

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO - MATEMATIČKI FAKULTET

OPERACIONI POJAČAVACI  
- Diplomski rad -

Kandidat:

Zoran M. Radojčin

Mentor:

Dr Miroslav Pavlov

NOVI SAD, novembra 1976.

## S A D R Ž A J

- U V O D
- 1. GLAVA : IDEALNI OPERACIONI POJAČAVAČ
  - 1. 1. - Idealni operacioni pojačavač
  - 1. 2. - Kola sa idealnim operacionim pojačavačem
- 2. GLAVA : REALNI OPERACIONI POJAČAVAČ
  - 2. 1. - Realni operacioni pojačavač
  - 2. 2. - Kola sa realnim operacionim pojačavačem
- 3. GLAVA : EKSPERIMENTI, MERENJA I REZULTATI SA OPERACIONIM POJAČAVACEM FAIRCHILD MA 747 DC
  - 3. 1. - Karakteristike pojačavača FAIRCHILD MA 747 DC
  - 3. 2. - Kola sa FAIRCHILD MA 747 DC
- 4. GLAVA : UPOTREBA OPERACIONIH POJAČAVAČA I PROBLEMI U RADU SA NJIMA
  - 4. 1. - Upotreba operacionih pojačavača
  - 4. 2. - Problemi u radu sa operacionim pojačavačima
- ZAKLJUČAK
- SPISAK OZNAKA
- LITERATURA

## U V O D

Revolucionarni skok, koji je elektronika doživela pojavom tranzistora, nastavio se u pravcu minijaturizacije ovog uredjaja i doveo, šezdesetih godina, usavršavanjem planarne tehnologije, do novog kvalitetnog skoka u razvoju elektronike - do pojave integrisanih kola.

Integrисано коло представља већи број здруžених елемената, међусобно повезаних у целину ради обављања функције одредженог електронског кола. Од 1959. године до данас, развој integrисаних кола прешао је пут од хибридних кола, која су представљала умањену копију кола са дискретним елементима, до монолитских кола која, на самоједном комаду полупроводника малих димензија, садрže велики број различитих компонената. Економска оправданост коришћења integrисаних кола као и њихова висока радна способност чине их све значајнијим фактором у савременој електронici.

Tema овога рада је операциони појачавач који спада у групу линеарних integrисаних кола.

Rad се састоји од теоријског и експерименталног дела. У првој глави приказан је идеални операциони појачавач. У другој глави дат је опис особина реалног операционог појачавача. Ова глава се односи и на реализацију кола са реалним појачавачем. У трећој глави изнета су мерења и резултати добијени у експерименту са операционим појачавачем FAIRCHILD МА 747 DC. Четврта глава садржи генерална мишљења о употреби, корисности и перспективи оваквих и других операционих појачавача.

## 1. IDEALNI OPERACIONI POJAČAVAČ

### 1. 1. Idealni operacioni pojačavač

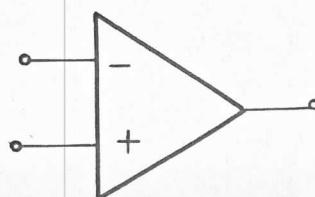
Naziv operacioni pojačavač nastao je da označi pojačavač koji se koristi u oblasti analogne računske tehnike i koji je u mogućnosti da nad električnim signalima vrši računske radnje /operacije / sabiranja, deljenja, integracije, diferenciranja. Raniji naziv se zadržao i danas kada operacioni pojačavač predstavlja preko 50% ukupno proizvedenih integrisanih kola i kada je njegova namena daleko šira od prvobitne. Operacioni pojačavači se koriste u čitavom nizu uređaja: od video i audio pojačavača, do frekven-tnih filtera, u stabilisanim izvorima, u oscilatorima, multivibratorima, kao prekidačka kola itd.

Operacioni pojačavač je pretstavnik linearnih integrisanih kola. U linearne integrisane kola, koja se često nazivaju i analogna, spadaju sva ona kola koja nisu digitalna. Makoliko izgledala uopštena ova definicija, ona se sve češće upotrebljava, jer klasična definicija da su linearne kola ona kola koja imaju zavisnost izlaza od ulaza, datu izrazom  $y = ax + b$ , ne važi u svim slučajevima. Naprimer diferencijatori, integratori i logaritamski pojačavači ne ponašaju se na taj način pa ipak spadaju u linearne kola.

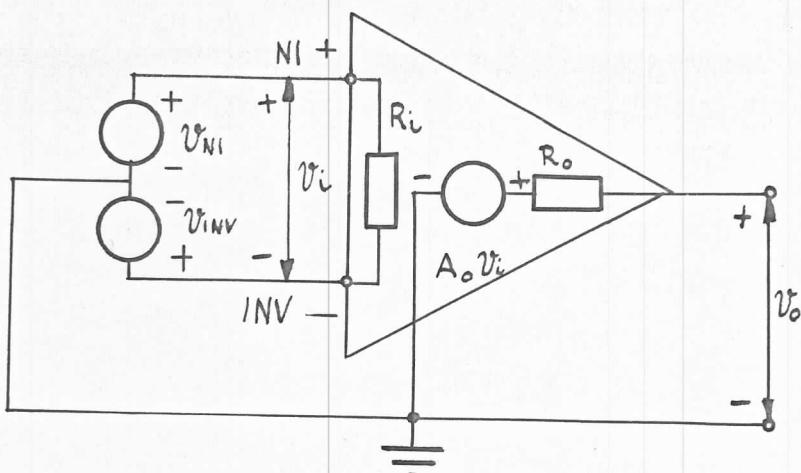
Za klasifikaciju linearnih i digitalnih kola, stoga, najbolja je definicija : digitalna kola rade sa diskontinualnim a analogna sa kontinualnim izlaznim naponima.

Integrисано kolo konstruisano kao operacioni pojačavač ima diferencijalni ulaz i, obično, nesimetrični izlaz. Kolo pojačava razliku napona dovedenih na njegove ulaze. Pozitivni signal na neinvertujućem ulazu, koji se obeležava sa  $/+$  ili NI, daje pozitivan signal na izlazu. Pozitivan signal na invertujućem ulazu  $/-$  ili INV, rezultira negativnim signalom na izlazu.

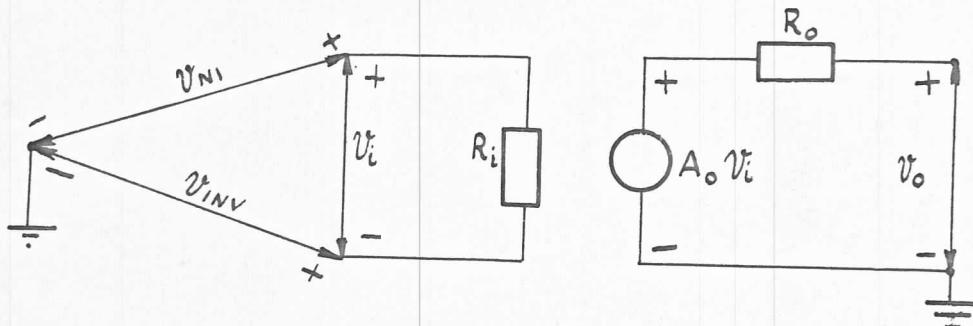
Simbol za šematski prikaz operacionog pojačavača dat je na slici 1, a njegovo ekvivalentno kolo na slici 2 a i 2 b.



Sl. 1. - Simbol za šematski prikaz



Sl. 2 a



Sl. 2 b.- Ekvivalentna šema operacionog pojačavača

Za bazični pojačavač uzima se pojačavač koji bi trebao da ima sledeće osobine:

1. Naponsko pojačanje, odnos promene ulaznog  $V_i$  i izlaznog  $V_o$  napona, treba da je što veće /  $A_o$  na slici 2 a i b/.
2. Ulagna impedansa, impedansa izmedju dva ulaza pojačavača /+/ i /-/ , treba da bude što veća /  $R_i$  na slici 2 a i b/.
3. Izlagna impedansa, impedansa izmedju pojačavača i zajedničkog kraja-mase, treba da je što manja /  $R_o$  na slici 2 a,b/.
4. Što je moguće veći propusni opseg / oblast frekvencija u kojima je pojačanje pojačavača veće od 1, odnosno 0 db/.
5. Razdešenost ravnu nuli / kada je na ulazu napon jednak nuli, izlaz takodje daje nulu/.

Detaljnije definicije ovih veličina date su u 2. glavi.

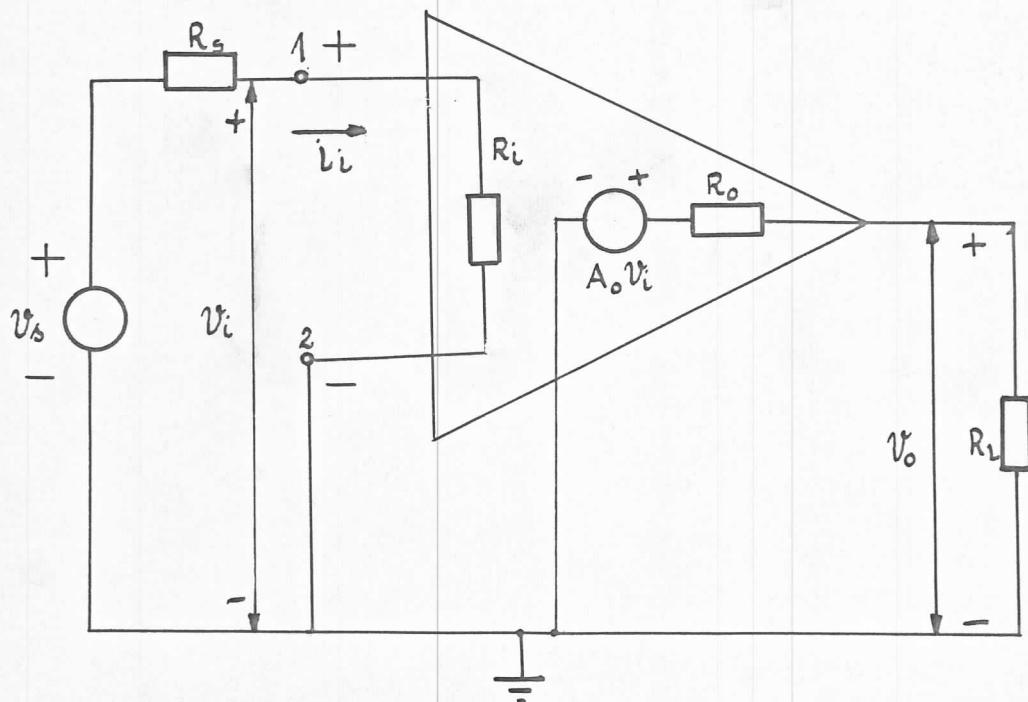
Pri analizi kola sa operacionim pojačavačem najčešće se koristi pretpostavka da je reč o idealnom operacionom pojačavaču.

Njegove osobine predstavljaju idealizovane osobine operacionog pojačavača:

- I Naponsko pojačanje je beskonačno
- II Ulagana impedansa je beskonačna
- III Izlagana impedansa je ravna nuli
- IV Propusni opseg je beskonačan
- V Razdešenost je ravna nuli

Očigledno je da ovakav pojačavač realno ne može egzistirati. Međutim, u praksi je dokazano da se pri analizi kola sa operacionim pojačavačem ova idealizacija može koristiti kao veoma dobra aproksimacija. Pri ovome, učinjene greške su veoma male, a njihova veličina se može unapred odrediti.

Izvršimo analizu idealnog pojačavača koristeći ekvivalentnu šemu realnog pojačavača / slika 3/:



Sl. 3

$$V_i = R_i i_i \dots / 1.1/$$

$$V_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} V_s \dots / 1.2/$$

$$V_o = A_o \frac{R_L}{R_L + R_o} V_i \dots \text{ /1.3/}$$

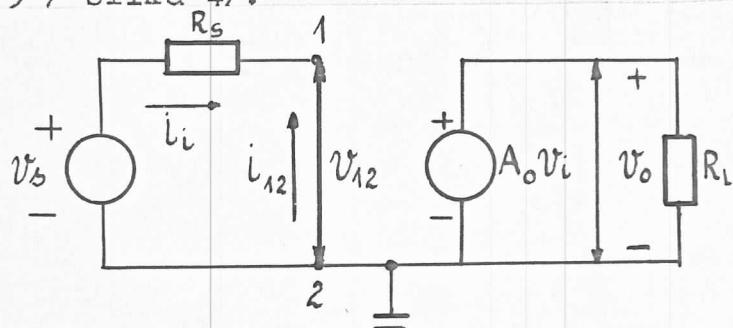
$$V_o = A_o \frac{R_L}{R_L + R_o} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_s} V_s \dots \text{ /1.4/}$$

Ako u ove jednačine uvrstimo uslove pod I /  $A_o = \infty$  /, II /  $R_L = \infty$  /, III /  $R_s = 0$  /, slede absurdni rezultati. Naprimjer, iz jednačine 1.4 sledi da za svako  $V_s \neq 0$  pri pojačanju  $A_o = \infty$  dobijamo  $V_o = \infty$  što je fizički nemoguće. Samo ako je  $V_s = 0$  moguće je na izlazu pojačavača dobiti  $V_o \neq \infty$ . Ni ovaj uslov nije fizički ostvarljiv, ali on omogućava lakše shvatanje principa na kojima se zasniva idealni operacioni pojačavač i njegova primena.

Ako je  $V_s = 0$  tada / iz jednačine 1.2/ je i  $V_i = 0$ . Znači i napon  $V_{12}$  izmedju tačaka 1 i 2 / slike 3 i 4/ takodje je ravan nuli. Isto tako / iz jednačine 1.1/ i ulazna struja  $i_i$  je jednaka nuli. Sledi da je i struja  $i_{12}$  izmedju tačaka 1 i 2 / slike 3 i 4 / takodje nula.

Ovo je veoma važna karakteristika definisanog pojačavača: na ulazu napon je uvek nula, a takodje i ulazna struja je nula.

Zbog ovoga se tačka 1 naziva često "virtuelna nula" ili "virtuelna masa". Ako se iskoristi ova osobina i uslovi I, II i III, može se na sledeći način pretstaviti kolo bazičnog pojačavača sa slike 3 / slika 4/:



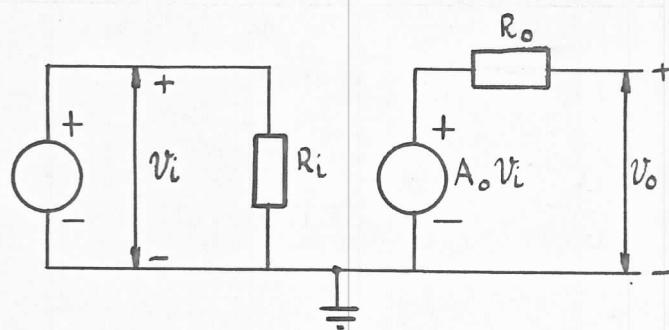
Sl. 4. Strelice izmedju tačaka 1 i 2 ukazuju na to da je tačka 1 "virtuelna masa".

Dovoljno je da pojačavač ispunjava samo uslov I /  $A_o = \infty$  /, pa da ga možemo smatrati idealnim. Uslovi pod II i III koriste se samo zbog jednostavnijeg računa jer, ako je ispunjen uslov II /  $R_L = \infty$  /, tada iz jednačine 1.2 sledi da je  $V_i = V_s$ , a iz III /  $R_s = 0$  / da otpor  $R_s$  ne utiče na izlazni signal  $V_o$  / jednačina 1.4/.

Pri analizi kola sa operacionim pojačavačem može se pretpostaviti da se radi sa idealnim operacionim pojačavačem. Ovo ne unosi velike greške zbog toga što gotovo svi realni pojačava-

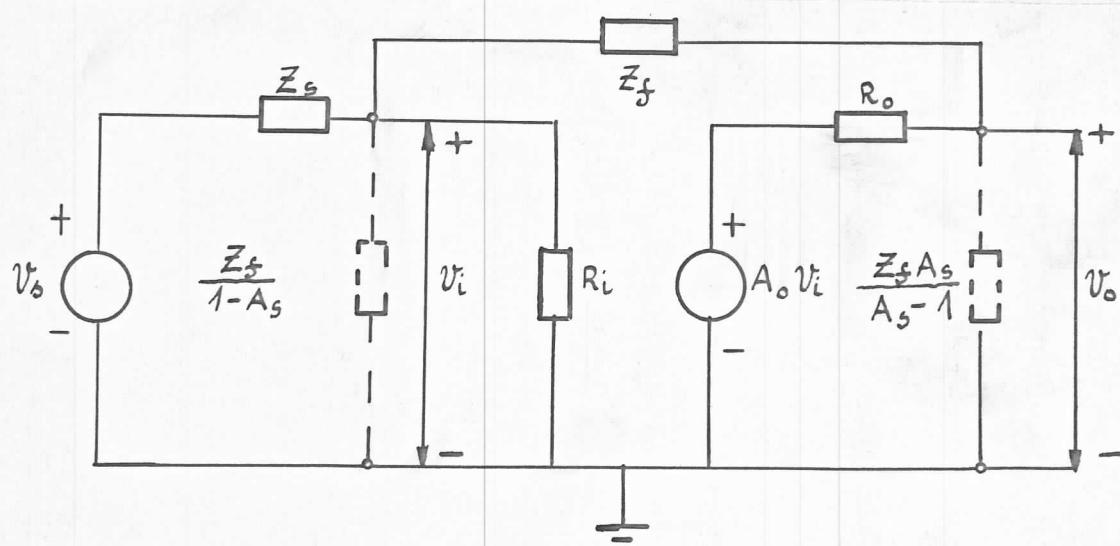
či imaju dovoljno veliko pojačanje i ulaznu impedansu i dovoljno malu izlaznu impedansu da bi se na njih mogla primeniti ovakva aproksimacija.

U slučajevima kada je potrebna velika tačnost i kada je od značaja činjenica da realni, fizički, pojačavač odstupa od ove idealizacije, koristi se ekvivalentno kolo kao na slici 5, gde je  $A_o \neq \infty$ ;  $R_i \neq \infty$ ;  $R_o \neq 0$ .



Sl. 5

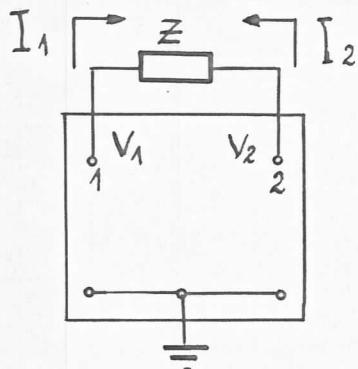
Jedno opšte kolo, pretstavljeno preko ovakve šeme, izgledalo bi kao na slici 6:



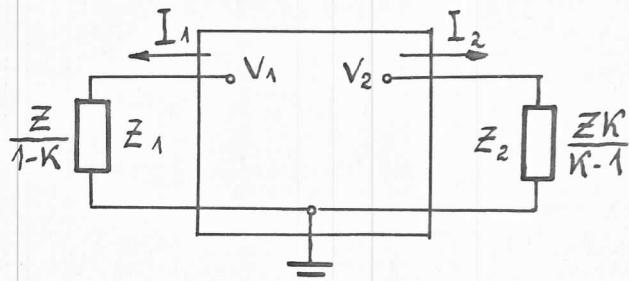
Sl. 6

Ovo kolo prikazano je zbog toga što je primena operacionog pojačavača bez povratne sprege gotovo neizvodljiva. U radu se i posmatra isključivo operacioni pojačavač u kolu sa povratnom spregom u konkretnim slučajevima. U kolu sa slike 6 ova sprega je obezbedjena preko impedanse  $Z_s$  i impedanse  $Z_f$ , koje za sada nema potrebe specificirati.  $A_s$  je naponsko pojačanje pri "zatvorenoj petlji" / sa povratnom spregom/, a  $A_o$  pri "otvorenoj petlji"

/ bez sprege u kolu/. Impedanse označene isprekidanim linijama su Milerove / Miller / impedanse, koje zamenjuju / koje su ekvivalentne/ impedansu  $Z_f$ . Do ovakvog rezultata dolazimo posmatrajući slike 7 a, b:



Sl. 7 a



Sl. 7 b

Pretpostavka je da znamo odnos  $K = \frac{V_2}{V_1}$  / u slučaju operacionog pojačavača to je  $A_o$ . Struja  $I_1$  / sa slike 7 a/ data je

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{Z} = \frac{V_1}{Z} / \frac{1-K}{1-K} = \frac{V_1}{Z/(1-K)} = \frac{V_1}{Z_1}$$

gde je  $Z_1 = Z/(1-K)$ . Istim postupkom dobijamo da je  $Z_2 = ZK/(K-1)$ . Rezultat omogućava da se radi preko ekvivalentne šeme koja je mnogo praktičnija / slika 7 b/.

## 1. 2. Kola sa idealnim operacionim pojačavačem

Navedeno je napred da bez povratne sprege nema mnogo smisla koristiti operacioni pojačavač i to, pre svega, zbog njegovog velikog naponskog pojačanja / idealni pojačavač ima beskonačno pojačanje, ali i pojačanja realnog pojačavača su veoma velika - od  $10^5$  do  $10^9$  puta/. Ovo dovodi do zasićenja na izlazu i pri vrlo malim ulaznim signalima. Bez sprege se operacioni pojačavač koristi samo kao prekidačko kolo.

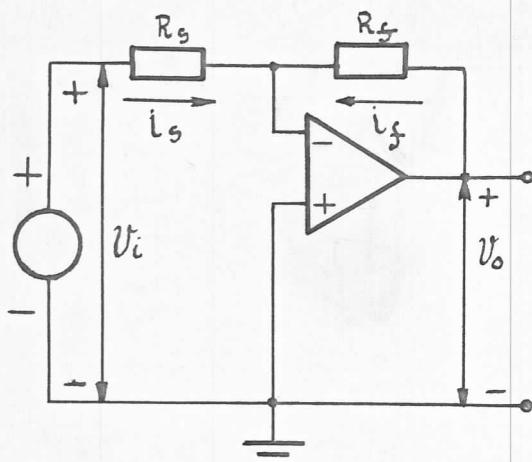
### 1. 2. 1. Invertujući pojačavač

Na slici 8 pretstavljen je invertujući pojačavač. Uz korišćenje pretpostavke o idealnom operacionom pojačavaču sa ove slike dobijamo:

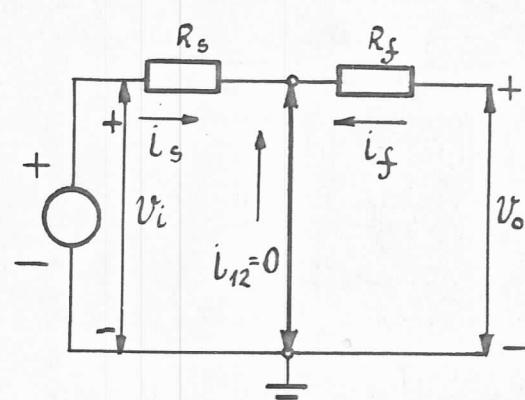
$$i_s = \frac{V_i}{R_s} \dots \dots / 1.5 /$$

$$i_f = \frac{v_o}{R_f} \dots / 1.6/$$

Kako je  $i_f = i_s \dots / 1.7/$ , dobijamo  $\frac{v_o}{R_s} = -\frac{v_o}{R_f} \dots / 1.8/$   
odnosno  $A_r = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_s} \dots / 1.9/$



Sl. 8 a

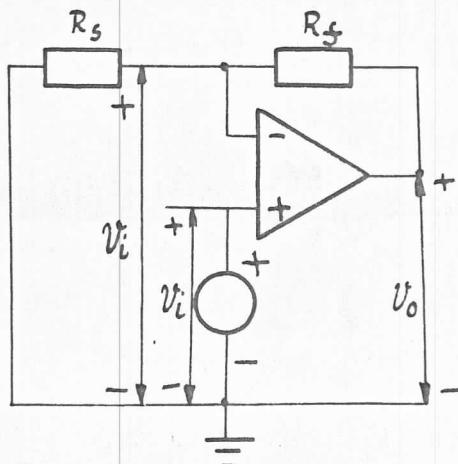


Sl. 8 b

Znak  $/-$  pokazuje faznu inverziju. Očigledno je da se kombinovanjem različitih  $R_f$  i  $R_s$  može dobiti željeno pojačanje / Da je izraz  $A_r = R_f / R_s$  tačan i za realni operacioni pojačavač u dovoljnoj meri biće pokazano u 2. glavi/.

