{FE1}$	100 ~ 250	160 ~ 400	250 ~ 630
$h_{FE2}$	60-	100-	170-

## NPN general purpose transistors

## BC107; BC108; BC109

## QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{CBO}$	collector-base voltage	open emitter			
	BC107		–	50	V
	BC108; BC109		–	30	V
$V_{CEO}$	collector-emitter voltage	open base			
	BC107		–	45	V
	BC108; BC109		–	20	V
$I_{CM}$	peak collector current		–	200	mA
$P_{tot}$	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	–	300	mW
$h_{FE}$	DC current gain	$I_C = 2\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}$			
	BC107		110	450	
	BC108		110	800	
	BC109		200	800	
$f_T$	transition frequency	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	100	–	MHz

## CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$I_{CBO}$	collector cut-off current	$I_E = 0; V_{CB} = 20\text{ V}$	–	–	15	nA
		$I_E = 0; V_{CB} = 20\text{ V}; T_j = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	–	–	15	$\mu\text{A}$
$I_{EBO}$	emitter cut-off current	$I_C = 0; V_{EB} = 5\text{ V}$	–	–	50	nA
$h_{FE}$	DC current gain	$I_C = 10\text{ }\mu\text{A}; V_{CE} = 5\text{ V}$				
	BC107A; BC108A		–	90	–	
	BC107B; BC108B; BC109B		40	150	–	
	BC108C; BC109C		100	270	–	
$h_{FE}$	DC current gain	$I_C = 2\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}$				
	BC107A; BC108A		110	180	220	
	BC107B; BC108B; BC109B		200	290	450	
	BC108C; BC109C		420	520	800	
$V_{CEsat}$	collector-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}; I_B = 0.5\text{ mA}$	–	90	250	mV
		$I_C = 100\text{ mA}; I_B = 5\text{ mA}$	–	200	600	mV
$V_{BEsat}$	base-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}; I_B = 0.5\text{ mA}; \text{note 1}$	–	700	–	mV
		$I_C = 100\text{ mA}; I_B = 5\text{ mA}; \text{note 1}$	–	900	–	mV
$V_{BE}$	base-emitter voltage	$I_C = 2\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; \text{note 2}$	550	620	700	mV
		$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; \text{note 2}$	–	–	770	mV
$C_c$	collector capacitance	$I_E = I_C = 0; V_{CB} = 10\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	–	2.5	6	pF
$C_e$	emitter capacitance	$I_C = I_E = 0; V_{EB} = 0.5\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	–	9	–	pF
$f_T$	transition frequency	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CB} = 5\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	100	–	–	MHz
F	noise figure	$I_C = 200\text{ }\mu\text{A}; V_{CE} = 5\text{ V}; R_S = 2\text{ k}\Omega;$ $f = 30\text{ Hz to }15.7\text{ kHz}$	–	–	4	dB
	BC109B; BC109C					
F	noise figure	$I_C = 200\text{ }\mu\text{A}; V_{CE} = 5\text{ V}; R_S = 2\text{ k}\Omega;$ $f = 1\text{ kHz}; B = 200\text{ Hz}$	–	–	10	dB
	BC107A; BC108A					
	BC107B; BC108B; BC108C					
	BC109B; BC109C		–	–	4	dB

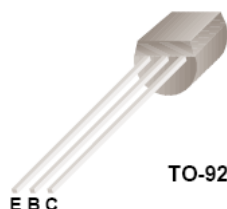
## Notes

- $V_{BEsat}$  decreases by about 1.7 mV/K with increasing temperature.
- $V_{BE}$  decreases by about 2 mV/K with increasing temperature.

Električne karakteristike bipolarnog tranzistora BC 107 (preuzeto sa site-a firme Philips Semiconductors).

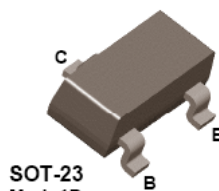


## PN2222A

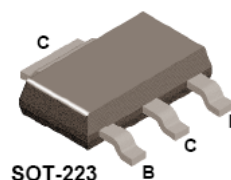


TO-92

## MMBT2222A

SOT-23  
Mark:1P

## PZT2222A



SOT-223

### NPN General Purpose Amplifier

- This device is for use as a medium power amplifier and switch requiring collector currents up to 500mA.
- Sourced from process 19.