### 1. 2. 2. Neinvertujući pojačavač

Ovakav pojačavač prikazan je na slici 9. Napon na njegovom izlazu proporcionalan je naponu na ulazu. Ne dolazi do promene znaka ulaznog signala.



Sl. 9

Koristeći se pretpostavkom o idealnom operacionom pojačavaču, možemo smatrati da je napon izmedju  $/-$  i  $/+$  ulaza jednak nuli. Iz šeme tada sledi da je napon na oba ulaza, u odnosu na masu, isti :  $\tilde{V}_i$ . Otpori  $R_s$  i  $R_f$  vezani su kao potenciometar.

$$\tilde{V}_i = \frac{R_s}{R_f + R_s} V_o \dots / 1.10/$$

$$V_o = \frac{R_f + R_s}{R_s} \cdot \tilde{V}_i = 1 + \frac{R_f}{R_s} / \tilde{V}_i \dots / 1.11/$$

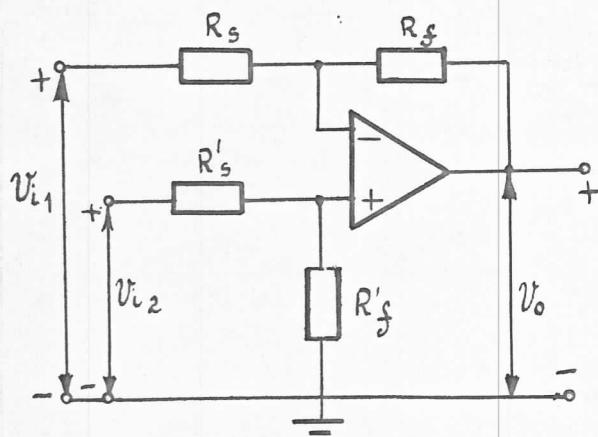
Iz :  $A_v = \frac{V_o}{\tilde{V}_i} = 1 + \frac{R_f}{R_s} \dots / 1.12/$

Pojačanje se dobija kao :  $A_v = 1 + R_f / R_s$ )

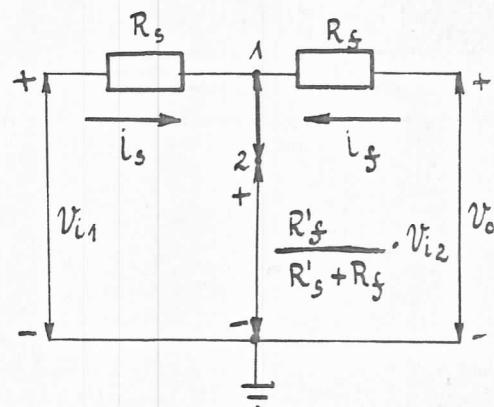
Pojačanje je uvek veće od 1. Kombinovanjem  $R_f$  i  $R_s$  može se menjati.

Ovakvi pojačavači, invertujući i neinvertujući, u analognim računarima obavljaju operacije množenja, odnosno deljenja konstantom.

### 1. 2. 3. Diferencijalni pojačavač



Sl. 10 a



Sl. 10 b

Na slici 10 a je diferencijalni ili oduzimajući pojačavač. Slika 10 b pretstavlja način razmatranja kola pomoću idealnog operacionog pojačavača. Ovaj pojačavač pojačava razliku napona dovedenih na njegove ulaze.

$$i_s = -i_f \dots / 1.13/$$

$$V_{i1} = R_s i_s + \frac{R'_f}{R'_s + R'_f} V_{i2} \dots / 1.14/$$

$$V_o = R_f i_f + \frac{R'_f}{R'_s + R'_f} V_{i2} \dots / 1.15/$$

$$V_o = \frac{R_f}{R_s} \left[ \frac{R'_f}{R'_s + R'_f} \left( 1 + \frac{R_s}{R_f} \right) V_{i2} - V_{i1} \right] \dots / 1.16/$$

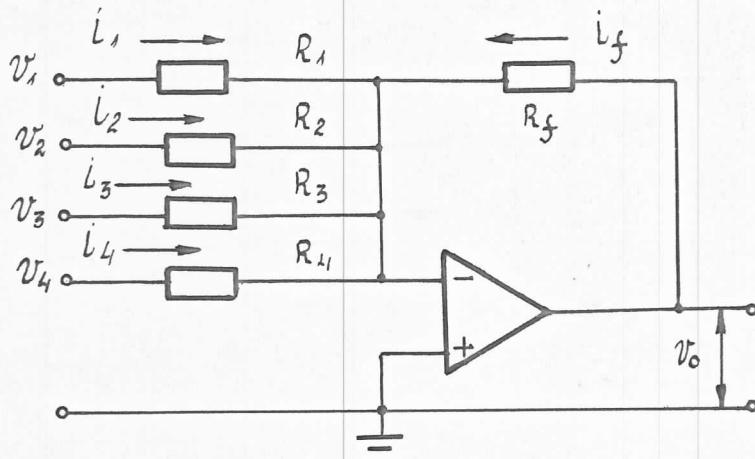
Ako uzmemo da je  $R_f = R'_f$  i  $R_s = R'_s$  dobija se:

$$V_o = \frac{R_f}{R_s} / V_{i2} - V_{i1} / \dots / 1.17/$$

To znači da je na izlazu pojačana razlika napona na ulazu. Pojačanje je dato izrazom  $A_f = R_f / R_s$ , kao i kod invertujućeg pojačavača. Kombinovanjem  $R_f$  i  $R_s$  može se menjati.

#### 1. 2. 4. Adicioni / sabirajući / pojačavač

Adicioni pojačavač je, u stvari, invertujući pojačavač malo modifikovan. Na isti način se i razmatra. Pretstavljen je na slici 11.



Sl. 11

$$i_1 = \frac{V_1}{R_1}; \quad i_2 = \frac{V_2}{R_2}; \quad i_3 = \frac{V_3}{R_3}; \quad i_4 = \frac{V_4}{R_4} \dots / 1.18/$$

$$-i_f = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 \dots / 1.19/$$

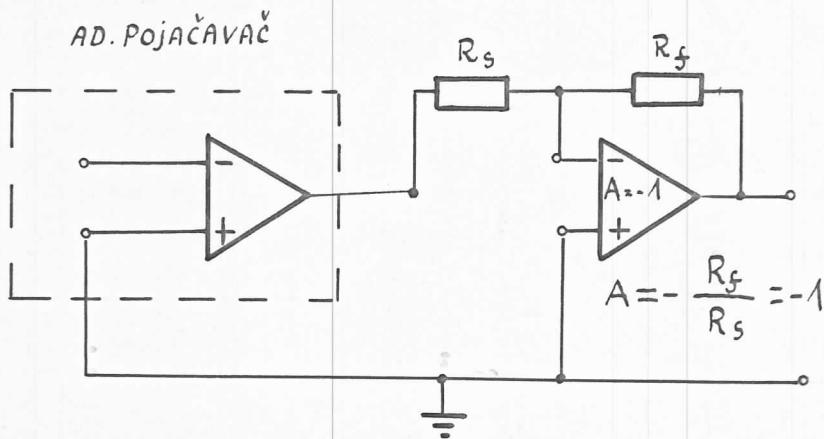
$$i_f = \frac{V_o}{R_f} \dots / 1.20/$$

$$V_o = -R_f / \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} / \dots / 1.21/$$

U slučaju koji se najčešće koristi uzima se :  
 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_f$ , pa izraz 1.21 postaje :

$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad \dots \dots / 1.22/$$

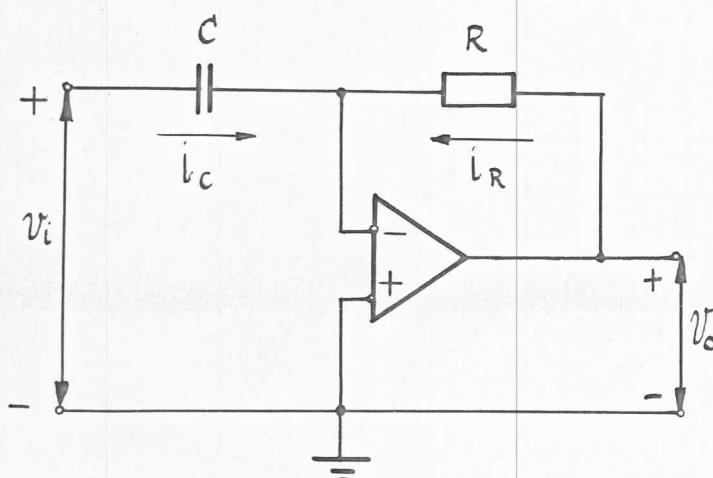
Na izlaz se najčešće priključi još jedan invertujući pojačavač sa pojačanjem  $A_r = -1$ . / slika 11 a/



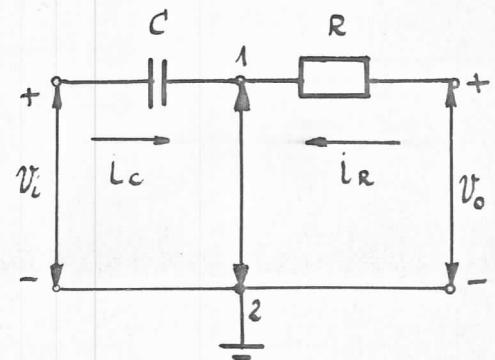
Slika 11 a : Invertujući pojačavač sa pojačanjem  $A_r = -1$  pridodat bilo kom kolu menja znak operacije / kod integratora, diferencijatora, invertujućeg pojačavača itd./.

### 1. 2. 5. Diferencijator

Kolo prikazano na slici 12 a koristi se za matematičku operaciju diferenciranja. Razmatranje je izvršeno na modelu sa idealnim operacionim pojačavačem i korišćenjem metoda "virtuelne nule" / slika 12 b/.



Sli. 12 a



Sli. 12 b

$$i_c = -i_R \quad \dots \dots / 1.23 /$$

$$i_c = C \frac{d V_i}{dt} \quad \dots \dots / 1.24 /$$

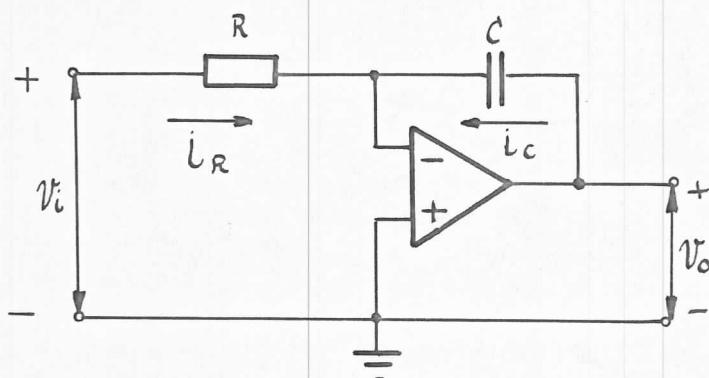
$$i_R = \frac{V_o}{R} \quad \dots \dots / 1.25 /$$

$$V_o = -RC \frac{d V_i}{dt} \quad \dots \dots / 1.26 /$$

Izlazni napon proporcionalan je diferencijalu ulaznog napona. RC je konstanta proporcionalnosti koja se može menjati izborom otpora R i kapaciteta kondenzatora C. Šema sa realnim operacionim pojačavačem je nešto drugačija, ali je ovo dobra aproksimacija.

### 1. 2. 6. Integrator

Kolo prikazano na slici 13 može da obavlja operaciju integrisanja. Razmatranje ovakvog kola slično je razmatranju prethodnog kola - diferencijatora.



Sl. 13

$$-i_R = i_C \quad \dots \dots / 1.27 /$$

$$i = \frac{V_i}{R} \quad \dots \dots / 1.28 /$$

$$i_C = C \frac{d V_o}{dt} \quad \dots \dots / 1.29 /$$

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt \quad \dots \dots / 1.30 /$$

Napon na izlazu ovakvog pojačavča proporcionalan je integralu ulaznog napona. RC je konstanta proporcionalnosti. Kao i kod diferencijatora i ovde dolazi do promene faze / znaka /. Ovo se može izmeniti dodavanjem još jednog invertujućeg pojačavača sa pojačanjem  $A = -1$ , kao kod adicioneog pojačavača / slika 11 a/.

## 2. STVARNI OPERACIONI POJAČAVAČ

### 2. 1. Stvarni operacioni pojačavač

Kao realni, fizički i tehnološki objekt, stvarni operacioni pojačavač se u mnogome razlikuje od idealnog. Potrebno je poznavati veliki broj njegovih karakteristika da bi se moglo vršiti projektovanje nekog kola sa operacionim pojačavačem. Po broju svojih karakteristika operacioni pojačavač je, posmatran kao posebna komponenta, u elektronici gotovo sasvim bez preanca.

#### 2. 1. 1. Naponsko pojačanje operacionog pojačavača sa otvorenom petljom

Naponsko pojačanje realnog operacionog pojačavača ne može nikada biti beskonačno. Ova fizička realnost, stoga, mora se nužno uzeti u obzir pri projektovanju kola sa operacionim pojačavačem.

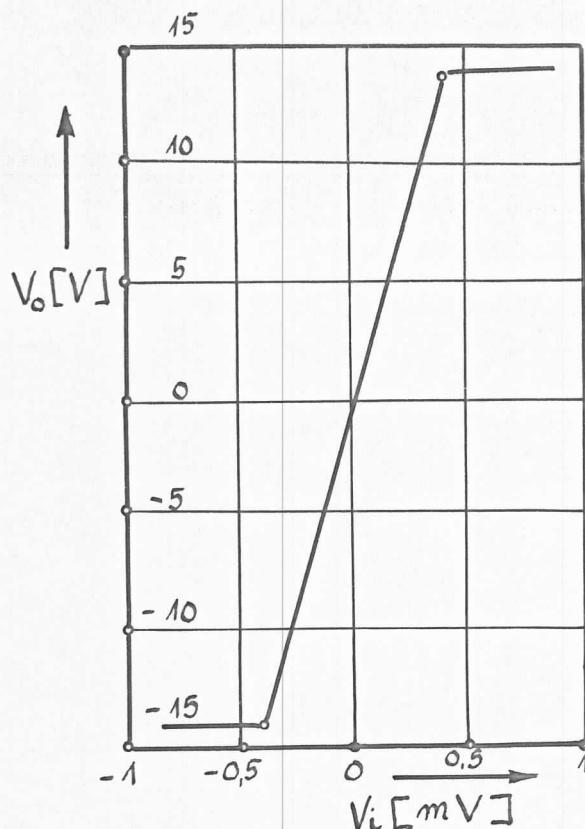
Naponsko pojačanje  $A_o$  je pojačanje samog operacionog pojačavača, pojačanje sa otvorenom petljom ili pojačanje bez povratne sprege za jednosmerne napone, za razliku od pojačanja  $A_s$  pri zatvorenoj petlji, pojačanja celog pojačavača zajedno sa povratnom spregom / npr.  $R_f$  i  $R_s$  kod invertora i neinvertora,  $R$  i  $C$  kod integratora i diferencijatora/.

Ovo pojačanje definišemo kao količnik jednosmernog ulaznog napona  $V_i$  i izlaznog napona  $V_o$  .

$$A_o = \frac{V_o}{V_i} \quad \dots / 2.1/$$

Tipična zavisnost  $V_o$  od  $V_i$  data je na slici 14 / Ova zavisnost je data i kao tvornička karakteristika operacionog pojačavača FAIRCHILD μA 747 DC, koji je korišćen u radu /.

Ova zavisnost je linearna sve dok se ne zadje u oblast visokih /maksimalno dozvoljenih / izlaznih napona. Ova linearna oblast je i radna oblast operacionog pojačavača. Ova zavisnost je u vezi i sa naponom napajanja  $V_s$  i temperaturom ambijenta  $T$ . Veći napon napajanja daje veće  $A_o$  /  $V_s$  se može povećavati samo do odredjene vrednosti - maksimalnog napona napajanja/. Zavisnost pojačanja od temperature ambijenta  $T$  nije linearна.



Sl. 14

Vrednost pojačanja  $A_o$  kreću se od  $10^3$  do  $10^9$ , a kako se, međutim, operacioni pojačavač koristi gotovo isključivo u kolu sa povratnom spregom, pojačanja su /pojačanja pojačavača sa povratnom spregom-celokupnog pojačavača/ mnogo manja.

Teži se da pojačanje  $A_o$  / pojačanje pojačavača sa otvorenom petljom/ bude veće, jer se time postiže više korisnih efekata:

a/- manja zavisnost pojačanja pojačavača od pojačanja samog operacionog pojačavača

b/- veća zavisnost pojačavača od povratne spreme

c/- bolja linearnost i stabilnost

Kao što se vidi teži se da se operacioni pojačavač približi idealnom.

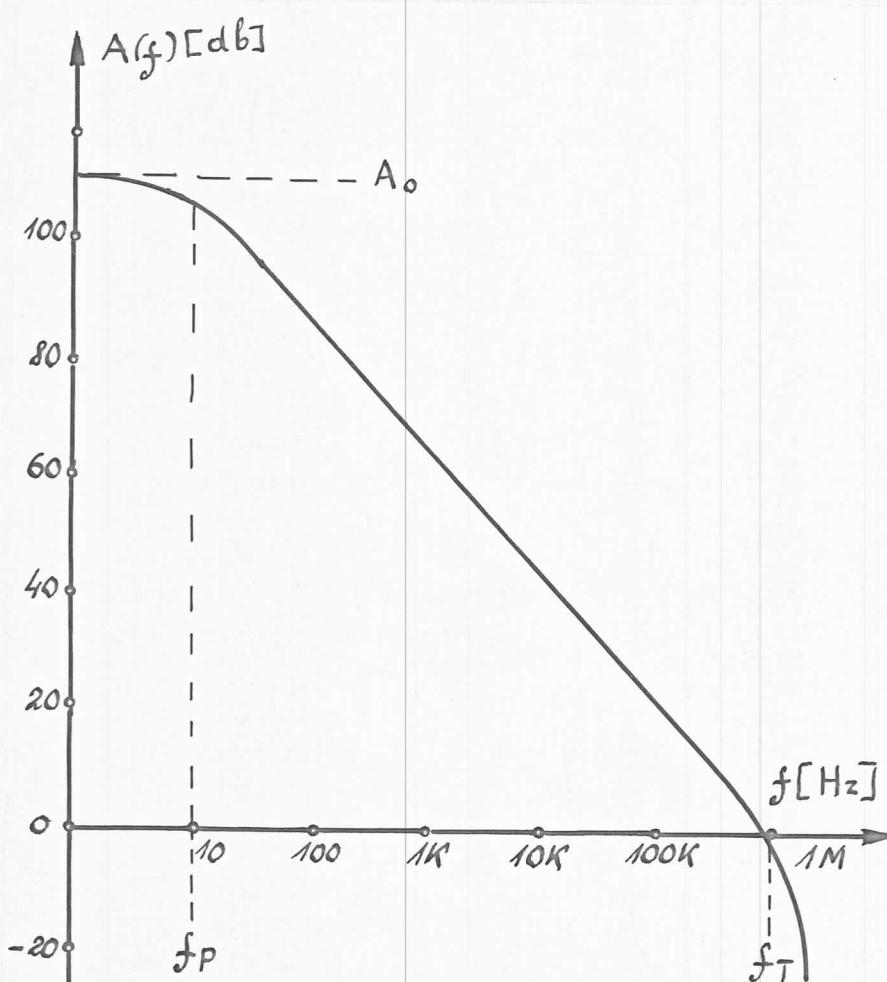
### 2.1.2. Frekventna karakteristika

Frekventna karakteristika operacionog pojačavača sastoji se od : amplitudne frekventne karakteristike i fazne frekventne karakteristike.

a/- Amplitudna karakteristika

Naponsko pojačanje u funkciji učestanosti /  $A = A(f) //$ , predstavlja frekventnu karakteristiku operacionog pojačavača. Ova karakteristika se prikazuje na Bodeovom / Bode/ dijagramu: apscisa predstavlja frekvenciju u logaritamskoj razmeri, a ordinata je naponsko pojačanje u decibelima.

Na slici 15 je amplitudna karakteristika operacionog pojačavača FAIRCHILD MA 747 DC /tvornički podatak/, koji je korišćen u radu. Ova karakteristika je tipična, slična je kod mnogih operacionih pojačavača.



Sl. 15

Amplitudna kriva najčešće se aproksimira pravim linijama  $\overline{AB}$  i  $\overline{CD}$  / slika 16/.

Horizontalna prava  $\overline{AB}$  aproksimira amplitudnu karakteristiku za niske, a prava  $\overline{CD}$  za visoke učestanosti. Nagib prave  $\overline{CD}$  obično iznosi 6 db/oktavi, odnosno 20 db/dekadi učestanosti. Ovo je i tipičan nagib za operacione pojačavače, ali je potrebno naglasiti da postoje i pojačavači sa drugačijim nagibom. Zavisnost

po jačanja od učestanosti kod pojačavača sa nagibom 6 db/oktavi data je, za više učestanosti, izrazom :

$$A(f) = A_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_p}} \quad \dots / 2.2/ [1.; 2.; 3.]$$

$A(f)$  - pojačanje za učestanost  $f$  pri otvorenoj petlji

$A_0$  - pojačanje za jednosmerni signal

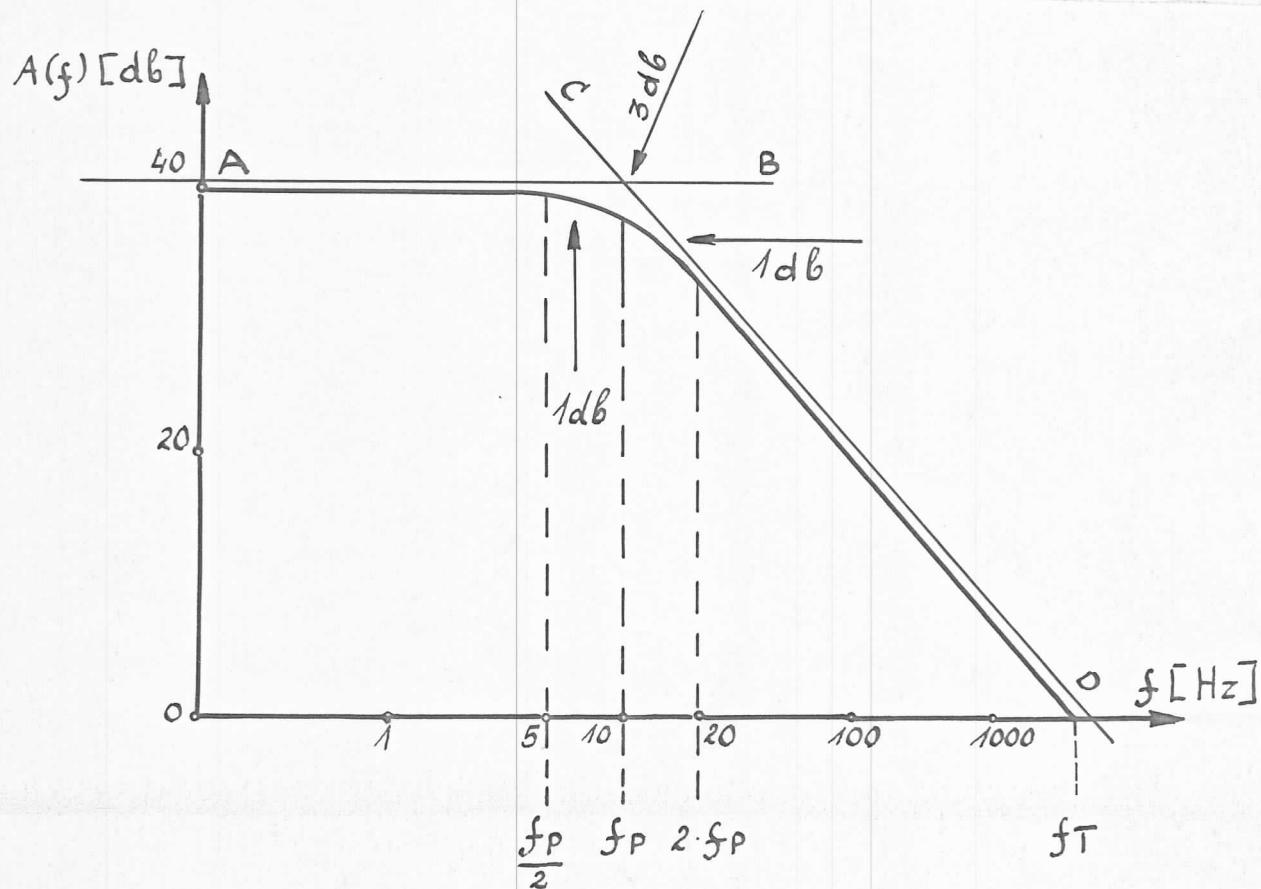
$f_p$  - prelomna učestanost na kojoj pojačanje opadne za 3 db

Na frekvencijama  $f > f_p$  možemo ovaj izraz zamenuti:

$$A(f) = -j A_0 \frac{f_p}{f} \quad \dots / 2.3/$$

Prelomna učestanost  $f_p$  je prikazana na slici 16. Ona predstavlja frekvenciju na kojoj kriva  $A(f)$  iz horizontalnog dela prelazi u deo sa stalnim nagibom od 6 db/oktavi.

Na slici 16 prikazano je, takođe, kolika je greška učinjena ovom aproksimacijom.



Sli. 16

Greška iznosi 3 db za prelomnu učestanost  $f_p$ , a 1 db oktavu ispod i oktavu iznad / za  $2f_p$  i  $f_p/2$  /.

Za ovaku aproksimaciju dovoljno je poznavati tri podatka da bi se pretstavila amplitudna frekventna karakteristika:

a/- naponsko pojačanje  $A_0$  / za jednosmerni signal/

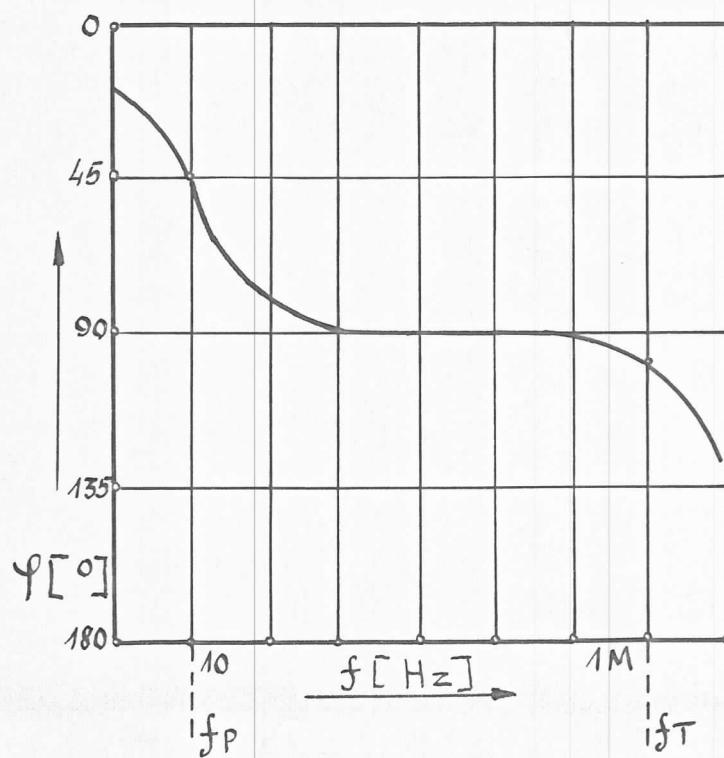
b/- nagib karakteristike

c/- granična učestanost za jedinično pojačanje  $f_T$

$f_T$  predstavlja frekvenciju na kojoj je pojačanje  $A /f/ = 1$ , odnosno pojačanje od 0 db.

#### b/- Fazna frekventna karakteristika

Fazna karakteristika predstavlja zavisnost faznog operajera od učestanosti. Ova zavisnost je tipična za većinu operacionih pojačavača, tako da se, najčešće, za konkretan operacioni pojačavač i ne snima. Na slici 17 prikazana je takva zavisnost /tvornički podatak za operacioni pojačavač FAIRCHILD MA 747 DC/.



Sl. 17

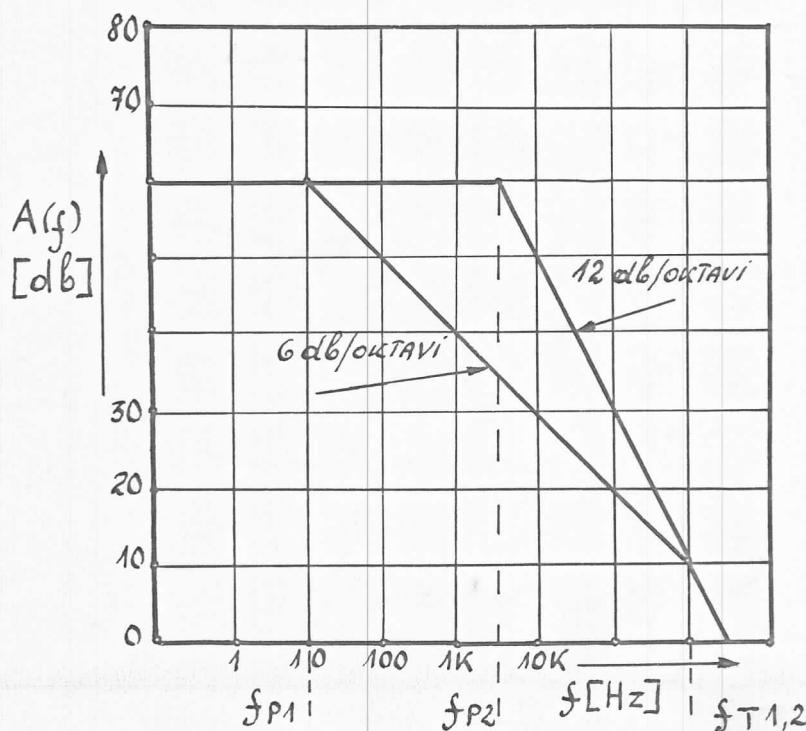
Za faznu karakteristiku važan je sledeći uslov: amplitudna karakteristika mora seći pravu 0 db / tačka  $f_T$  na slici 15/

kod učestanosti kojoj odgovara fazno kašnjenje manje od  $\pi$  radijana /  $180^\circ$ . Uslov je ekvivalentan uslovu da nagib amplitudne karakteristike bude manji od 12 db/oktavi. Po Bodeu, svakoj amplitudnoj karakteristici odgovara jedna i samo jedna fazna karakteristika [1.; 3.]. Kod operacionih pojačavača ta zavisnost je sledeća: nagibu od 6 db/oktavi odgovara fazni pomeraj od  $90^\circ$ , nagibu od 12 db/oktavi fazni ugao  $180^\circ$ . Promeni nagiba za 1 db/oktavi odgovara promena faze za  $15^\circ$ .

Gornji uslov je potreban zbog toga što operacioni pojačavači uvek rade u kolu sa negativnom povratnom spregom, a uslov za stabilnost kola sa ovom spregom je upravo taj. U slučaju da je fazno pomeranje veće od  $180^\circ$  nagib veći od 12 db/oktavi /, negativna sprega prelazi u pozitivnu spregu i pojačavač je nestabilan. O povratnoj spregi biće više reči na kraju ovog poglavlja.

Operacioni pojačavač / FAIRCHILD MA 747 DC/ ima nagib 6 db/oktavi u celom propusnom opsegu, pa se ne postavlja problem stabilnosti.

#### c/- Kompenzacija amplitudne karakteristike

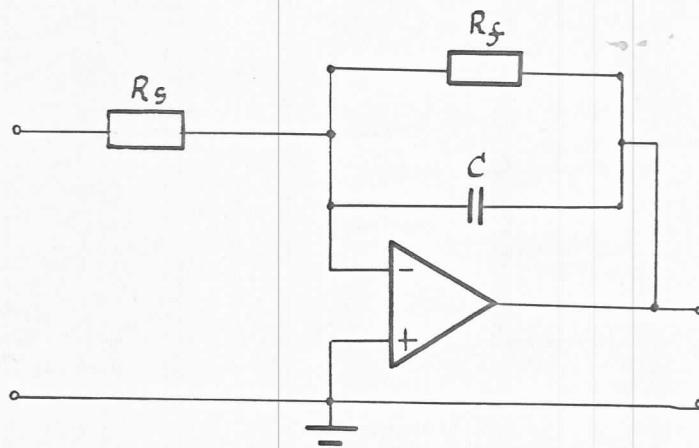


Sl. 18

Nemaju svi operacioni pojačavači nagib amplitudne karakteristike od 6 db/oktavi. Postoje i pojačavači sa dva i više nagiba

u frekventnoj amplitudnoj karakteristici. Nagib od 12 db/oktavi ili veći pretstavlja problem zbog nestabilnosti pojačavača, ali se pojačavači sa ovakvom karakteristikom relativno često proizvode. Prvi razlog ovome je što se lakše izradjuju u odnosu na pojačavače sa nagibom od 6 db/oktavi. Drugi razlog je potreba da se za odredjene svrhe koristi pojačavač čija se prelomna tačka  $f_p$  nalazi na višim frekvencijama. Pojačavač sa nagibom od 12 db, uz isto pojačanje  $A_o$  i isti propusni opseg, imaće uvek prelomnu tačku  $f_p$  na višoj frekvenciji od pojačavača sa nagibom od 6 db/oktavi /slika 18/.

Kod ovakvih operacionih pojačavača pribegava se kompenzaciji. Dodavanjem komponenti u spoljašnje kolo postiže se pad od 6 db/oktavi, odnosno stabilnost pojačavača. Kolo na slici 19 je jedno takvo kolo.



Sl. 19

Ako izvršimo analizu ovoga kola / jednostavnu analizu/, vidimo da ono radi na sledeći način : u oblasti nižih frekvencija, impedansa kondenzatora je  $\frac{1}{\omega C} \gg R$  pa se uticaj kondenzatora ne oseća. U ovoj oblasti kolo radi kao pojačavač sa konstantnim pojačanjem  $A = -R_f / R_s$ , kao invertujući pojačavač.

U oblasti viših frekvencija :  $\frac{1}{\omega C} \ll R_f$

Sada se uticaj otpora  $R_f$  ne oseća pa kolo radi kao integrator. Amplitudna karakteristika ima nagib 6 db/oktavi.

Prelomna tačka se nalazi na frekvenciji na kojoj je:

$$\frac{1}{\omega C} = R_f = \frac{1}{2\pi f_p \cdot C} \quad \dots \dots / 2.4/$$

odavde sledi:

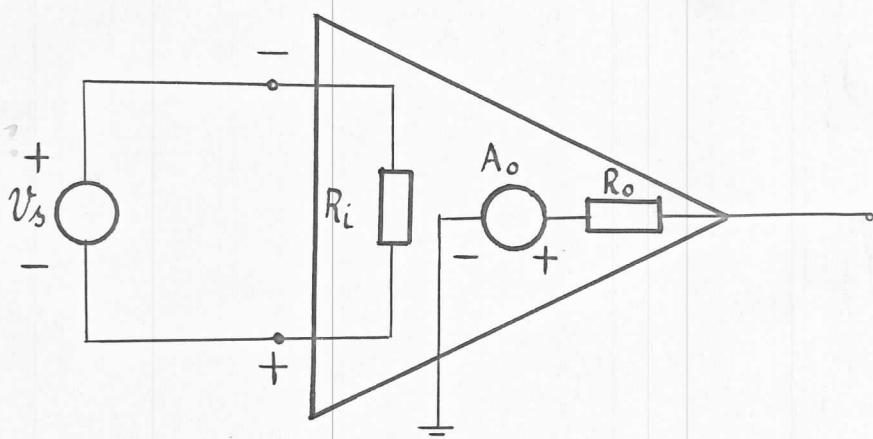
$$f_p = \frac{1}{2\pi R_f C} \quad \dots \dots / 2.5/$$

Kod pojačavača FAIRCHILD MA 747 DC ova kompenzacija je tvornički izvršena, pa je obezbedjena stabilnost /kompenzacija je izvršena integrisanim elementima/.

## 2. 1. 3. Impedanse

### a/- Ulagna impedansa

Ulagnom impedansom se naziva diferencijalna ulagna impedansa izmedju dva ulaza pojačavača - invertujućeg /-/ i neinvertujućeg /+/ ulaza. Ova impedansa prikazana je na slici 20 kao  $R_i$ .



Sl. 20: Realni operacioni pojačavač sa  $R_i \neq \infty$ ,  $R_o \neq 0$  i  $A_o \neq \infty$

Ova ulagna impedansa kod savremenih operacionih pojačavača ima vrednost od  $100\text{ K}\Omega$  do  $100\text{ M}\Omega$ . Operacioni pojačavač, koji je korišćen u radu, ima  $R_i = 5\text{ M}\Omega$  / tvornički podatak/.

Često se govorи i о "ulaznoj impedansi prema masi". Ovde je reč о ulaznoj impedansi izmedju jednog ulaza i mase - zajedničkog kraja, odnosno izvora napajanja čija je impedansa prema masi praktično beskonačna. Ulagna impedansa prema masi je kod današnjih operacionih pojačavača veoma velika : od  $10^2$  do  $10^3\text{ M}\Omega$ .

### b/- Izlazna impedansa

Ovo je impedansa izmedju izlaza i mase. Teži se da njena vrednost bude što manja. Na slici 20 označena je sa  $R_o$ . Kod savremenih operacionih pojačavača vrednost joj se kreće od  $10\Omega$  do  $10^3\Omega$ . Tvornički podatak za operacioni pojačavač, koji je korišćen u radu, je  $R_o = 160\Omega$ .

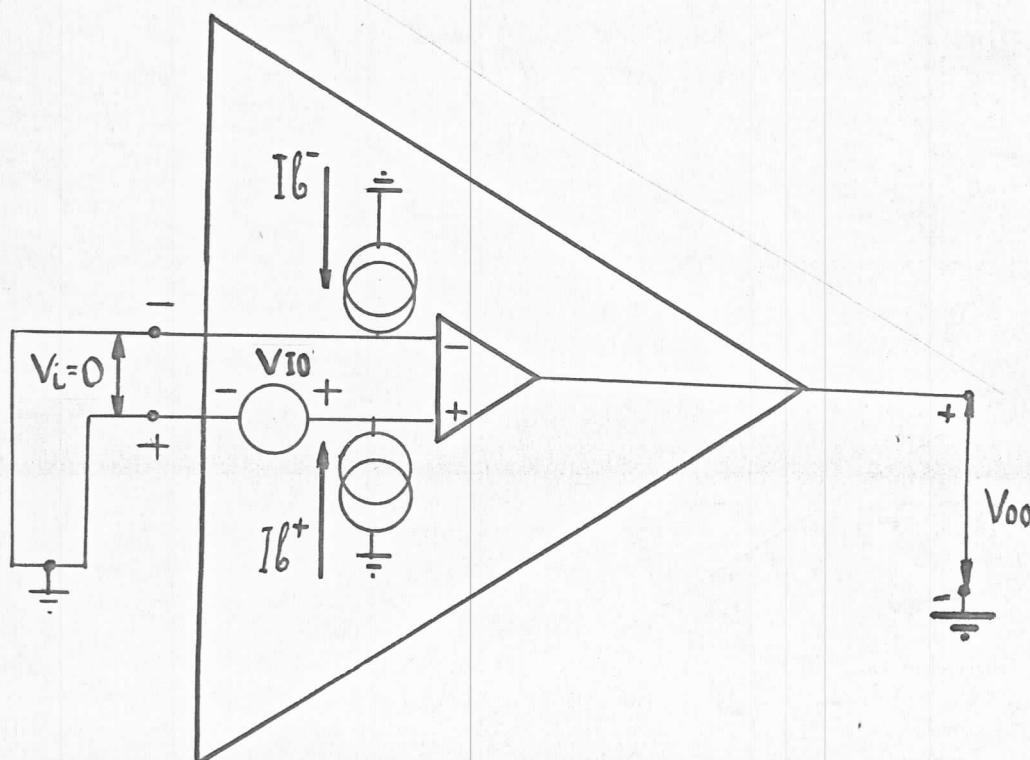
U tekstu su impedanse označene slovima R kao da je reč samo o aktivnim, omskim otporima. Većina autora / i tvorničkih kataloga/ čini to sa namerom da se podvuče karakter ovih impedansi, koje praktično i jesu samo aktivni, omski otpori. Teži se da se induktivni i kapacitivni delovi impedansi što više smanje, jer daju razne nepoželjne efekte.

#### 2. 1. 4. Struje pobude, razdešenost i klizanje

Kada je na ulazu idealnog operacionog pojačavača doveden napon od 0 V, tj. kada su ulazi  $/+$  i  $/-$  kratko spojeni, na izlazu je napon, takodje, 0 V. Pri tome su i struje koje ulaze u svaki od ulaza jednake nuli.

Ovako bi se ponašao idealni operacioni pojačavač.

Kod realnog operacionog pojačavača situacija je drugačija. Da bismo na izlazu operacionog pojačavača dobili 0, nije dovoljno samo kratko spojiti  $/+$  i  $/-$  ulaz. Struje, koje je potrebno uvesti u svaki od ulaza da bi se pri kratko spojenim ulazima na izlazu stvarno dobila nula, nazivaju se strujama pobude. Napon, koji je potreban da se dovede izmedju dva ulaza da bi se na izlazu operacionog pojačavača dobila nula, naziva se naponom razdešenosti. Realni operacioni pojačavač možemo prikazati kao na slici 21. On se sastoji od idealnog operacionog pojačavača i generatora struje pobude  $I_b^+$  i  $I_b^-$ , kao i generatora napona razdešenosti  $V_{10}$ .



Možemo definisati i struju razdešenosti  $I_{10}$ . Ova struja definisana je kao  $I_{10}=Ib^+ - Ib^-$ . Ove struje i napon mogu varirati od primerka do primerka operacionog pojačavača, čak i ako su im tip i proizvodjač isti. Ni smer ovih struja, ni polaritet napona, nisu unapred odredjeni. Ovo je potrebno eksperimentalno odrediti. Kod savremenih pojačavača ugradjeni su posebni izvodi koji omogućavaju kompenzaciju ovih nedostataka. Tako je i sa pojačavačem FAIRCHILD MA 747 DC, koji je korišćen u radu, a o čemu će biti reči kasnije. Čak i kod starijih tipova, koji nemaju ovu mogućnost, podešavanja se, u principu, lako vrše.

Problem prilikom kompenzacije razdešenosti pretstavlja i to što ona nije konstantna, već zavisi od temperature ambijenta, u kojem se nalazi konkretni pojačavač.

Napon razdešenosti, struja razdešenosti i struje pobude menjaju se - klize, u zavisnosti od temperature, i time izazivaju promenu - klizanje izlaznog napona. Ove promene - klizanja variraju od primerka do primerka. Nažalost, gotovo po pravilu, ove promene nisu linearne funkcije temperature, a ponekad te funkcije nisu čak ni jednoznačne. Moguće je, naprimjer, da sa porastom temperature napon razdešenosti prvo raste pa zatim opada. Isto važi i za struje pobude i razdešenosti.

O ovoj pojavi neće više biti reči, jer je u toku rada temperatura ambijenta smatrana konstantnom.

Zbog navedenih razloga / nelinearnost, nejednoznačnost/, kod korišćenja tvorničkih podataka mnogo je bolje koristiti se podacima sa krivih koje pokazuju promenu posmatrane veličine, nego numeričkim podacima.

I sve ostale karakteristike / frekventna, izlazna i ulazna impedansa, šum itd./ pokazuju zavisnost od temperature.

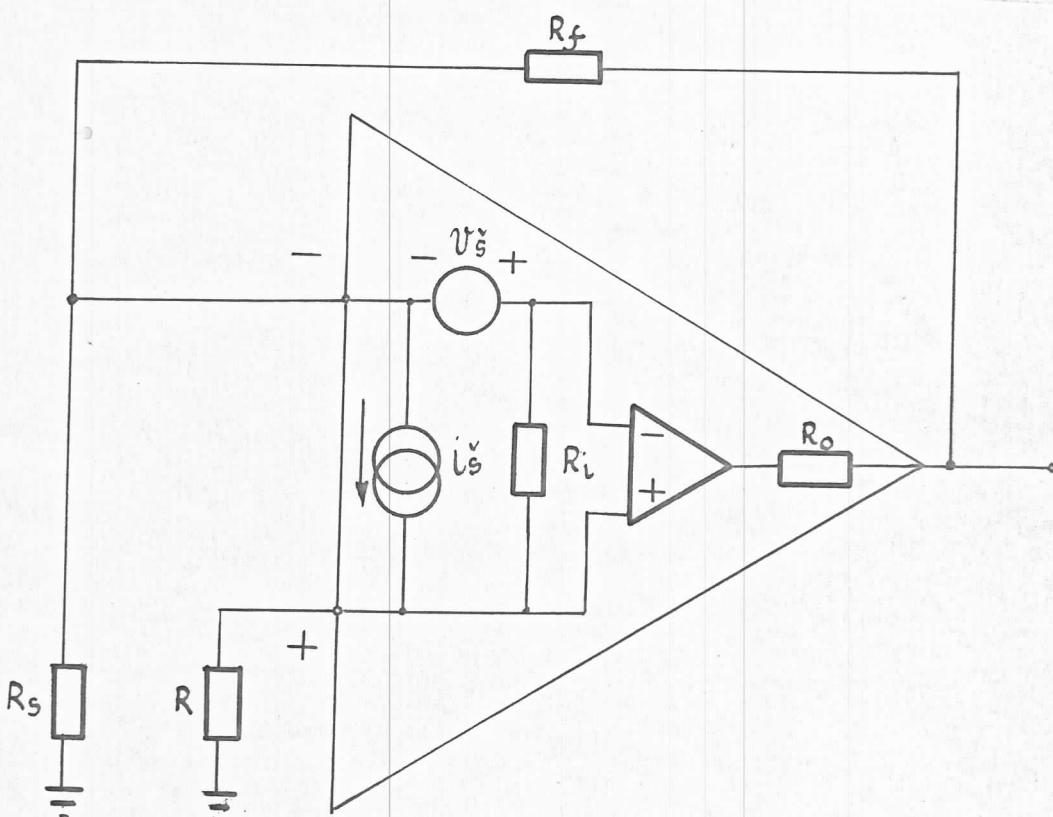
Promena svih karakteristika za posmatrani pojačavač FAIRCHILD MA 747 DC je relativno mala, unutar opsega od  $15^\circ$  do  $30^\circ$  C. To je razlog zbog čega ove promene nisu obračunate.