### Absolute Maximum Ratings \* $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage	40	V
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage	75	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage	6.0	V
$I_C$	Collector Current	1.0	A
$T_{STG}$	Operating and Storage Junction Temperature Range	- 55 ~ 150	$^\circ\text{C}$

\* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired

#### NOTES:

- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 150 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations

### Electrical Characteristics $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
<b>Off Characteristics</b>					
$BV_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage *	$I_C = 10\text{mA}$ , $I_B = 0$	40		V
$BV_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10\mu\text{A}$ , $I_E = 0$	75		V
$BV_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = 10\mu\text{A}$ , $I_C = 0$	6.0		V
$I_{CEX}$	Collector Cutoff Current	$V_{CE} = 60\text{V}$ , $V_{EB(off)} = 3.0\text{V}$		10	nA
$I_{CBO}$	Collector Cutoff Current	$V_{CB} = 60\text{V}$ , $I_E = 0$ $V_{CB} = 60\text{V}$ , $I_E = 0$ , $T_a = 125^\circ\text{C}$		0.01 10	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$
$I_{EBO}$	Emitter Cutoff Current	$V_{EB} = 3.0\text{V}$ , $I_C = 0$		10	$\mu\text{A}$
$I_{BL}$	Base Cutoff Current	$V_{CE} = 60\text{V}$ , $V_{EB(off)} = 3.0\text{V}$		20	$\mu\text{A}$
<b>On Characteristics</b>					
$h_{FE}$	DC Current Gain	$I_C = 0.1\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 1.0\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 10\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 10\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ , $T_a = -55^\circ\text{C}$ $I_C = 150\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ * $I_C = 150\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ * $I_C = 500\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ *	35 50 75 35 100 50 40	300	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage *	$I_C = 150\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 500\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$		0.3 1.0	V V
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage *	$I_C = 150\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$ $I_C = 500\text{mA}$ , $V_{CE} = 10\text{V}$	0.6	1.2 2.0	V V

\* Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2.0\%$

Električne karakteristike bipolarnog tranzistora 2N2222 (preuzeto sa site-a firme Fairchild Semiconductor).