## 2. 1. 5. Šum

Šum je još jedna osobina realnog operacionog pojačavača. Ovo je negativna osobina pojačavača i sve tvornice-proizvodjači se trude da njen uticaj što više smanje. Pod šumom podrazumevamo svaki signal koji se pojavi na izlazu pojačavača, a da nije postojao

na ulazu. Ova definicija važi za pojačavače / invertujući, neinvertujući, diferencijalni, sabirajući /. Može se dodati još jedna definicija: pod šumom podrazumevamo svaki onaj signal koji se pojavi na izlazu a nije nastao uobičavanjem ulaznog signala. Ova definicija odnosi se na tzv. uobičavače / integrator, diferencijator, logaritamski pojačavač-uobičavač/.

Ekvivalentni prikaz izvora šuma dat je šematski na slici 22. To je generator napona šuma  $/V_s/$  i generator struje šuma  $/I_s/$ , vezan redno, odnosno paralelno sa ulazom idealnog operacionog pojačavača.



Sl. 22

Na slici su i otpornici  $R_f$ ,  $R_s$  i  $R$ , tako da ova slika ujedno predstavlja i opšti slučaj pojačavača. Ovi otpori takođe igraju ulogu u pojavi šuma.

Šum koji se dobija u strujnom generotoru dominantan je kada operacioni pojačavač radi sa velikim ulaznim impedansama, pa je šum koji daje naponski generotor zanemarljiv. Šum koji generiše naponski generotor, dobija se pri kratko spojenom ulazu kada je strujni generator šuma zanemarljiv. Šum koji se javlja na otpor-

nicima je takozvani termički šum, koji bi postojao i kada sam pojačavač ne bi unosio nikakav šum.

Šum na ulazu ovako predstavljenog, realnog operacionog pojačavača / slika 22/ može se izraziti na sledeći način:

$$V_{iS}^2 = 4 K T R_e + I_S^2 R_e^2 + V_S^2 \dots / 2.6/ [1.; 3.]$$

K - Boltzmanova konstanta

T - temperatura u °K

R<sub>e</sub> je ekvivalentni otpor i za kolo na slici 22 on predstavlja :

$$R_e = R + \frac{R_s R_f}{R_s + R_f} \dots 2.7 / \text{u ostalim slučajevima se izračunava} /$$

Prvi član je termički šum i potiče od otpornosti na ulazu, drugi član potiče od generatora struje šuma, a treći član od naponskog generatora šuma.

## 2. 1. 6. Propusni opseg

Definišu se dva propusna opsega frekvencije kod realnih operacionih pojačavača / kod idealnih, navedeno je u 1. poglavlju, propusni opseg je beskonačno velik/.

Jedinični propusni opseg pokazuje interval učestanosti u kojoj je naponsko pojačanje veće ili jednako 1 / 0 db/. Ovaj opseg se prostire od 0Hz do f<sub>T</sub>, gde je f<sub>T</sub> učestanost za jedinično pojačanje / slika 15 u ovom poglavlju /.

"Propusni opseg od 3 db" prostire se od 0Hz do f<sub>P</sub>, prelomne frekvencije na kojoj pojačanje A<sub>0</sub> /f/ opadne za 3 db u odnosu na pojačanje A<sub>0</sub> - pojačanje za jednosmerni signal / na vrednost A<sub>0</sub> /√2/ - / slika 15/.

Primenom povratne sprege u kolu sa operacionim pojačavačem možemo jedinični propusni opseg menjati, ali je on uvek manji od propusnog jediničnog opsega samog operacionog pojačavača pri otvorenoj petlji / bez povratne sprege/. Naprimer, propusni opseg operacionog pojačavača FAIRCHILD MA 747 DC, koji je ispitivan pri otvorenoj petlji, iznosi oko 1 MHZ / od 0 - 1 MHZ - tvornički podatak /.

Kod pojačavača sa nagibom amplitudne karakteristike od 6 db/oktavi možemo uočiti sledeću zavisnost :

$$f_T = A_0 f_P = A /f /f \dots / 2.8/$$

$f_T$  - granična frekvencija za jedinično pojačanje

$A_o$  - pojačanje za jednosmerni signal

$A/f$  - pojačanje na nekoj frekvenciji  $f$

$f$  - frekvencija za dato pojačanje  $A/f$

$f_p$  - Prelomna učestanost / učestanost na kojoj  $A/f$  opadne za 3 db u odnosu na  $A_o$ .

Sve ove veličine predstavljene su na slici 15.

## 2. 1. 7. Maksimalni dozvoljeni nivoi

Sama struktura realnih operacionih pojačavača nameće izvesna organičenja za vrednosti napona i struja, kao i uslove koji se moraju poštovati, kako ne bi došlo do oštećenja integrisanih kola. Ovi nivoi / maksimalno dozvoljene vrednosti / variraju od primerka do primerka, u zavisnosti od tehnologije koju pojedine tvornice koriste za proizvodnju.

Logično, ove karakteristike se ne mere, nego se u radu moramo pridržavati tvorničkih vrednosti.

Ovi maksimalno dozvoljeni nivoi, koje moramo poznavati, su sledeći:

a/- Maksimalni napon napajanja  $V_{SM}$

b/- Maksimalni ulazni napon  $V_{IM}$

c/- Maksimalni diferencijalni ulazni napon  $\Delta V_{IM}$

d/- Maksimalni izlazni napon  $V_{OM}$

e/- Maksimalna izlazna struja  $I_{OM}$

## 2. 1. 8. Potiskivanje zajedničkog signala - PZS

Ova pojava javlja se kod kola koja rade kao diferencijalni pojačavači / pojačavaju signal koji postoji izmedju dva ulaza/. Zajednički signal  $V_c$  koji postoji na oba ulaza i čija je vrednost

$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} \dots 2.9$ , treba da bude potisnut, odnosno da ne utiče na izlazni signal. Tada bi izlazni signal bio kao kod idealnog operacionog pojačavača:

$$V_o = A / V_2 - V_1 / \dots 2.10$$

Kako pojačanja operacionog pojačavača kroz  $/+$  i  $/-$  ulaz, posmatrana zasebno, nisu potpuno ista, to će se odraziti i na pojavu greške u izlaznom signalu :

$$V_o = A / V_2 - V_1 / + A \cdot \frac{V_1 + V_2}{2 \text{ PZS}} \dots \dots 2.11$$

gde je PZS potiskivanje zajedničkog signala. Ono se obično daje u decibelima i iznosi od 70 do 100 db. Ova pojava ima značaj samo kod diferencijalnih i neinvertujućih pojačavača. Kod invertujućeg pojačavača i kod uobičavača nema značaja, jer je jedan od ulaza uzemljen.

## 2. 1. 9. Brzina prebacivanja

Brzina prebacivanja je maksimalna brzina promene izlaznog napona koju može postići operacioni pojačavač a da ne dodje do izobličenja. Pod izobličenjem se na ovom mestu smatra svako vidljivo otstupanje izlaznog signala od ulaznog signala i to kako po obliku / amplitudi/ tako i po fazi / fazno kašnjenje/. Ovo ograničenje potiče od kapaciteta u samom operacionom pojačavaču i od uslova, struja i napona, pod kojima se ovi kapaciteti pune. Ova brzina daje se obično kao maksimalna moguća promena izlaznog napona u jedinici vremena / Za MA 747 DC iznosi od 0,3 do 0,5 V/ $\mu$ s/.

Ovo stavlja ograničenje na maksimalni izlazni napon i njegovu frekvenciju. Ispitivani pojačavač MA 747 DC, naprimjer, može da na frekvenciji od 1 MHZ izlazni napon od 0,3 do 0,5 V, a da oblik signala ne bude izobličen.

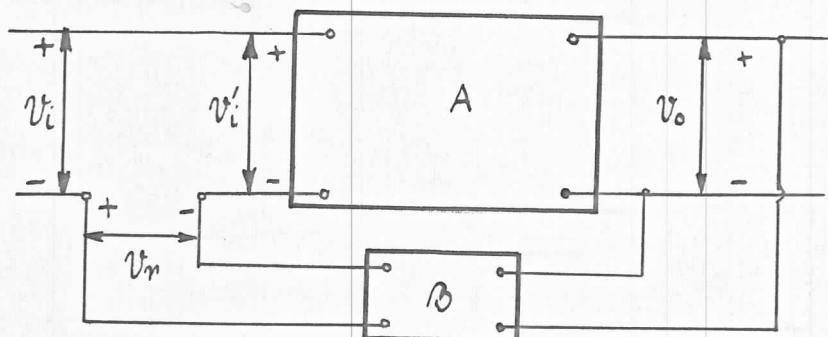
Na brzinu prebacivanja utiče takođe i kapacitivnost u spoljašnjem kolu.

## 2. 2. Kola sa realnim operacionim pojačavačem

### 2.2.1. Pojačanje pojačavača. Negativna povratna sprega

Kod pojačavača sa idealnim operacionim pojačavačem /pojačavač sa povratnom spregom/ pojačanje je zavisilo samo od otpora u kolu povratne sprege. U stvarnosti pojačanje zavisi i od pojačanja samoga operacionog pojačavača i povratne sprege primenjene u konkretnom slučaju.

Analiza osobina pojačavača može se izvršiti pomoću uopštjenog kola pretstavljenog na slici 23.



Sl. 23

Sa  $A$  je označeno pojačanje nekog pojačavača, a sa  $\beta$  kolo reakcije.

Sa slike 23 sledi da je :

$$V_o = A V'_i \quad \dots \dots 2.12$$

gde je napon na ulazu u pojačavač

$$V'_i = V_i + V_r \quad \dots \dots 2.13$$

Napon  $V_r$  ima vrednost :

$$V_r = \beta V_o \quad \dots \dots 2.14$$

Faktor  $\beta$  je faktor povratne sprege koji pokazuje koji deo izlaznog napona  $V_o$  se vraća na ulaz.

Iz jednačine 2.12. sledi :

$$V_o = A V'_i = A / V_i + V_r / \quad \dots \dots 2.15$$

$$V_o / 1 - \beta A = AV_i \dots 2.16$$

Odavde je pojačanje pojačavača sa reakcijom / pojačanje kola sa slike 23 / :

$$A_r = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 - A\beta} \dots 2.17$$

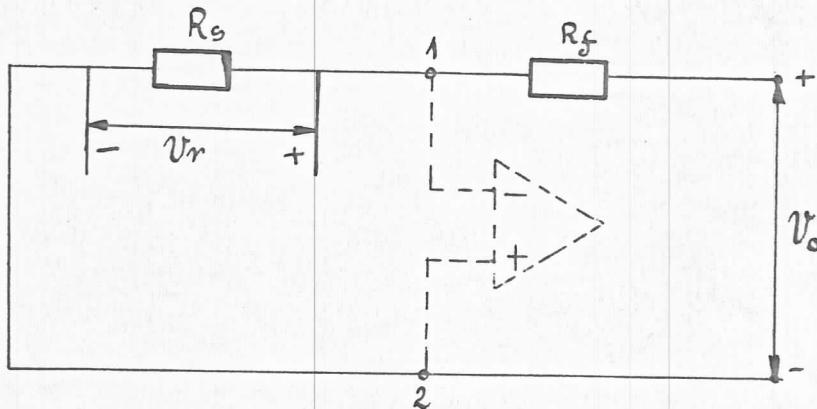
Izraz  $f(\omega) = 1 - \beta A$  naziva se funkcija povratne sprege. Ako je modul ove funkcije  $|f(\omega)| > 1$  sprega je negativna, ako je  $|f(\omega)| < 1$  tada je pozitivna.

### 2.2.2. Pojačanje pojačavača sa realnim operacionim pojačavačem

Kolo sa realnim pojačavačem realizuje se kao i kolo sa idealnim operacionim pojačavačem. Šema veza data je na slikama 8 i 9 u 1. glavi / invertujući i neinvertujući operacioni pojačavač/. Povratna sprega realizovana je otporima  $R_s$  i  $R_f$ . Faktor povratne sprege za invertujući i neinvertujući pojačavač iznosi :

$$\beta = \frac{R_s}{R_f + R_s}$$

Ovaj izraz dobijamo sa slike 24.



Sl. 24

Slika pokazuje koji deo izlaznog napona se vraća na ulaz. Usvojena je pretpostavka o idealnom pojačavaču - struje koje ulaze u pojačavač su jednake nuli. Tada struja teče samo kroz otpore  $R_f$  i  $R_s$ , pa imamo situaciju kao na slici.

Tada je :

$$V_r = \frac{R_s}{R_f + R_s} V_o \dots 2.18$$

$$V_r = \beta V_o \quad \dots \dots 2.19$$

$$\beta = \frac{R_s}{R_f + R_s} \quad \dots \dots 2.20$$

Ovo pod uslovom da su otpori  $R_f$  i  $R_s$  manji od reda veličine ulazne impedanse  $R_i$  operacionog pojačavača, što se uvek može postići njihovim izborom. U protivnom, mora se uzeti u obzir i ulazna impedansa pa se faktor povratne spregе određuje iz:

$$\frac{1}{\beta} = \left/ 1 + \frac{R_f}{R_s} \right/ \left/ 1 + \frac{R_s \cdot R_f}{R_i / (R_f + R_s)} \right/ \dots \dots 2.21 \quad 1.$$

Izraz 2.21 dobija se na sličan način kao i izraz 2.20, ali se u obzir uzima i ulazna impedansa  $R_i$ .

Iz jednačine za pojačanje sa povratnom spregom / jednačina 2.17/ imamo:

$$A_S = \frac{A / f /}{1 - \beta A / f /} \quad \dots \dots / 2.17 /$$

$A / f /$  je pojačanje operacionog pojačavača sa otvorenom petljom. Naglašeno je da i ono zavisi od frekvencije.

Ova zavisnost data je jednačinom 2.22

$$A / f / = \frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_p}} \quad \dots \dots 2.22$$

za pojačavač sa padom pojačanja od 6 db/oktavi.

$A_0$  je pojačanje na frekvencijama  $f \ll f_p$  / prelomna/

$A / f /$  pojačanje na frekvencijama  $f > f_p$

Za frekvenciju  $f \gg f_p$  izraz se može uzeti kao aproksimacija izraza 2.22 :

$$A / f / = A_0 / -j \frac{f_p}{f} / \quad \dots \dots 2.23$$

Pre nego što uvrstimo izraz 2.23 u 2.17, izvršimo još neke izmene u izrazu 2.17. Ove izmene vrše se sa ciljem da se dobiće jednačina pogodna za praktične proračune u slučaju operacionih pojačavača.

Pojačanje pojačavača sa idealnim operacionim pojačavačem iznosilo je / računalo se / :

$$A_r = \frac{R_f + R_s}{R_s} = \frac{1}{\beta} \quad \text{za neinvertujući pojačavač}$$

$$A'_r = - \frac{R_f}{R_s} \quad \text{odakle sledi} - / A'_r - 1 / = \frac{1}{\beta} \quad \text{za invertujući pojačavač.}$$

Tada je :  $A_r \cdot \beta_A = \beta_A / A'_r - 1 / = -1$

Uvrštavanjem ovoga u jednačinu 2.17 dobija se :

$$A_s = \frac{A/f}{1 - \beta_A / f} \quad \frac{\beta_A r / A/f}{1 - \beta_A / f} \dots \dots 2.24 \text{ za neinvertujući}$$

$$A'_s = \frac{\beta_A / A'_r - 1 / \cdot A/f}{1 - \beta_A / f} \dots \dots 2.25 \text{ za invertujući po jačavač}$$

Posle sredjivanja izraza :

$$A_s = \frac{A_r}{1 - \frac{1}{\beta_A / f}} \dots \dots 2.26 \text{ za neinvertujući}$$

$$A'_s = \frac{A'_r - 1}{1 - \frac{1}{\beta_A / f}} \dots \dots 2.27$$

Odnosno za  $|A'_r| \gg 1$

$$A'_s = \frac{A'_r}{1 - \frac{1}{\beta_A / f}} \dots \dots 2.28 \text{ za invertujući}$$

Uvrstimo sada u jednačinu 2.26, odnosno u 2.28, izraz 2.23

$$A_s = \frac{A_r}{1 - \frac{-j}{\beta_{A_0} \frac{f_p}{f}}} = \frac{A_r}{1 + j \frac{f}{\beta_{A_0} f_p}} \dots \dots 2.29$$

$$A'_s = \frac{A'_r}{1 - \frac{j f}{\beta_{A_0} f_p}} \dots \dots 2.30$$

Moduo ovih izraza 2.29 i 2.30 je :

$$|A_s| = \frac{|A_r|}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{\beta_{A_0}^2 f_p^2}}} \dots \dots 2.31$$

Dobija se izraz 2.31 za pojačanje pojačavača sa povratnom spregom  $A_s$ , koji uzima u obzir i stvarno pojačanje operacionog pojačavača i povratnu spregu.

Odavde vidimo da je za idealni pojačavač /  $A_o = \infty$  / pojačanje konstantno na svim frekvencijama.

Realni pojačavač ovo ne može realizovati, pojačanje mu opada sa frekvencijom. Prelomna frekvencija pojačavača sa povratnom spregom  $f_p r$  dobija se iz jednačine 2.31.

Kada  $A_S$  / pojačanje sa povratnom spregom/ opadne za

$$3 \text{ dB} / \frac{1}{\sqrt{2}} / :$$

$$\sqrt{1 + \frac{f_{pr}^2}{\beta^2 A_o^2 f_p^2}} = \sqrt{2} \quad \dots \dots 2.32 \text{ sledi}$$

$$\frac{f_{pr}^2}{f_p^2 \beta^2 A_o^2} = 1 \quad \dots \dots 2.33$$

$$f_{pr} = f_p \beta A_o \quad \dots \dots 2.34$$

Pojačavači realizovani u ovom radu proračunavani su preko izraza za idealni operacioni pojačavač iz 1. glave, uz ograničenja koja su navedena u ovom odeljku.

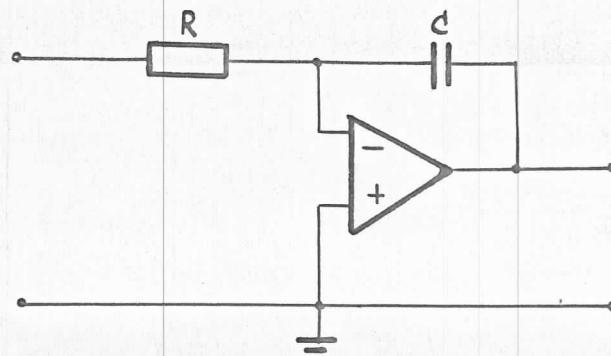
Ograničenja se odnose na amplitudnu frekventnu karakteristiku. Kod idealnog operacionog pojačavača propusni opseg je bio beskonačan i pojačanje konstantno. Kod realnog, propusni opseg je ograničen i postoji prelomna tačka  $f_p$ , kao i zavisnost pojačanja od frekvencije.

## 2. 2. 3. Uobičavači sa realnim operacionim pojačavačem

Integrator i diferencijator, pojačavači koji spadaju u grupu uobičavača, realizuju se kao da je u kolo povezan idealni operacioni pojačavač. Realizacija je veoma jednostavna i kasnija merenja i rezultati ukazuju na veoma mala odstupanja prouzrokovana realnim pojačavačem u kolu.

### a/- Integrator

Način rada integratora dat je u prvoj glavi / Kola sa idealnim operacionim pojačavačem/. I šema veza odgovara šemi sa slike 13/ sl. 25/



Sl. 25

Za analizu ovoga kola poslužiće jednačina 1.30, koja daje vezu izmedju ulaznog i izlaznog signala :

$$V_o = - \frac{1}{RC} \int V_i dt \dots 1.30$$

Iz ove jednačine izvrši se detaljna analiza odnosa ulaznog i izlaznog signala za različite oblike ulaznog signala / sinusni, testerasti, kvadratni /. Slika 26 pokazuje ulazne i izlazne signale dobijene matematičkom analizom. U praktičnom radu eksperimentalno su dobijeni gotovo istovetni rezultati / slike 48, 49 i 50, 3. poglavljje /.

Pravougaoni napon / signal /

Iz  $V_o = - \frac{1}{RC} \int V_i dt \dots 1.30$

sledi  $V_o = - \frac{1}{RC} V_i t$  jer je

$V_i = V_{i \max} = \text{const}$  za pravougaoni signal

/ slika 26 a/

dobija se  $V_o = - \frac{1}{RC} V_{i \max} t \dots 2.35$

odnosno  $V_o = - \frac{1}{RC} V_{i \max} \frac{T}{4} \dots 2.36$

jer izlazni signal dostiže apsolutnu vrednost maksimuma / u odnosu na nulu /

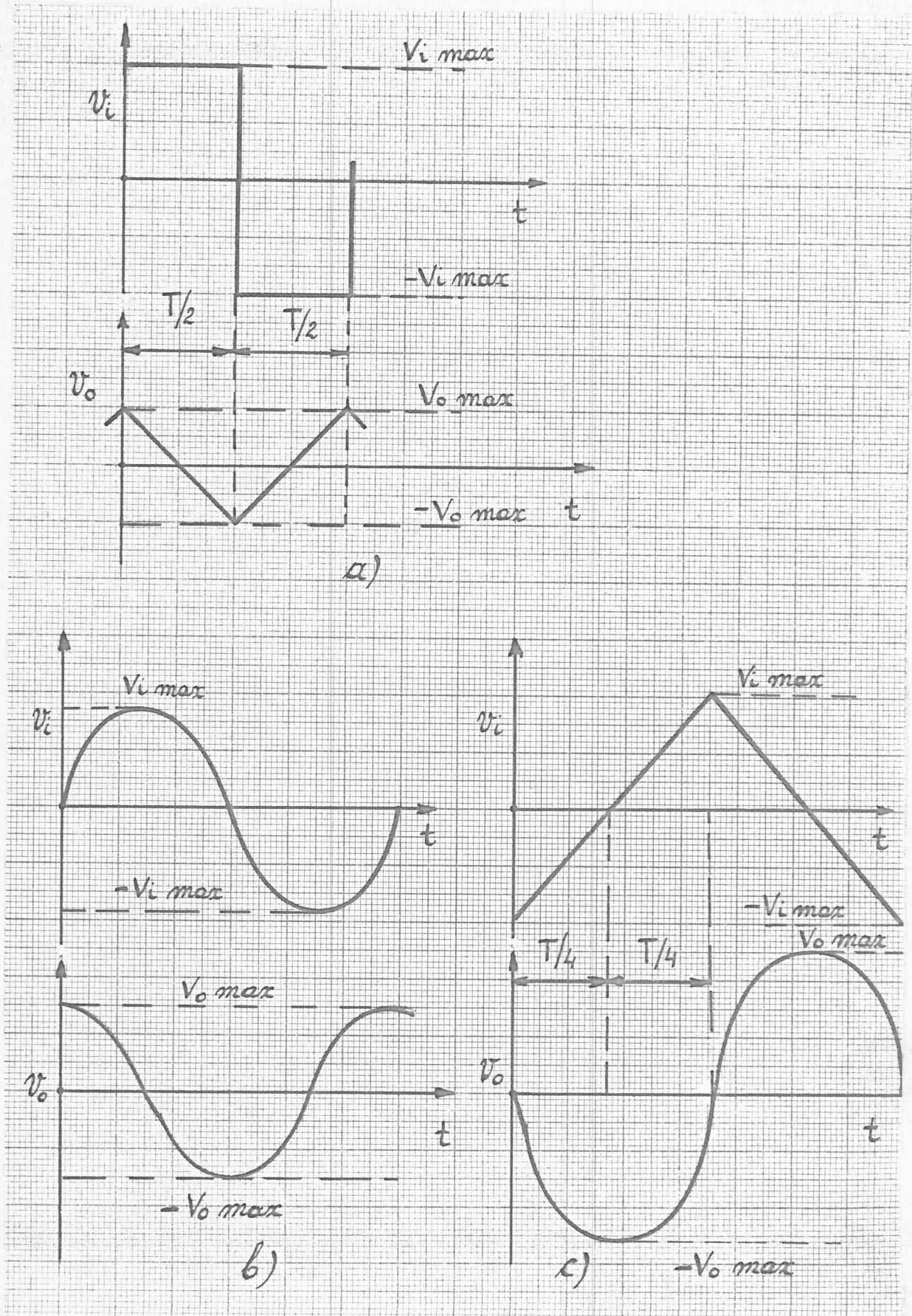
za  $t = \frac{T}{4}$  / T je period,  $T = \frac{1}{f}$  / - / slika 26 a/

$$\frac{V_{o \max}}{V_{i \max}} = - \frac{T}{4RC} = K_1 \dots 2.37$$

je tada odnos maksimalnog ulaznog i izlaznog signala

Sinusni napon / slika 26 b/

$$V_o = - \frac{1}{RC} \int V \sin \omega t dt \dots 2.38$$



Slika 26 : Grafički prikaz različitih ulaznih signala i njihovih integrala

$$V_o = \frac{1}{RC\omega} V \cos(\omega t) \dots 2.39$$

Maksimalnu vrednost ulazni signal ima za  $\sin(\omega t) = 1$ ,  
a izlazni za  $\cos(\omega t) = 1$

$$V_{o \max} = \frac{T \cdot V}{2\pi RC} \dots 2.40$$

$$V_{i \max} = V$$

$$\frac{V_{o \max}}{V_{i \max}} = \frac{T}{2\pi RC} = K_2 \dots 2.41$$

Testerasti signal / slika 26 b /

$$V_i = Kt \dots 2.42$$

$$V_o = - \frac{1}{RC} \int K \cdot t dt \dots 2.43$$

$$V_o = - \frac{1}{RC} \cdot \frac{K t^2}{2} \dots 2.44$$

$$V_{o \max} = - \frac{1}{RC} \cdot K / \frac{T}{4} /^2 \dots 2.45$$

jer izlazni napon postiže maksimum za

$$t = \frac{T}{4} \quad / \text{slika 26 c/}$$

$$V_i \max = \frac{KT}{4} \quad \dots \dots 2.46 \quad / \text{slika 26 c/}$$

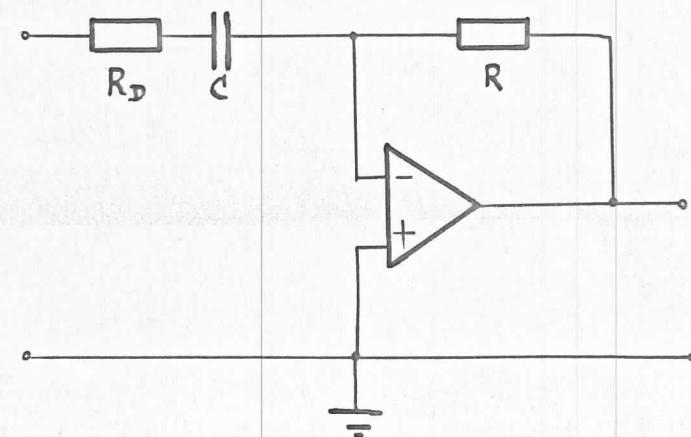
$$\frac{V_o \max}{V_i \max} = - \frac{T}{8RC} = K_3 \quad \dots \dots 2.47$$

Iz ovakve analize dolazi se do kriterijuma koji određuje RC konstantu integratora. Odabere se oblast frekvencije na kojima integrator treba da radi, naprimjer, od 0,5 do 5 KHZ, i RC konstanta se odabere tako da  $RC \approx T$ , gde je  $T = \frac{1}{f}$

Pri ovakovom odabiranju izlazni napon je reda veličine ulaznog napona.

### b/ - Diferencijator

Diferencijatori se realizuju uz pretpostavku o idealnom operacionom pojačavaču. Šema veza slična je šemama sa slike 12 a / 1. poglavljje /. Dopunjena je otpornikom  $R_D$ , koji ne utiče na funkciju samoga diferencijatora i čija će uloga biti kasnije objašnjena / 3. glava - "Merenja i rezultati" /



Analiza odnosa ulaznog i izlaznog signala može se izvršiti na isti način kao i kod integratora. Iz jednačine 1.26 / 1. glava/:

$$V_o = -RC \frac{d V_i}{dt} \quad \dots \dots 1.26$$

traži se odnos ulaznog  $V_i$  i izlaznog  $V_o$  signala za različite oblike ulaznog signala. Praktično, ova analiza nije potrebna, jer je diferenciranje inverzna operacija operaciji integracije, pa su i konstante diferencijacije recipročna vrednost konstanti integracije. Ovo se može pokazati na primeru ulaznog sinusnog signala:

$$V_o = -RC \frac{d V_i}{dt} \quad \dots \dots 1.26$$

$$V_i = V \sin(\omega t) \quad \dots \dots 2.48$$

$$V_o = RC \omega V \cos(\omega t) \quad \dots \dots 2.49$$

Izlazni signal  $V_o$  je maksimalan za  $\cos(\omega t)=1$ , a ulazni za  $\sin(\omega t)=1$ .

$$\frac{V_o \text{ max}}{V_i \text{ max}} = \frac{2\pi RC}{T} = K_4 \quad \dots \dots 2.50$$

a ovo je recipročno vrednost konstante integracije za isti ulazni signal / 2.41/.

Za testerasti ulazni signal ovaj odnos ima vrednost :

$$\frac{V_o \text{ max}}{V_i \text{ max}} = \frac{4 RC}{T} = K_5 \quad \dots \dots 2.51$$

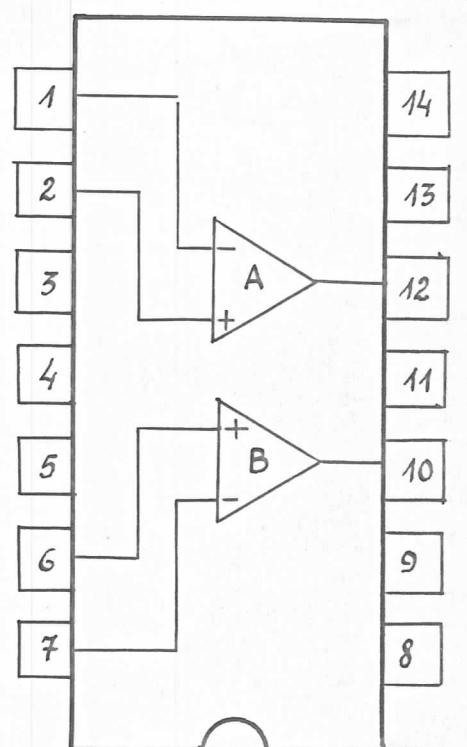
Posebno je interesantan diferencijal četvrtastog signala. Njegova vrednost trebalo bi da je nula. Na slici 55 / 3. glava/ vidi se da to nije tako. Razlog ovome je sledeći : na mestu prelaza pozitivnog dela ove funkcije u negativan deo, funkcija kvadratnog sistema nije definisana - matematičko objašnjenje. Fizički razlog je sledeći: prelaz od pozitivnog ka negativnom delu signala nije trenutni, ne obavlja se u vremenu  $t=0$ . Ovaj prelaz ide po nekoj krivoj i obavlja se za neko vreme  $t \neq 0$ . Pikovi koji se javljaju na izlazu / slika 55, 3. glava/ diferencijal su ove krive. Pikovi koji su na ulaznom signalu, rezultat su povratne sprege ulaz-izlaz i nemaju nikakav uticaj na samu funkciju diferencijatora.

### 3. EKSPERIMENTI SA OPERACIONIM POJAČAVAČEM FAIRCHILD MA 747 DC - MERENJA I OBRADA REZULTATA

#### 3. 1. 1. Karakteristike operacionog pojačavača FAIRCHILD MA 747 DC

Opšti opis ovog pojačavača dat je ovde preko tvorničkih podataka. MA 747 DC je integrисано monolitsko kolo koje sadrži par operacionih pojačavača. Dijagram priključaka dat je na slici 28. Pojačavači su označeni sa A i B.

1. Invertujući ulaz A
2. Neinvertujući ulaz A
3. Izvod za priključivanje potencijometra za razdešenost B pojačavača
4. Napajanje / Vs- /
5. Izvod za priključivanje potencijometra za razdešenost B pojačavača
6. Neinvertujući ulaz B
7. Invertujući ulaz B
8. Izvod za priključivanje potencijometra za razdešenost B pojačavača
9. Napajanje / Vs+ / B pojačavača
10. Izlaz B
11. Izvod koji se ne priključuje
12. Izlaz A
13. Napajanje / Vs+ / A pojačavača
14. Izvod za priključivanje potencijometra za razdešenost A pojačavača



Sl. 28

Ovaj pojačavač predstavlja usavršen tip pojačavača 741, koji proizvode mnoge firme / MOTOROLA, RCA, SGS, ITT, PHILIPS/. Izvesnu prednost daje mu činjenica da ne zahteva kompenzaciju dodavanjem elemenata u spoljašnje kolo, nego je kompenzacija / stalan pad amplitudne karakteristike od 6 db/oktavi / obezbedjena. Ugradjena mu je zaštita od struje kratkog spoja kao i od inverzognog napona napajanja. Pomoću jednog  $10\text{ k}\Omega$  potenciometra lako se reguliše razdešenost.

Za priključivanje ovog potenciometra predviđeni su izvodi 3 i 14, odnosno 5 i 8. Kućište je DIP tipa, paralelopiped dimenzija 18 x 5 x 3,5 mm, plastično sa 14 izvoda. Maksimalni dozvoljeni nivoi, prema tvorničkim podacima, su :

Napon napajanja  $V_S = \pm 22$  V maksimalno i  $\pm 5$  V minimalno

Diferencijalni ulazni napon  $\pm 30$  V maksimalno

Ulagani napon u odnosu na masu  $\pm 15$  V maksimalno

Ako je napon napajanja manji od  $V_S = \pm 15$  V, tada je i ulazni napon jednak naponu napajanja maksimalno.

Temperaturni opseg u kome radi je od  $-65^\circ\text{C}$  do  $+125^\circ\text{C}$ .

Donja tabela daje sledeće podatke / tvorničke/:

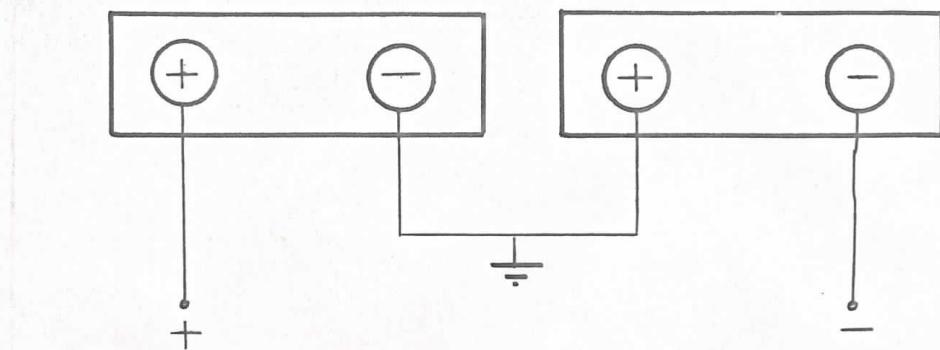
$5 \text{ V} \leq V_S \leq 20 \text{ V}; \quad T = 25^\circ\text{C}$ , ako nije drugačije označeno

Parametar	Uslovi	Minimum	Tipično	Maksimum	Jedinice
Napon razdešenosti			0,8	3,0	$\text{mV}$
Klizanje napona razdešenosti				15	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Struje pobude			30	80	$\text{nA}$
Struja razdešenosti			3	30	$\text{nA}$
Klizanje struje razdešenosti				0,5	$\text{nA}/^\circ\text{C}$
Disipacija	$\pm 20\text{V}$		80	150	$\text{mW}$
Ulagna impedansa	$\pm 20\text{V}$	1	6		$\text{M}\Omega$
Brzina prebacivanja	$\pm 10\text{V}$	0,3	0,7		$\text{V}/\mu\text{s}$
Zajedničko potiskivanje	$\pm 20\text{V}$ $\pm 15\text{V}$	80	95		$\text{dB}$
Ilagna impedansa				300	$\Omega$

Tabela 1

Za napajanje MA 747 DC potrebno je, kao i kod većine ostalih operacionih pojačavača, imati izvor sa razdvojenim pozitivnim i negativnim polom. Ovo je realizovano korišćenjem dva ispravljača

IP 28 HEATHKIT / 30 V, 1 A / vezanih kao na slici 29.



Sl. 29

U gotovo svim eksperimentima i merenjima napon napajanja je bio  $V_s = \pm 15$  V.

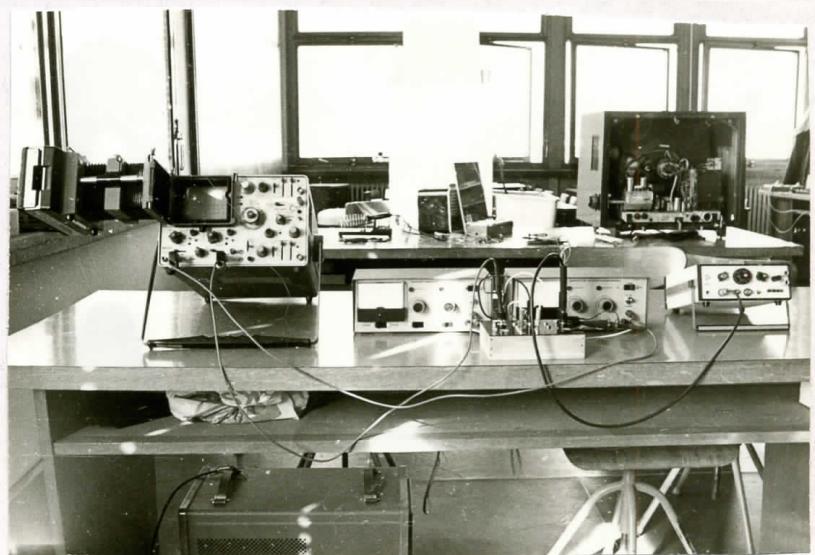
### 3. 1. 2. Merni uredjaji

Merni komplet sastoji se od sledećih uredjaja:

1. Maketa na kojoj su realizovana sva posmatrana kola, prema potrebi
2. Dva ispravljača IP 28 HEATHKIT / 30 V, 1 A /
3. Osciloskop 454 TEKTRONIX / Kamera C-3000 /
4. Multimer UNIGOR 6e GOERZELEKTRO
5. Generator signala EXACT VCF 122

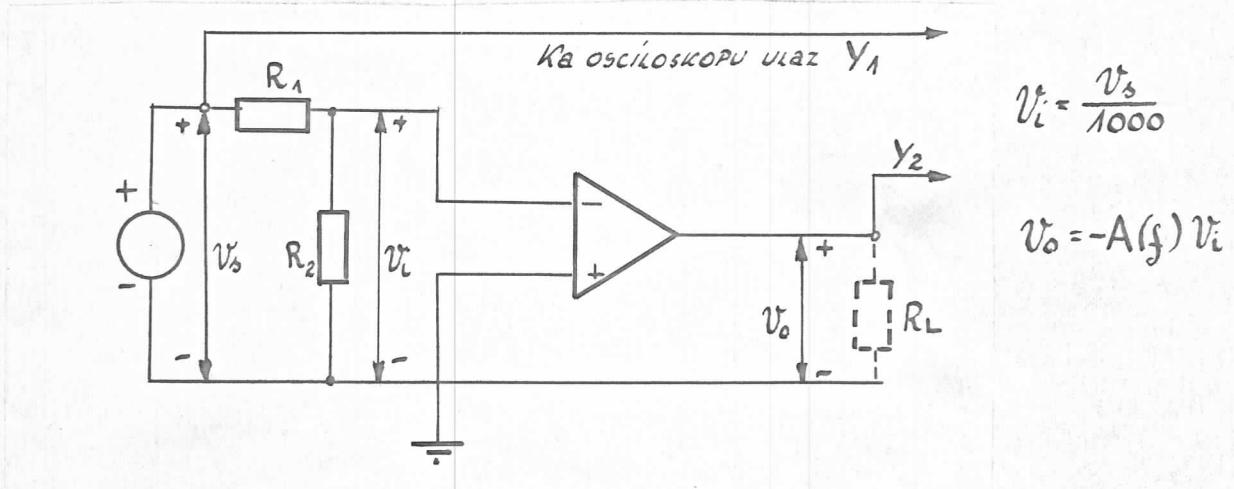
Priloženi oscilogrami / ilustracija funkcije pojedinih realizovanih kola / su kopije dobijene na klasičan način sa originalnog polaroidnog snimka.

Sl. 30a: prikazuje radno mesto, uredjaje korišćene u radu i njihovo povezivanje



### 3. 1. 3. Pojačanje operacionog pojačavača A /f/ bez povratne sprege. Amplitudna karakteristika.

Na slici 30 prikazano je kolo pomoću kojega se meri ovo pojačanje. Na ulaz pojačavača FAIRCHILD MA 747 DC vezan je razdelnik, koji napon signala doveden sa generatora signala deli u odnosu 1 : 1000. Otpornici imaju vrednost  $R_1 = 1M\Omega$ , a  $R_2 = 1K\Omega$ . Razdelnik je potreban zbog velikog pojačanja operacionog pojačavača. Rezultati se posmatraju na osciloskopu TEKTRONIX sa dva ulaza. Na prvi ulaz /  $Y_1$  / dovodi se napon  $V_s$  sa generatora / uzet sa ulaza pre razdelnika/, što kasnije treba uzeti u obzir i obračunati. Na drugi ulaz osciloskopa /  $Y_2$  / dovodi se napon sa izlaza operacionog pojačavača / pojačani signal  $V_o$ .



Sl. 30

Na osciloskop dovodimo signal  $V_s$  a ne  $V_i$ . Razlog ovome je što je  $V_i$  veoma malo, naročito na nižim frekvencijama, ispod 1 m V, što se na osciloskopu ne može pratiti.

Pojačanje se dobija kao odnos izlaznog maksimalnog napona  $V_{o \max}$  i ulaznog maksimalnog napona  $V_{i \max}$ .

$$A = \frac{V_{o \max}}{V_{i \max}}$$

Rezultat merenja dat je na grafiku 1. Grafiku je pridodata i tabela sa izmerenim vrednostima. Merenje nije izvršeno duž cele amplitudne frekventne karakteristike iz tri razloga :  
 a/ iznad frekvencije od 100 KHZ javlja se šum koji ometa merenje;  
 b/ ispod frekvencije od 30 HZ generator signala sa razdelnikom od 1 : 1000 nije u stanju da proizvede dovoljno mali signal na ulazu,

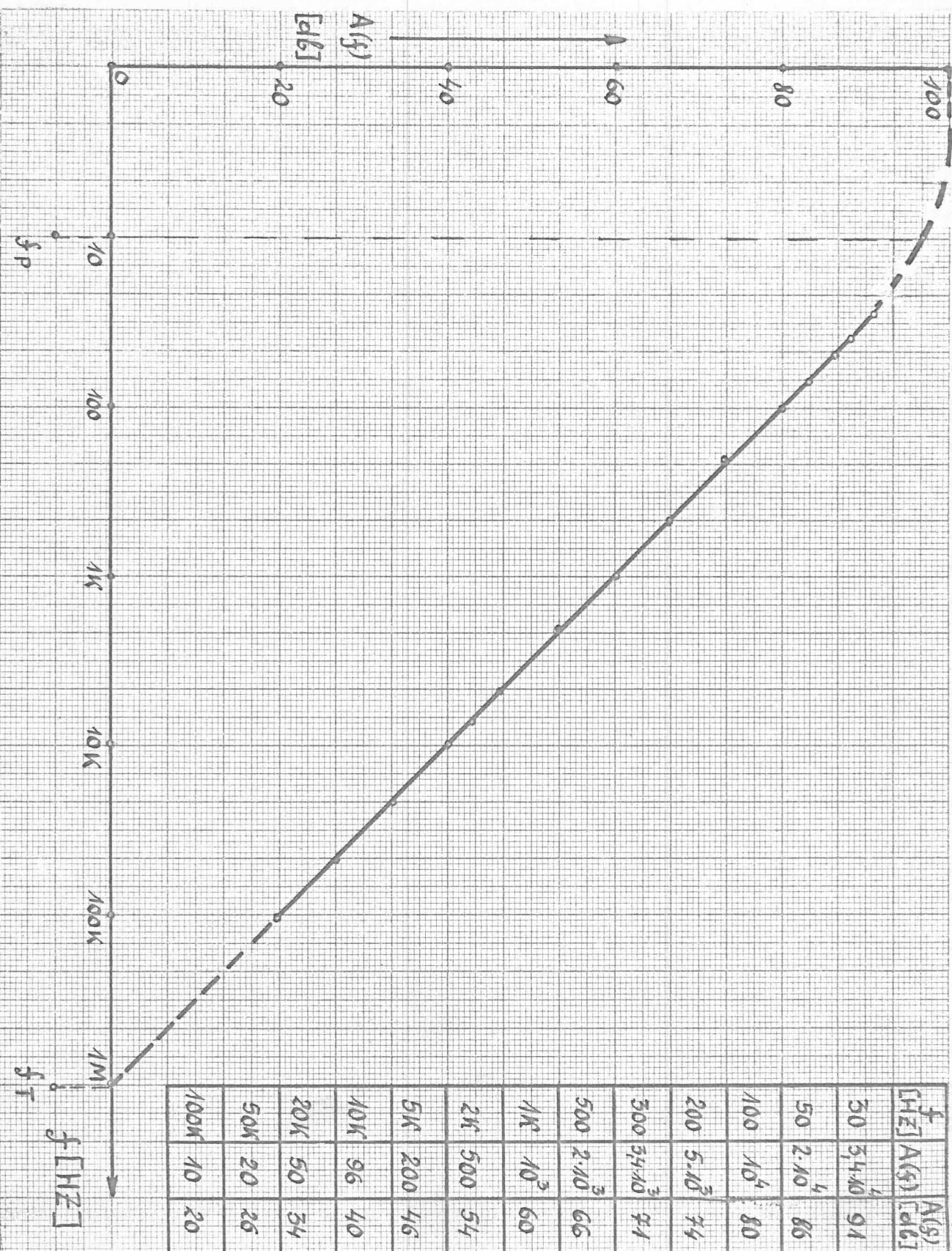


Tabela  
Grafik

2  
1

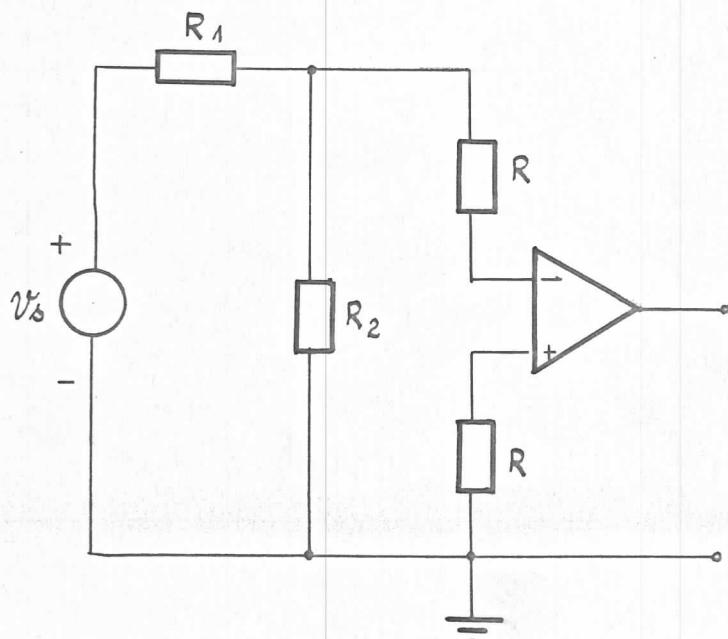
koji izlazni signal ne bi doveo u saturaciju;

c/ na frekvencijama manjim od 30 Hz pojačanje  $A/f$  je veoma veliko, između  $3 \cdot 10^4 - 10^5$  puta, te se toliko povećavaju i sve spoljašnje smetnje / indukovani naponi, pre svega od mreže pa, čak, i od statickog nanelektrisanja/.