## Typical Characteristics

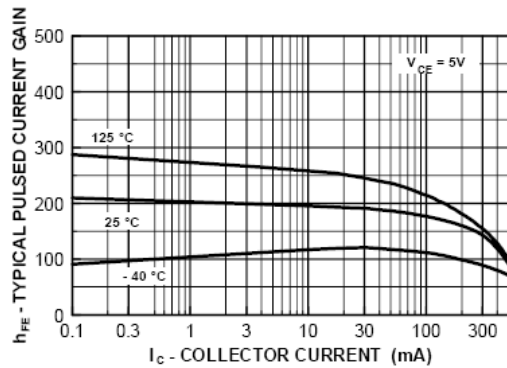


Figure 1. Typical Pulsed Current Gain vs Collector Current

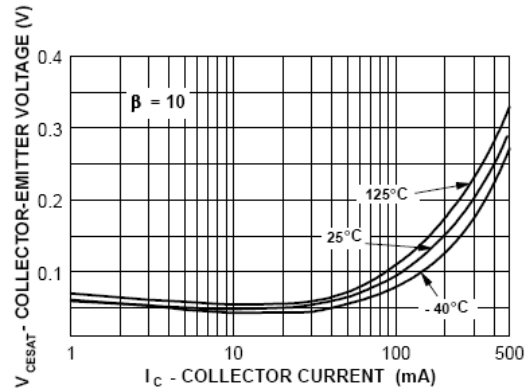


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage vs Collector Current

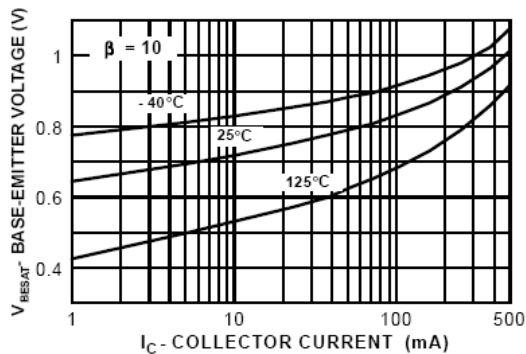


Figure 3. Base-Emitter Saturation Voltage vs Collector Current

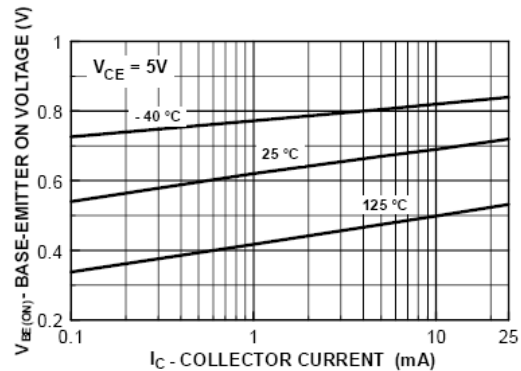


Figure 4. Base-Emitter On Voltage vs Collector Current

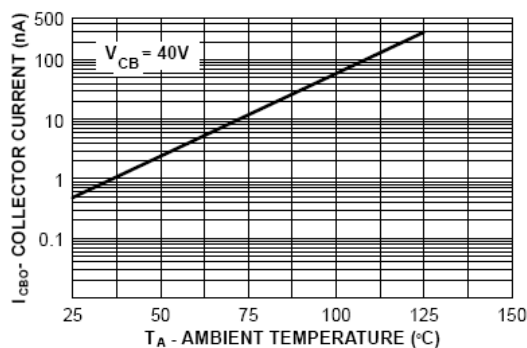


Figure 5. Collector Cutoff Current vs Ambient Temperature

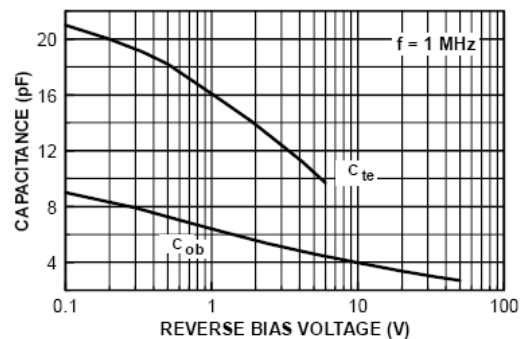


Figure 6. Emitter Transition and Output Capacitance vs Reverse Bias Voltage

**MOTOROLA**

Order this document by MC1458/D

**MC1458, C**

## Internally Compensated, High Performance Dual Operational Amplifiers

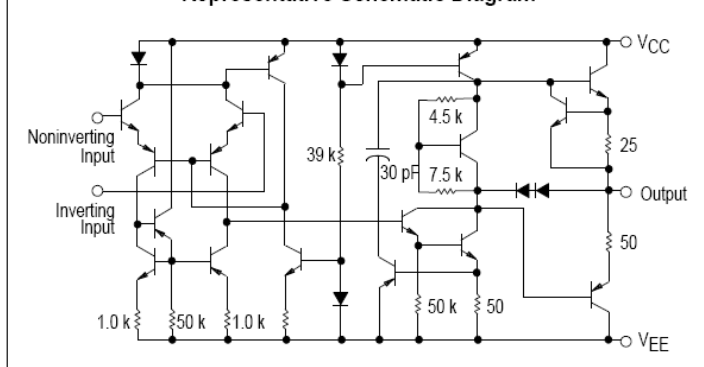
The MC1458, C was designed for use as a summing amplifier, integrator, or amplifier with operating characteristics as a function of the external feedback components.

- No Frequency Compensation Required
- Short Circuit Protection
- Wide Common Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Power Consumption
- No Latch-Up

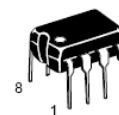
**MAXIMUM RATINGS** ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	$V_{CC}$ $V_{EE}$	+18 -18	Vdc
Input Differential Voltage	$V_{ID}$	$\pm 30$	V
Input Common Mode Voltage (Note 1)	$V_{ICM}$	$\pm 15$	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	$t_{SC}$	Continuous	
Operating Ambient Temperature Range	$T_A$	0 to $+70$	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55 to $+125$	$^\circ\text{C}$
Junction Temperature	$T_J$	150	$^\circ\text{C}$

**NOTES:** 1. For supply voltages less than  $\pm 15$  V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.  
2. Supply voltage equal to or less than 15 V.

**Representative Schematic Diagram**

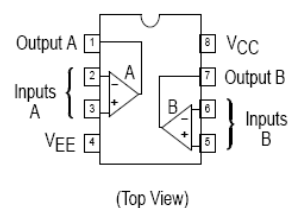
### DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS (DUAL MC1741)

**SEMICONDUCTOR  
TECHNICAL DATA**

**P1 SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 626



**D SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751  
(SO-8)

**PIN CONNECTIONS****ORDERING INFORMATION**

Device	Operating Temperature Range	Package
MC1458CD, D	$T_A = 0^\circ$ to $+70^\circ\text{C}$	SO-8
MC1458CP1, P1		Plastic DIP

## LITERATURA

A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronics Circuits*, Fifth Edition, Chapters 2 and 6-9, Oxford University Press, 2004.

S. Marjanović, *Elektronika linearnih kola i sistema*, Glave 1-4 i 11, Akademska misao, Beograd, 2002.

S. LJ. Tešić, D. M. Vasiljević, *Osnovi elektronike*, Glave 10-12 i 15, Građevinska knjiga, Beograd, 2000.

R. Đurić, *Zbirka zadataka iz analogne elektronike*, Glava 1, Grafos internacional, Pančevo, 2004.

Pravila za rad u laboratoriji i Uputstva za instrumente i opremu, <http://tnt.etf.bg.ac.yu> .

Kratko uputstvo za PSPICE, <http://tnt.etf.bg.ac.yu> .

<http://www.tek.com/measurement/scopes/home.html> .

[www.agilent.com/find/33220A](http://www.agilent.com/find/33220A) .

**EVIDENCIJA IZRADE LABORATORIJSKIH VEŽBI**

Naziv vežbe	Ime, prezime i broj indeksa		Datum	Ocena	Overa
<b>1. Operacioni pojačavač</b>	1.				
	2.				
<b>2. Primena operacionih pojačavača: integrator i precizni usmerač</b>	1.				
	2.				
<b>3. Primena operacionih pojačavača: sabirač, diferencijalni i instrumentacioni pojačavač</b>	1.				
	2.				
<b>4. Frekvencijske karakteristike pojačavača</b>	1.				
	2.				
<b>5. Frekvencijske karakteristike: širokopojasni pojačavač sa naponskim i strujnim procesiranjem-PSPICE</b>	1.				
	2.				
<b>6. Šum u elektronskim kolima-PSPICE</b>	1.				
	2.				