Mereni deo krive označen je punom linijom. Isprekidana linija predstavlja amplitudnu karakteristiku rekonstruisanu na osnovu : izraza  $A_{\text{f}} = A(\text{f}) \cdot f$ , izmerenog dela / od 30 Hz do 100 000 Hz/ i tvorničkih podataka.  $A_0$  je pojačanje sa otvorenom petljom u ravnom delu amplitudne karakteristike, pre prelomne tačke  $f_p$ .  $A_0$  iznosi oko 100 000 / 100 db/, a  $f_p$  oko 10 Hz. Propusni opseg je 1 MHz. Napon napajanja  $V_s = \pm 15$  V stalan je i za sva ostala merenja, ukoliko nije posebno drugačije označeno.

### 3. 1. 4. Ulagna impedansa

Za merenje ulazne diferencijalne impedanse /  $R_i$ / koristi se kolo sa slike 31. Kolo je isto sa kolom na slici 30, ima isti razdelnik napona na ulazu. Dodata su dva identična otpornika  $R$  u seriji sa invertujućim i neinvertujućim ulazom operacionog pojačavača.



Sl. 31

Merenje se svodi na merenje izlaznog napona  $V_o'$  sa dodatnim  $R$  i merenja izlaznog napona  $V_o$  bez  $R$  otpora dodatih u kolo. Otpori se biraju tako da su reda veličine ulazne impedanse, tj. njenog aktivnog dela  $R_i$ .

Njihova vrednost iznosila je  $R = R_i = 1 \text{ M}\Omega$ .

Merenje se može izvršiti i sa jednim otporom, ali tada na ulazu nema simetrije, pa dolaze do izražaja smetnje vezane za struje pobude i razdešenost.

Sa šeme / slika 31 / sa priključenim  $R$  u kolu i bez  $R$  u kolu dobijamo relaciju :

$$V_o' = \frac{R_i}{2R + R_i} V_o$$

$$R_i = 2R \frac{V_o'}{V_o - V_o'}$$

Ulagana impedansa zavisi blago od frekvencije / opada joj vrednost ka višim frekvencijama /.

Ova se zavisnost može zanemariti na frekvencijama nižim od 100 KHZ. Ulagana impedansa data je kao srednja vrednost iz više merenja na frekvencijama : 200 HZ, 2000 HZ, 20 000 HZ.

Rezultati su dati tabelarno :

$f [\text{HZ}]$	$V_o [\text{V}]$	$V_o' [\text{V}]$	$R_i [\text{M}\Omega]$
200	4,6	3,45	6
2000	0,45	0,325	5,3
20 000	1	0,72	5,1
$R_i = 5,5 \text{ M}\Omega$			

Tabela 3

### 3. 1. 5. Izlagna impedansa

Meri se pomoću kola koje je identično sa kolom sa slike 30, samo mu je pridodat radni otpornik  $R_L$ . Ovaj otpor se bira tako da mu je red veličine isti sa izlagnom impedansom, što procenimo na osnovu tipa operacionog pojačavača ili na osnovu tvorničkih podataka. U ovom merenju  $R_L$  je  $1\text{K}\Omega$ , odnosno  $2\text{K}\Omega$ .

Merenje se svodi na merenje naponskog pojačanja  $A/\infty/\text{bez } R_L / R_o = \infty/$  i merenja pojačanja  $A / R_L /$  sa ovim otporom.

$$\text{Iz relacije } A / R_L / = A / \infty / \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$\text{dobija se } R_o = \frac{A / \infty /}{A / R_L /} - 1 / \cdot R_L$$

Izlazna impedansa zavisi i od frekvencije. Sa povećanjem frekvencije ona blago raste. Ovo nije nužno uzimati u obzir, jer je ova promena na frekvencijama nižim od 100 KHZ do 200 KHZ, manja od eventualne greške u merenju.

Vrednost  $R_o$  je uzeta kao srednja iz nekoliko merenja za  $R_L = 1 \text{ K}\Omega$  i  $2\text{K}\Omega$  na frekvencijama od 200 HZ, 2000 HZ i 50 000 HZ.

Vrednosti su date tabelarno:

$f [\text{Hz}]$	$A / \infty /$	$A / 1 \text{ K}\Omega /$	$A / 2 \text{ K}\Omega /$	$R_o [\Omega]$	$R_o [\Omega]$
200	$5 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$	$4,65 \cdot 10^3$	136	150
2000	500	425	460	176	174
50 000	20	17	18,5	176	162
$R_o = 162 \Omega$					

Tabela 4

### 3. 1. 6. Razdešenost

Kod operacionog pojačavača MA 747 DC moguće je podešavati i anulirati napon razdešenosti. Za to su predviđeni izvodi nožice 3 i 14, odnosno 5 i 8. Na njih se priključuje potenciometar od  $10 \text{ K}\Omega$ . Klizač potenciometra priključen je na negativni deo izvora / - 15 V /. Poželjno je da potenciometar bude takav da omogućava vrlo finu regulaciju.

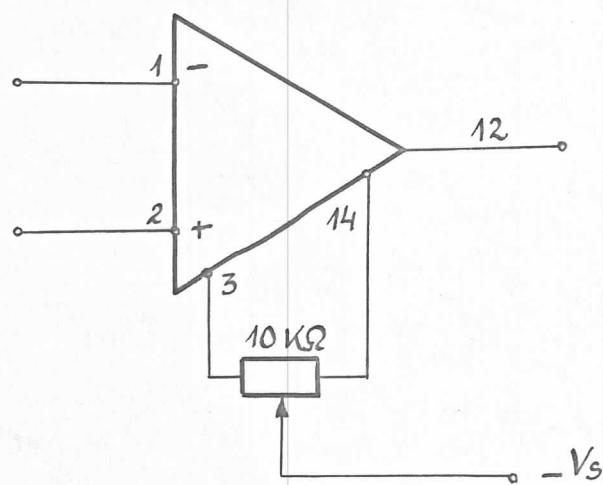
Na slici 32 je dat prikaz kola za anuliranje napona razdešenosti.

Merenja i podešavanja je lakše obaviti ukoliko u kolu postoji povratna sprega. Merenje je izvršeno na sledeći način /sli-

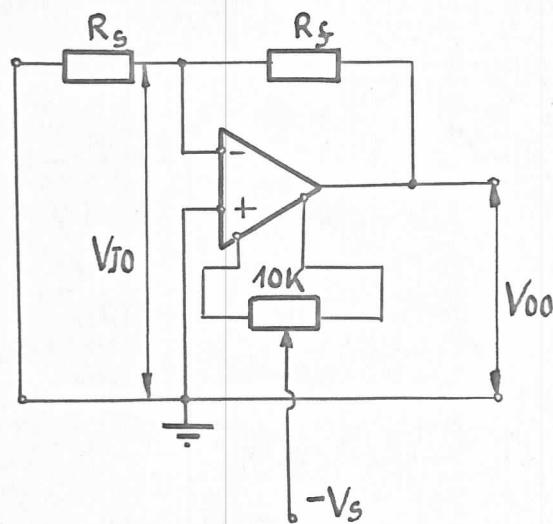
ka 33 /. Napravljen je pojačavač sa pojačanjem  $A_g = -1000$ ,  $R_f = 1M\Omega$ ,  $R_s = 1K\Omega$ . / + / i / - / ulazi operacionog pojačavača su kratko spojeni / slika 33 / i na izlazu se pojavio napon  $V_{o0}$  koji je prouzrokovao naponom razdešenosti na ulazu  $V_{j0}$ . Iz relacije:

$$V_{o0} = A_g V_{j0}$$

dolazimo do vrednosti napona razdešenosti  $V_{j0}$ .



Sl. 32



Sl. 33

Kako se u principu ovaj napon može regulisati, meri se samo maksimalni i minimalni napon razdešenosti.

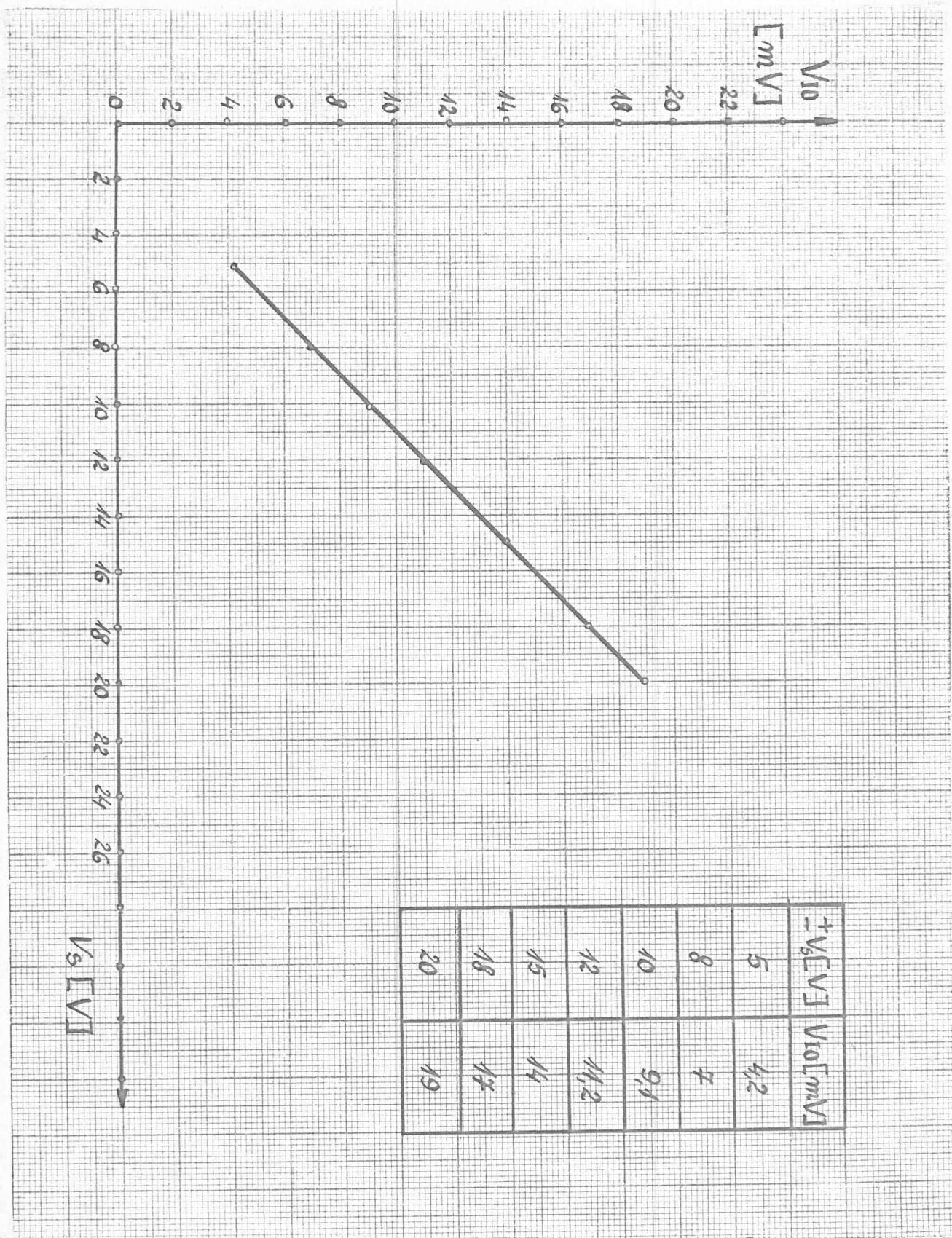


Tabela 5

Grafik 2

Na grafiku 2 prikazana je zavisnost maksimalnog napona razdešenosti od napona napajanja  $V_s$ .

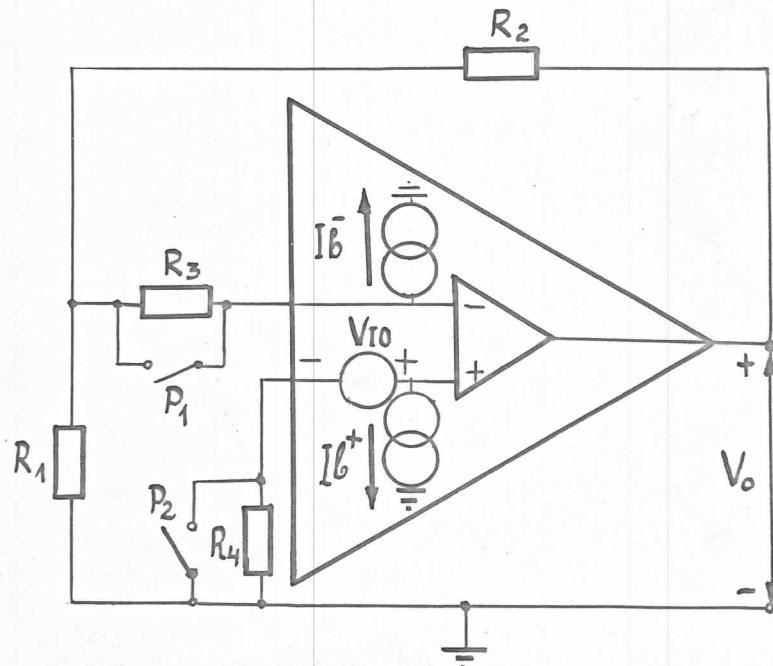
Najpogodniji način za regulisanje napona razdešenosti je pomoću kola sa slike 33.

Napon napajanja  $V_s$  je maksimalan  $V_s = \pm 22$  V. Potencijometar se podešava dok  $V_{o0}$  napon razdešenosti na izlazu ne bude minimalan moguć. Tada se i napon napajanja smanji na  $V_s = \pm 15$  V gde će operacioni pojačavač kasnije i raditi.

Na grafiku 2 vidi se da je zavisnost maksimalnog napona razdešenosti od napona napajanja linearna. Grafiku je priključena i tabela 5. Minimalna vrednost napona razdešenosti dobijena na prikazani način iznosila je  $V_{10} = 28 \mu\text{V}$  za napon izvora  $V_s = \pm 15$  V. I zavisnost minimalnog napona razdešenosti od napona napajanja je linearna.

### 3. 1. 7. Merenje struja pobude i struja razdešenosti

Kolo prikazano na slici 34 koristi se za ovo merenje:



Sli. 34

Otpor  $R_1$  ima vrednost  $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ , otpori  $R_2 = R_3 = R_4 = 1 \text{ M}\Omega$ . Izvrše se četiri merenja na ovakovom kolu :

1.  $P_1$  i  $P_2$  su zatvoreni, meri se izlazni napon  $V_{o1}$

$$V_{o1} = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] V_{I0}$$

2.  $P_1$  zatvoren,  $P_2$  otvoren, meri se  $V_{o2}$

$$V_{o2} = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] (V_{I0} - I_b^+ R_3)$$

3.  $P_1$  otvoren,  $P_2$  zatvoren, meri se  $V_{o3}$

$$V_{o3} = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] (V_{I0} + I_b^- R_3)$$

4.  $P_1$  otvoren,  $P_2$  otvoren, meri se  $V_{o4}$

$$V_{o4} = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] (V_{I0} + I_{I0} R_3)$$

$V_{I0}$  je napon razdešenosti,  $I_b^+$  i  $I_b^-$  struje pobude, a  $I_{I0} = / I_b^- - I_b^+ /$  struja razdešenosti / slika 34 /.

Razdešenost je bila podešena na neku srednju vrednost / proizvoljnu/. Napon napajanja  $V = \pm 15$  V, rezultati su dati tabelarno:

$V_{o1} = 5$ V	$V_{o2} = -13$ V	$V_{o3} = +14$ V	$V_{o4} = -2,5$ V
$V_{I0} = 5$ V	$I_b^+ = 18$ nA	$I_b^- = 9$ nA	$I_{I0} = -7,5$ nA

Tabela 5

Iz jednačine  $I_{I0} = I_b^- - I_b^+$  dobijamo nešto drugačiju vrednost :  $I_{I0} = 9$  nA.

Razlog ovome je greška u merenju nastala zbog različitih spoljnih smetnji kao i zbog nejednakosti otpornika  $R_3$  i  $R_4$ , koji inače imaju istu nominalnu vrednost.

### 3. 2. Pojačavači sa FAIRCHILD $\mu$ A 747 DC

Pojačavači sa  $\mu$ A 747 DC realizovani su kao da je reč o idealnom operacionom pojačavaču. Rezultati pokazuju da je ovakva pretpostavka u praksi veoma zadovoljavajuća.

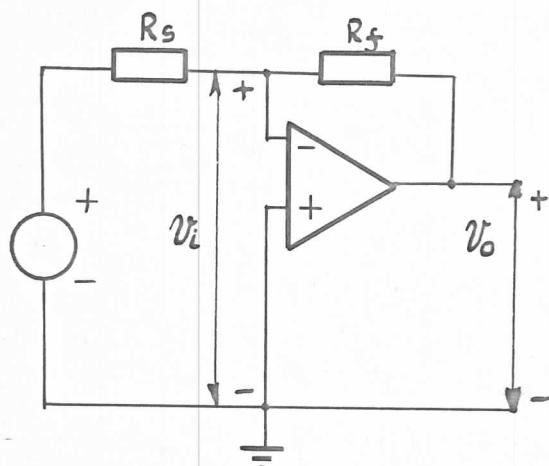
Eksperimentalno dobijene amplitudne karakteristike, vrednosti za prelomne frekvencije, propusni opseg i pojačanja veoma se dobro slažu sa teorijskim očekivanim vrednostima / 2. glava - odeljak o kolima sa realnim operacionim pojačavačima/.

Realizovan je i eksperimentalno proveren veći broj invertu-

jućih pojačavača, nekoliko neinvertujućih pojačavača i adicioni / sabirajući / pojačavač.

### 3. 2. 1. Invertujući pojačavači

Šema veza data je na slici 35. Ova šema je ekvivalentna šemama sa idealnim operacionim pojačavačem / 1. glava, slika 8 a /.



Sl. 35

Izborom  $R_f$  i  $R_s$  podešava se pojačanje. Rezultati su dati tabelarno / tabela 6/ i grafički /grafici 3 i 4 /. Radu su priložene i fotografije dobijene direktno sa osciloskopa polaroid kamerom, koje ilustruju rad pojačavača.

Pojačanje pojačavača				Vrednost otpora		Faktor povratne sprege	Prelomna frekvencija	
$A_s$	$A_s [dB]$	$A_r$	$A_r [dB]$	$R_f [\Omega]$	$R_s [\Omega]$	$\beta$	$f_{ps} [Hz]$	$f_{pr} [Hz]$
1000	60	1000	60	1 M	1 K	$0,999 \cdot 10^3$	1 K	1 K
330	50,3	330	50,3	1 M	3 K	$2,99 \cdot 10^3$	3 K	3 K
100	40	100	40	1 M	10 K	$9,9 \cdot 10^3$	10 K	10 K
34	30	34	30	1 M	29,5 K	$2,88 \cdot 10^2$	30,8 K	30,1 K
10	20	10	20	1 M	100 K	$9,09 \cdot 10^2$	90 K	90,90 K
3,2	10	3,125	10	50K	16 K	0,242	230 K	242 K
1	0	1	0	50K	50 K	0,5	0,5 M	-
0,5	-6	0,5	-6	50K	100 K	0,66	-	-

Tabela 6

Pojačanje  $A_s$  pretstavlja mereno, stvarno pojačanje pojačavača na frekvencijama manjim od prelomne.  $A_r$  je pojačanje računato prema izrazu za invertujući pojačavač / iz 1. poglavlja/

$$A_r = - \frac{R_f}{R_s} \dots 1.9$$

$R_s$  i  $R_f$  su otpori u kolu.

$\beta$  je faktor povratne sprege računat preko izraza  $\beta = \frac{R_s}{R_f + R_s} \dots 2.20$

Otpori  $R_s$  i  $R_f$  su birani tako da nije potrebno uzimati tačniji izraz za  $\beta$ / izraz 2.21 iz 2. poglavlja/ i ulazna impedansa ne utiče na ovaj faktor.

$f_{ps}$  je merena prelomna frekvencija / frekvencija na kojoj pojačanje  $A_s$  opadne za 3 db/

$f_{pr}$  je prelomna frekvencija računata prema izrazu za pojačanje invertujućeg pojačavača / 2. glava, izraz 2.34/ :

$$f_{pr} = \beta A_o f_p \dots 2.34$$

$A_o$  pojačanje operacionog pojačavača sa otvorenom petljom za jednosmerni signal

$f_p$  prelomna frekvencija samog operacionog pojačavača

Grafik 3 prikazuje amplitudne karakteristike pojačavača sa otvorenom petljom  $A(f)$  i pojačavača sa zatvorenom petljom i pojačanjima  $A_1=1000$ ;  $A_2=330$ ;  $A_3=100$ ;  $A_4=34$ . Prelomne tačke koje odgovaraju ovim karakteristikama su:  $f_{p0}=10\text{Hz}$ ;  $f_{p1}=1\text{KHz}$ ;  $f_{p2}=3\text{KHz}$ ;  $f_{p3}=10\text{KHz}$ ;  $f_{p4}=30,8\text{KHz}$ .

Na tabeli 7 prikazane su numeričke vrednosti dobijene u merenjima sa ovim pojačavačima.

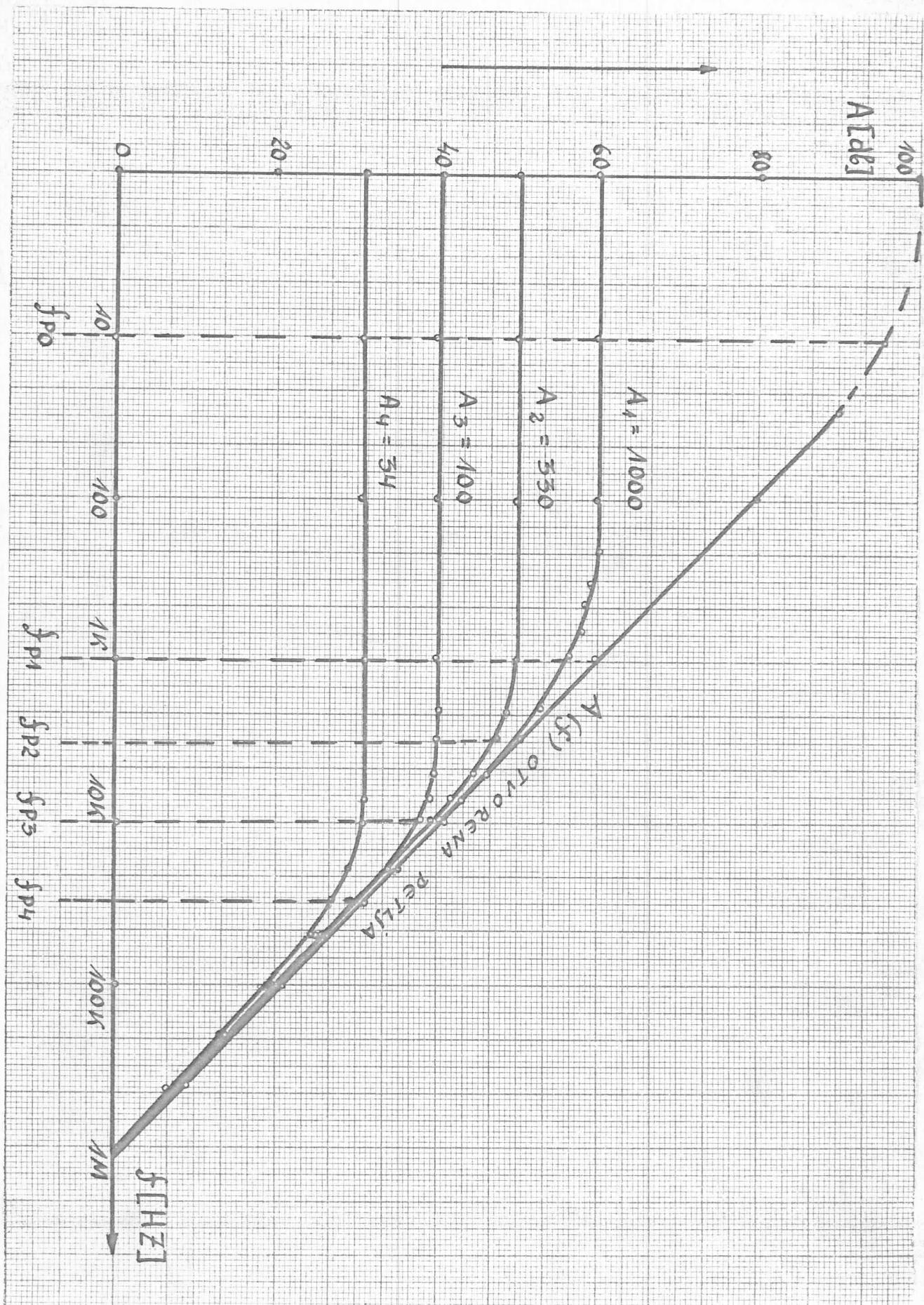
Grafik 4 prikazuje amplitudne karakteristike pojačavača sa pojačanjima  $A_5=10$ ;  $A_6=3,2$ ;  $A_7=1$ ;  $A_8=0,5$  i njihove prelomne frekvencije :  $f_{p5}=90\text{KHz}$ ;  $f_{p6}=230\text{KHz}$ ;  $f_{p7}=0,5\text{MHz}$

Tabela 8 daje ove podatke numerički uredjene.

Merenja na frekvencijama većim od 1 MHz nisu vršena zbog nepouzdanosti generatora signala i velikog izobličenja ulaznog signala. Drugi razlog je činjenica da amplitudna karakteristika samog operacionog pojačavača, sa otvorenom petljom, oko tačke od 1 MHz menja pad, pa je pad znatno veći od 6 db / oktavi / tvornički podatak /.

Ovo utiče i na pojačavače sa povratnom spregom. Zbog toga je i prelomna frekvencija pojačavača sa pojačanjem  $A_7=1$  određena samo eksperimentima.

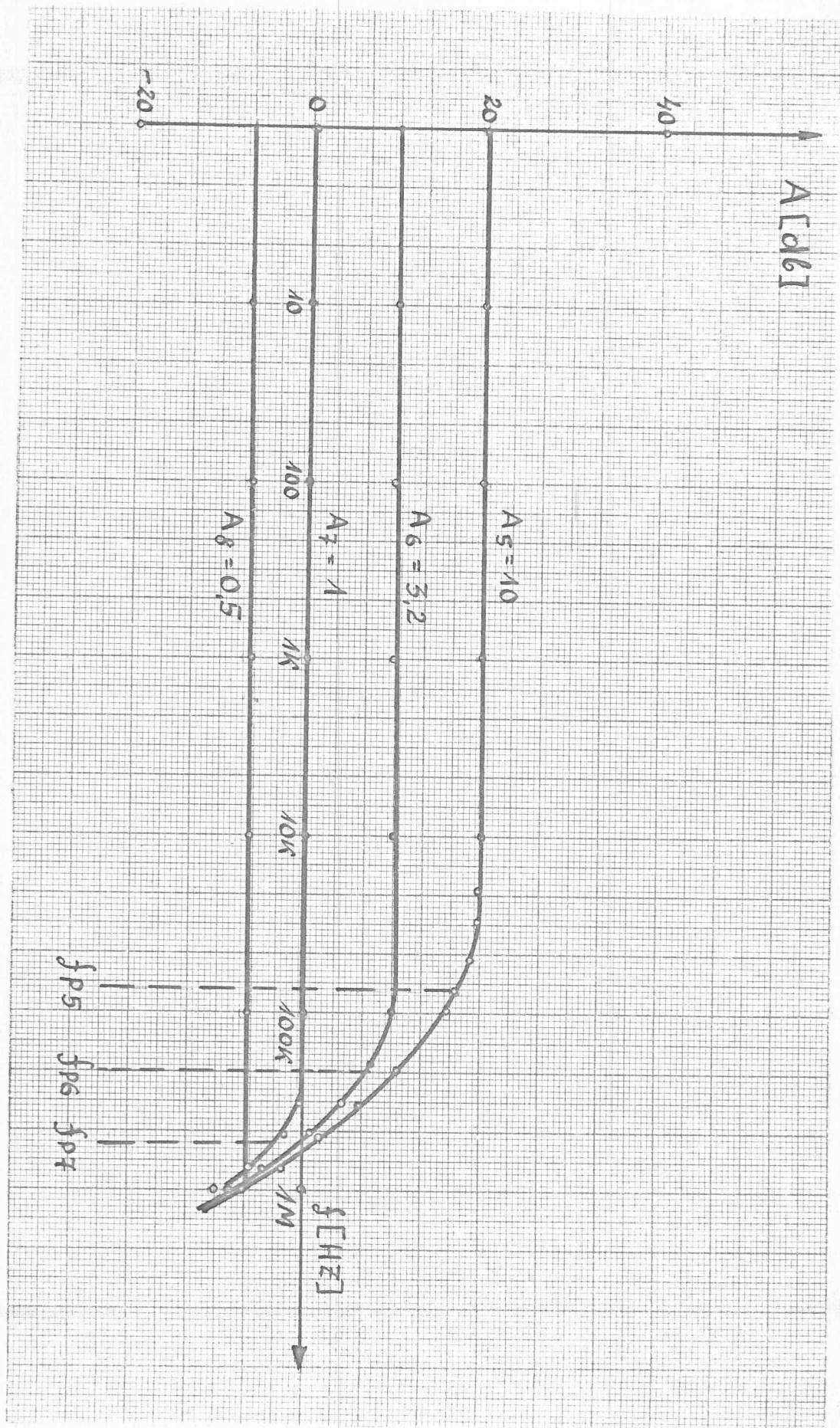
U radu je realizovan i pojačavač sa pojačanjem  $A_8=0,5$ .



Grafik 3

	$A_1 = 1000$	$A_2 = 330$		$A_3 = 100$		$A_4 = 34$		
	$f_1 = 1 \text{ KHZ}$	$f_2 = 3 \text{ KHZ}$		$f_3 = 10 \text{ KHZ}$		$f_4 = 30,8 \text{ KHZ}$		
$f[\text{HZ}]$	$A_1$	$A_1[\text{db}]$	$A_2$	$A_2[\text{db}]$	$A_3$	$A_3[\text{db}]$	$A_4$	$A_4[\text{db}]$
200	1000	60	330	50,4	100	40	34	30,6
300	975	59,8	"		"		"	
500	925	59,3	"		"		"	
700	850	58,6	330	50,4	"		"	
1 K	725	57,2	314	50	"		"	
2 K	475	53,5	284	49	100	40	"	
3 K	330	50,3	244	47,7	95	39,5	"	
5 K	210	46,4	178	45	90	39	34	
7 K	150	43,5	132	42,4	85	38,6	34	30,6
10 K	100	40	96	39,6	63	36	32,3	30,2
20 K	50	34	50	34	42	32,5	27	28,6
30 K	32	30,1	33	30,3	30	29,5	20,5	26,2
50 K	20	26	19	25,6	18,5	25,3	14	22,9
70 K	14,5	23,2	13,5	22,6	12,5	21,9	10,5	20,4
100 K	10	20	10	20	8,5	18,6	7	16,9
200 K	5	13,9	5	13,9	4,5	13,1	3,5	10,9
300 K	3,3	10,4	3,5	10,8	3	9,5	2,5	8
500 K	2	6	2	6	1,8	5,1	1,5	3,52
700 K	1,45	3,2	1,5	3,5	1,2	1,6	0,9	-0,9
1 M	1	0	-		0,8	-1,9	0,6	

Tabela 7



Grafik 4

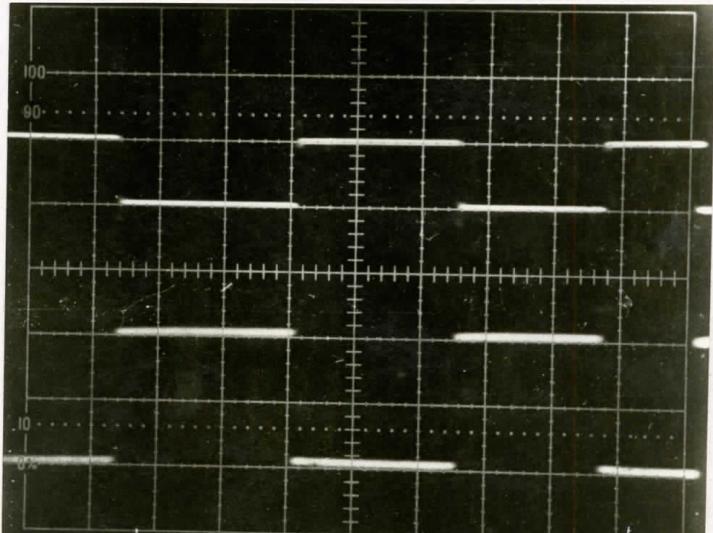
	$A_5 = 10$	$A_6 = 3,2$	$A_7 = 1$	$A_8 = 0,5$				
	$f_{P5} = 90 \text{ KHZ}$	$f_{P6} = 230 \text{ KHZ}$	$f_{P7} = 0,5 \text{ MHZ}$	-				
$f[\text{HZ}]$	$A_5$	$A_5[\text{db}]$	$A_6$	$A_6[\text{db}]$	$A_7$	$A_7[\text{db}]$	$A_8$	$A_8[\text{db}]$
10	10	20	3,2	10	1	0	0,5	-6
20	10	20						
30	9,5	19,5						
50	9	19,1						
70	8	18,1						
100	6,4	16,1	3,2	10				
200	3,2	10,1	2,47	7,8				
300	2	6	1,9	5,4	1	0		
500	0,9	-0,9	1,2	1,7	0,8	-1,9		
700	0,6	-4,4	0,85	-1,4	0,6	-4,4		
1 M	0,3	-10,5	0,5	-6	0,35	-9,1	0,5	-6

Tabela 8

Deo amplitudne karakteristike ovog pojačavača dat je na grafiku 4. Do frekvencije od 1 MHZ nije pokazao promenu pojačanja. Njegova realizacija izvršena je samo zato da bi se ilustrovale mogućnosti invertujućih operacionih pojačavača / pojačanje može biti manje od 1 /. Za praktične svrhe zgodnije i jeftinije je koristiti običan razdelnik napona.

Na slici 36 / fotografiji/ je prikazan rad ovakvog pojačavača.

Invertujući pojačavač sa pojačanjem  $A=0,5$   
 donji trag: ulaz 5 V/cm  
 gornji trag: izlaz 5 V/cm  
 frekvencija 1 KHZ

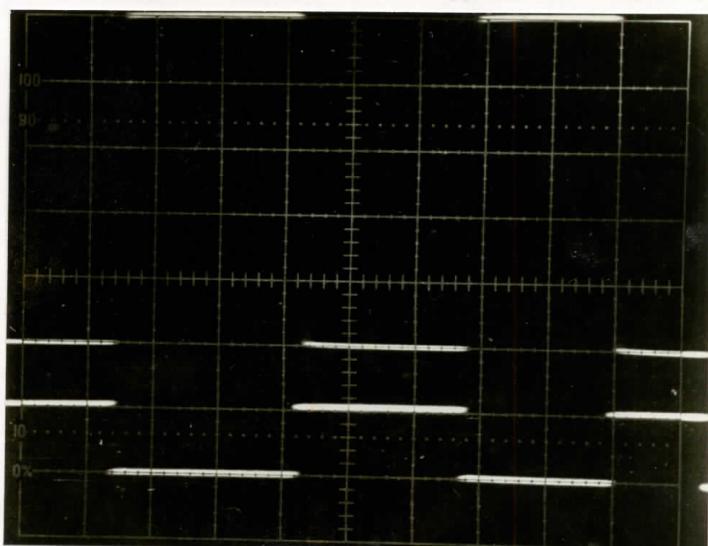


Slike 37, 38 i 39 ilustruju tipično ponašanje invertujućeg pojačavača na raznim frekvencijama / isto važi i za neinvertujući pojačavač/. Odabran je pojačavač sa pojačanjem  $A=10$  i posmatrano njego ponašanje na frekvenciji mnogo manjoj od prelomne / slika 37/, ne to pre prelomne / slika 38/ i nakon prelomne frekvencije, gde se pojačavač ponaša kao integrator / slika 39/.

Invertujući pojačavač  $A=10$

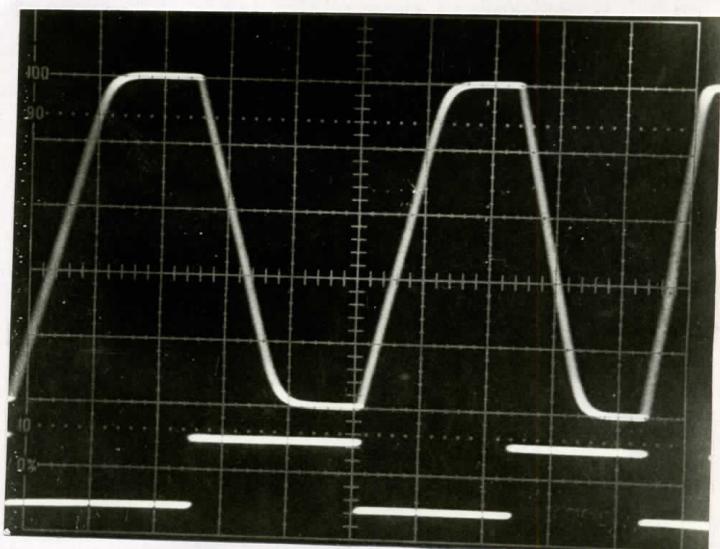
Sl. 37

donji trag: ulaz 1 V/cm  
gornji trag: izlaz 2 V/cm  
frekvencija  $f = 2 \text{ KHZ}$   
kolo radi kao pojačavač  
sa pojačanjem  $A=10$



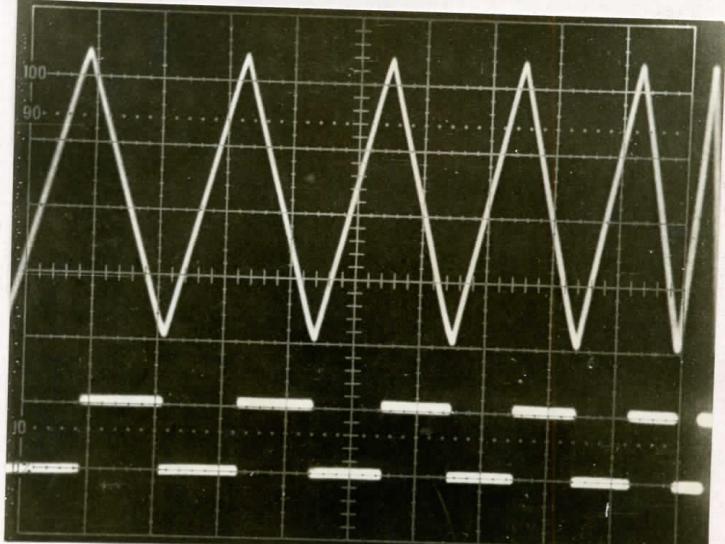
Sl. 38

donji trag: ulaz 1 V/cm  
gornji trag: izlaz 2 V/cm  
frekvencija  $f = 20 \text{ KHZ}$   
dolazi do izobličenja izlaznog signala, pojačanje je još uvak  $A=10$



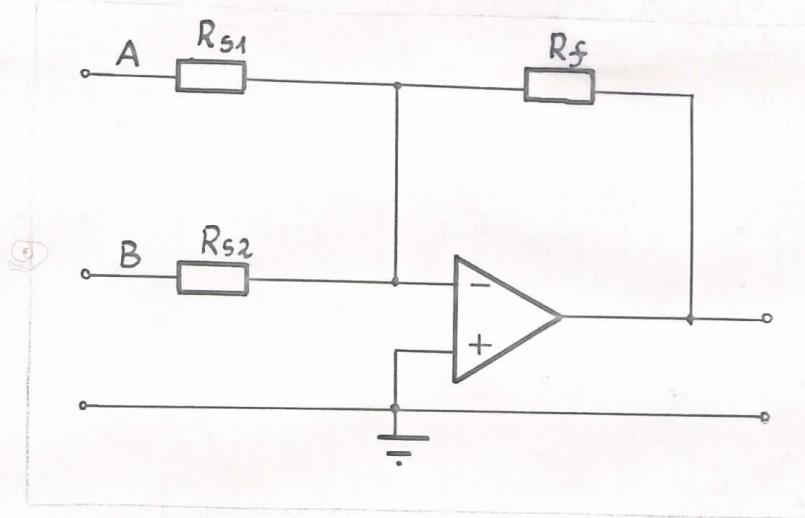
Sl. 39

donji trag: ulaz 1 V/cm  
gornji trag: izlaz 1 V/cm  
frekvencija  $f = 150 \text{ KHZ}$   
kolo se ponaša kao integrator. Odnos maksimalnog ulaznog i izlaznog signala opada :  $A=4,5$



### 3. 2. 2. Sabirajući pojačavač

Ovaj pojačavač /slika 40 / predstavlja modifikovani invertujući pojačavač. Od njega se razlikuje samo po tome što ima više / konkretno dva/ ulaza. Realizovan je tako da su vrednosti otpora  $R_{S1} = R_{S2} = R_f = 50 \text{ k}\Omega$



Sl. 40

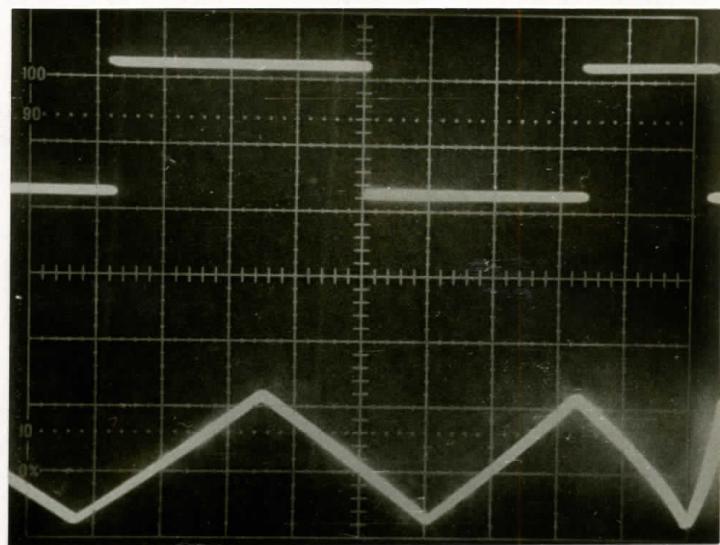
Svaki od ulaza se posmatra kao poseban pojačavač. Pojačanje svakog je  $A = -1$ .

Amplitudna karakteristika za svaki od ulaza data je na grafiku 4 i na tabelama 8 i 6 / podaci se odnose na invertujući pojačavač sa pojačanjem  $A = 1$ . Ovaj pojačavač označen je kao  $A_7$  / pa nije potrebno posebno davati podatke o njemu.

Slike 41, 42 i 43 ilustruju rad ovakvog pojačavača.

Nužno je napomenuti da nije postojala mogućnost da se izvori koji obezbeđuju signale na ulazima A i B dovedu u fazu. Zbog toga slike 42 i 43 nisu zbir koji bi dali signali na slici 41. / Slike 42 i 43 nisu realizovane u istom vremenskom trenutku, pa je došlo do pomeranja jednog signala u odnosu na drugi /.

Donji trag: ulaz A, 1 V/cm  
gornji trag: ulaz B, 1 V/cm  
frekvencija signala 1 KHZ



Sl. 41



Sl. 42

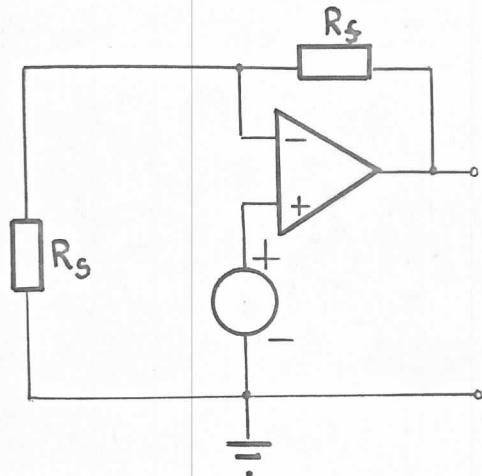
Signal sa izlaza pojačavača  
snimljen u dva različita  
vremenska trenutka  
Izlaz pojačavača 1 V/cm



Sl. 43

### 3. 2. 3. Neinvertujući pojačavač

Šema veza neinvertujućeg pojačavača realizovana je kao da se u kolu nalazi idealni operacioni pojačavač / sl. 44/



Sl. 44

Proračun pojačanja vršen je iz izraza za idealni operacioni pojačavač / 1. glava 1.12/

$$A_r = 1 + \frac{R_f}{R_s} \quad / \text{pojačanje pre prelomne tačke}/$$

Prelomna frekvencija određivala se preko izraza:

$$f_{pr} = \beta A_o f_p \quad / 2. \text{ glava } 2.34/$$

$A_o$  pojačanje pojačavača bez povratne sprege

$f_p$  njegova prelomna frekvencija

$$\beta = \frac{R_s}{R_s + R_f} \quad \text{faktor povratne sprege} \quad / 2.20/$$

Eksperiment je dao rezultate koji se dobro slažu sa teorijskim očekivanjima.

Realizovani su pojačavači sa pojačanjem  $A_1=5$ ,  $A_2=3$ ,  $A_3=100$ . Tabela 9 pokazuje njihove karakteristike uporedno:

Pojačanje pojačavača				Vrednost otpora		Faktor povratne sprege	Prelomna frekvencija	
$A_s$	$A_s [\text{db}]$	$A_r$	$A_r [\text{db}]$	$R_f [\Omega]$	$R_s [\Omega]$	$\beta$	$f_{ps} [\text{kHz}]$	$f_{pr} [\text{kHz}]$
5	14	5	14	100 K	25 K	0,2	185	200
3	9,5	3	9,5	100 K	50 K	0,33	320	330
100	40	101	40	1 M	10 K	0,01	9,9	10

Tabela 9

$A_s$  mereno pojačanje u oblasti gde je konstantno, pre prelomne frekvencije

$A_f$  računato iz izraza za idealni operacioni pojačavač

$\beta$  faktor povratne sprege

$f_{ps}$  merena prelomna frekvencija

$f_{pr}$  računata prelomna frekvencija / iz  $f_{pr} = \beta A_o f_p$  /

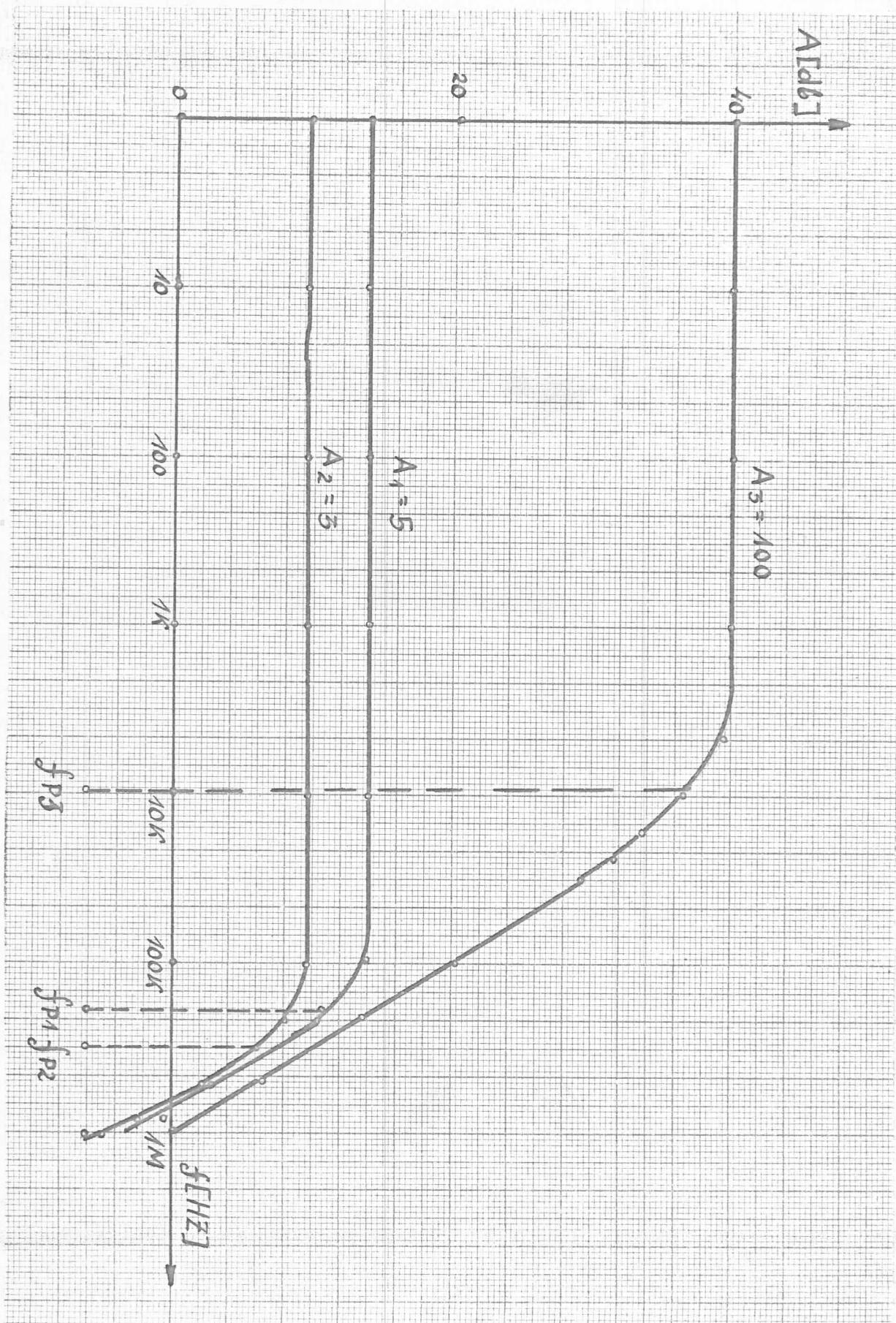
Na grafiku 5 prikazane su amplitudne karakteristike ovih pojačavača. Sa  $A_1 = 5$ ;  $A_2 = 3$ ;  $A_3 = 100$ ; a sa  $f_{p1}; f_{p2}; f_{p3}$ ; odgovarajuće prelomne frekvencije. Tabele 10 i 10 a daju ove karakteristike prikazane numerički.

	$A_1 = 5$		$A_2 = 3$	
	$f_{p1} = 185 \text{ KHZ}$		$f_{p2} = 320 \text{ KHZ}$	
$f [\text{KHZ}]$	$A_1$	$A_1 [\text{db}]$	$A_2$	$A_2 [\text{db}]$
100	5	14	3	9,5
200	3,4	10,6	3	9,5
300	2,2	6,8	2,1	6,4
500	1,4	2,9	1,3	2,3
700	0,9	- 0,9	0,8	- 1,9
1000	0,6	- 4,4	0,5	- 6

Tabela 10

	$A_3 = 100$	
	$f_{p3} = 9,9 \text{ KHZ}$	
$f [\text{HZ}]$	$A_3$	$A_3 [\text{db}]$
2 K	100	40
5 K	91	39
10 K	65	36
20 K	43,5	32,7
50 K	20	26
100 K	8,6	18,7
200 K	4,5	13
500 K	1,9	5,5
1 M	0,9	- 0,9

Tabela 10 a



Slike / 45 i 46 / ilustruju rad ovih pojačavača. Snimci su načinjeni u frekventnoj oblasti pre prelomne frekvencije. Neinvertujući pojačavač se nakon prelomne tačke takođe ponaša kao integrator, pa slike / sl. 37, 38 i 39 u ovom delu/ koje se odnose na invertujući pojačavač ilustruju i njegovo ponašanje.

U radu je realizovan i pojačavač sa pojačanjem  $A=100$  koji takođe zadovoljava teorijske pretpostavke i očekivanja.

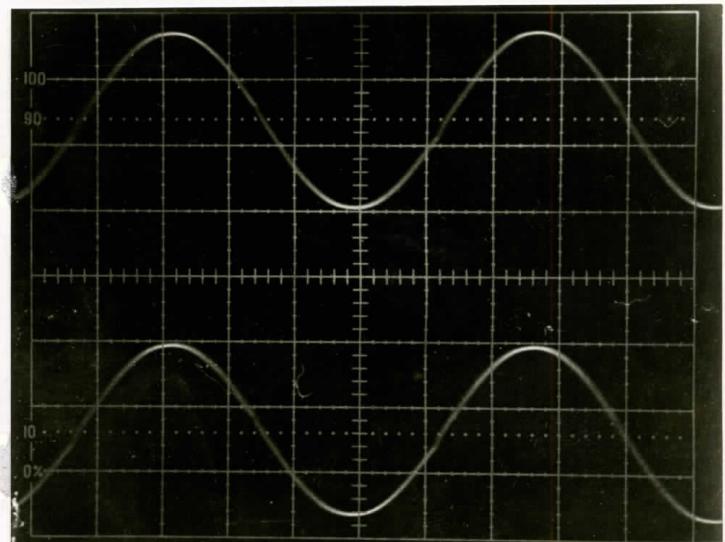
Neinvertujući pojačavač

Pojačavač sa pojačanjem  
 $A = 5$

donji trag : ulaz  
0,1 V/cm

gornji trag: izlaz  
0,5 V/cm

$f = 1 \text{ KHZ}$



Sl. 45

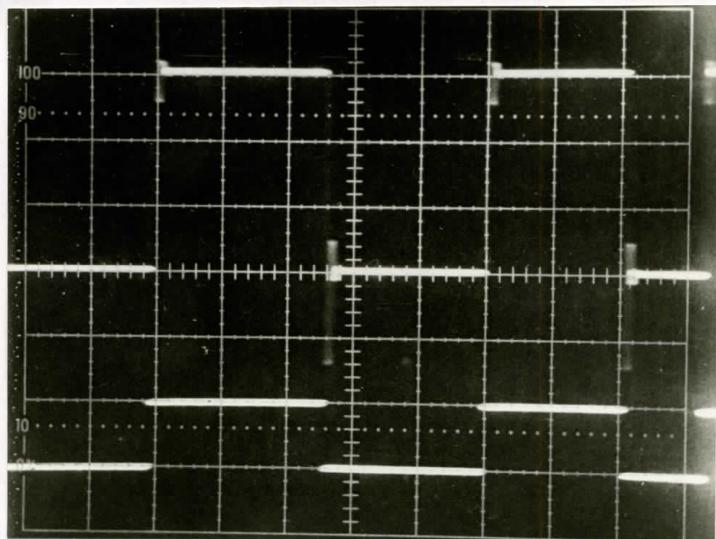
Pojačavač sa pojačanjem  
 $A = 3$

donji trag: ulaz  
1 V/cm

gornji trag: izlaz  
1 V/cm

$f = 1 \text{ KHZ}$

Pikovi koji se vide na izlaznom signalu su posledica parazitskog kapaciteta i induktiviteta u kolu koje unosi otpor  $R_S$  / realizovan je rednom vezom dva otpornika od po  $50 \text{ K}\Omega$  / frekvencija  $10 \text{ KHZ}$



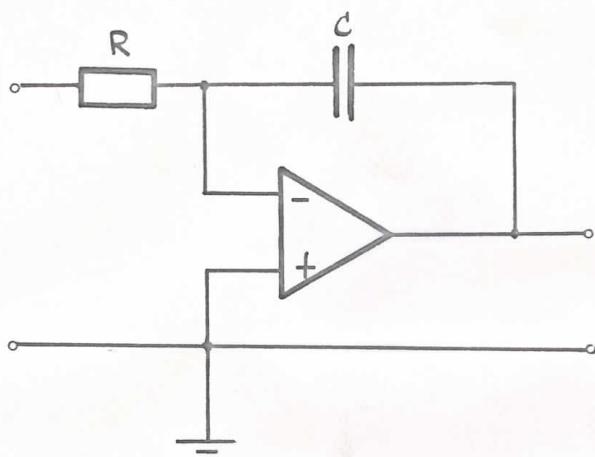
Sl. 46

### 3. 3. Uobličavači sa MA 747 DC

Na teorijskim postavkama iznetim u drugoj glavi / 2. 2/- Kola sa realnim operacionim pojačavačem/ u ovom radu realizovani su i eksperimentalno provereni po jedan integrator i diferencijator. Eksperimentima dobijeni rezultati dobro se slažu sa teorijskim očekivanjima.

### 3. 3. 1. Integrator

Šema veza integratora data je na slici 47. Šema veza ista je kao da je u pitanju kolo sa idealnim pojačavačem.



Sl. 47

Vrednost otpornika iznosi  $R = 1 \text{ K}\Omega$ , a kondenzatora  $C = 85 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ . Integrator je predviđen za rad na frekvenciji od 1 KHZ i oko nje.

Odnosi ulaznih i izlaznih napona računati su prema jednačinama 2. 37 ; 2. 41 ; 2. 47 iz 2. glave

$$\text{Za kvadratni signal } K_1 = -\frac{T}{4RC} = -2,94 \dots \dots \text{ 2. 37}$$

$$\text{Za sinusni ulazni signal } K_2 = \frac{T}{2\pi RC} = 1,88 \dots \dots \text{ 2. 38}$$

$$\text{Za testerasti signal } K_3 = \frac{T}{8RC} = -1,47 \dots \dots \text{ 2. 39}$$

Vrednosti su računate za frekvenciju  $f = 1 \text{ KHZ} / T = 1 \text{ ms}$

Fotografije dobijene sa osciloskopa polaroidnom kamerom ilustruju ponašanje integratora za razne ulazne signale / slike 48, 49 i 50/. Sa slika je meren i odnos ulaznih i izlaznih signala. Slaganje eksperimentalno dobijenih vrednosti sa teorijskim je dobro.

Tabela 11 pokazuje ovo slaganje. Merenje je vršeno na frekvenciji od 1 KHZ / T=1 ms/.

$K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$  su računske vrednosti dobijene iz gornjih jednačina / 2. 37 ; 2. 38 i 2. 39 /.

$K_{S1}$ ;  $K_{S2}$ ;  $K_{S3}$  su merene vrednosti.

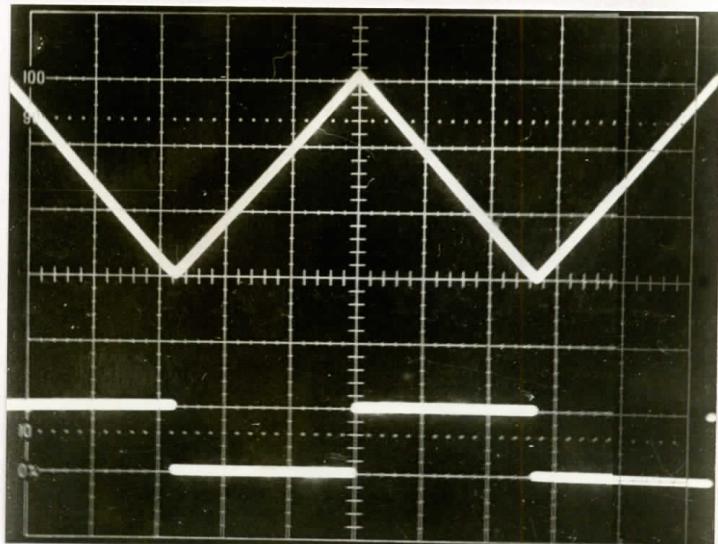
$\delta \%$  je otstupanje navedenih - merenih vrednosti od računatih, dato u procentima.

Ulažni signal	K računska	K mereno	$\delta \%$
kvadrat	$K_1 = -2,94$	$K_{s1} = -3$	1,6%
sinus	$K_2 = 1,88$	$K_{s2} = 1,95$	4,1%
testera	$K_3 = -1,47$	$K_{s3} = -1,5$	2%

Tabela 11

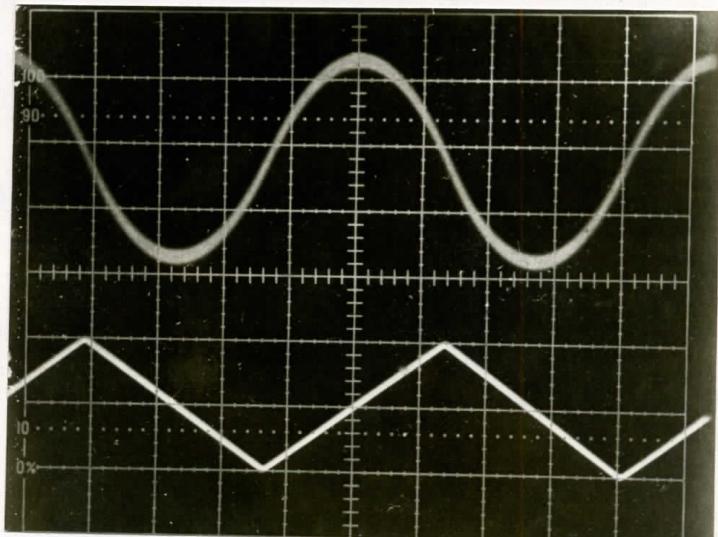
Ostupanja nastaju kao rezultat nedovoljno tačno merenih vrednosti R, C i frekvencije, kao i zbog očitavanja sa osciloskopa / debljina linije/.

Donji trag: ulaz 1 V/cm  
gornji trag: izlaz 1 V/cm  
X osa 0,2 ms/cm  
frekvencija 1 KHZ



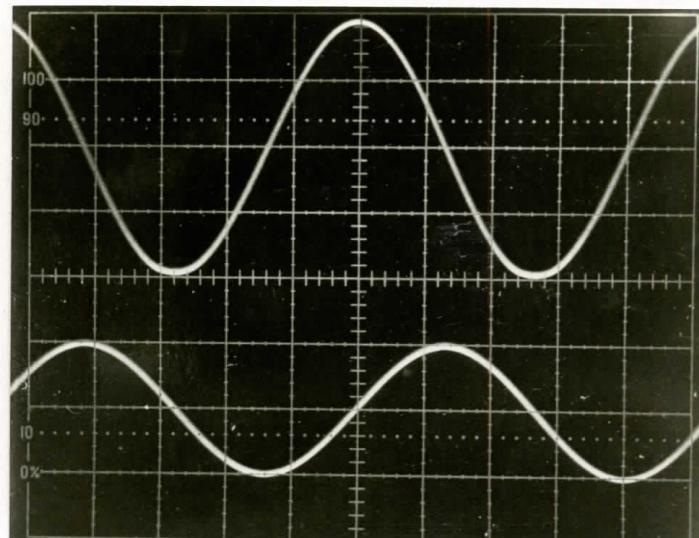
Sl. 48

Donji trag: ulaz 0,5 V/cm  
gornji trag: izlaz 0,5V/cm  
X osa 0,2 ms/cm  
frekvencija 1 KHZ



Sl. 49

Donji trag: ulaz 0,5 V/cm  
gornji trag: izlaz 0,5 V/cm  
X osa 0,2 ms/cm  
frekvencija 1 KHZ

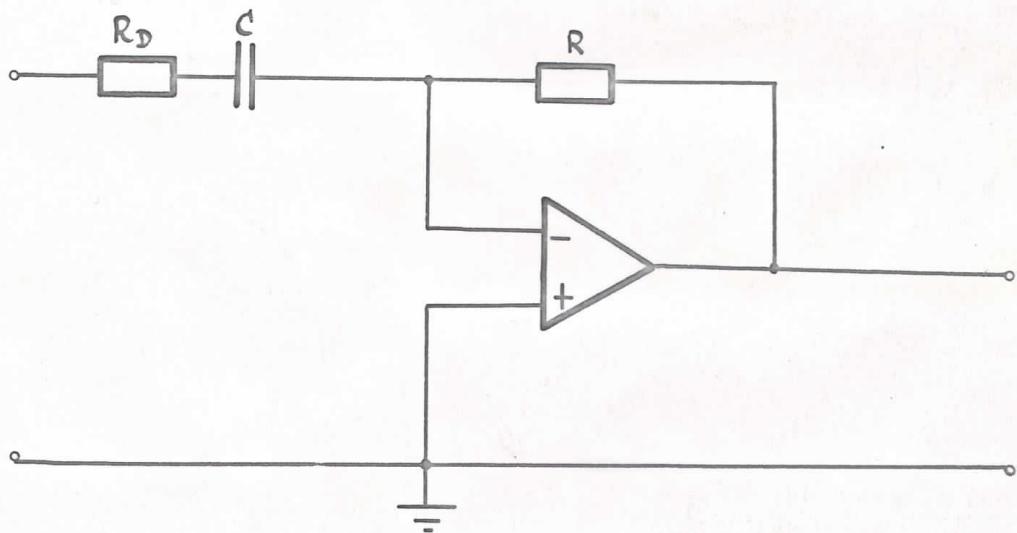


Sl. 50

### 3. 3. 2. Diferencijator

Diferencijator je realizovan kao da je reč o kolu sa idealnim operacionim pojačavačem. Način izvodjenja ovoga kola dat je u 2. glavi / 2. 2 - Kola sa realnim operacionim pojačavačem/.

Šema veza data je na slici 51.



Sl. 51

Otpor  $R$  ima vrednost  $R = 1 \text{ K}\Omega$ , a kondenzator  $C = 85 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ . Vrednost otpora  $R_D$  je  $R_D = 100\Omega$ .

Diferencijator je predviđen za rad na frekvenciji od 1 KHZ i oko nje.

Odnos maksimalnog ulaznog i izlaznog napona za različit ob-

lik ulaznog signala računat je prema jednačina 2. 50 i 2. 51.

Za sinusni signal  $K_4 = \frac{2\pi RC}{T} = 0,53 \dots \dots 2. 50$   
na frekvenciji  $f = 1 \text{ KHZ} / T = 1 \text{ ms} /$

Za testerasti ulazni signal  $K_5 = \frac{-4RC}{T} = -0,34 \dots \dots 2. 51$   
na frekvenciji  $f = 1 \text{ KHZ} / T = 1 \text{ ms} /$

Eksperimentalno su provereni ovi odnosi / merenjem sa slika 53 i 54/ i pokazalo se dobro slaganje teorijski očekivanih rezultata i eksperimenta. Tabela 12 ovo i ilustruje:

Ulagni signal	K računato	K mereno	$\delta \%$
sinus	$K_4 = 0,53$	$K_{54} = 0,49$	3,7
testera	$K_5 = -0,34$	$K_{55} = -0,33$	0,66

Tabela 12

$f = 1 \text{ KHZ}$

$V_s = \pm 15 \text{ V}$

Ostupanja nastaju iz istih razloga kao i kod integratora: nedovoljno tačno odredjeni R i C i frekvencija f, debljina linije kod oscilografa.

Slika 52 pokazuje funkciju otpora  $R_D$ . Na ovoj slici gornji trag pokazuje izlazni signal diferencijatora koji radi sa umetnutim  $R_D$ , a donji trag izlazni signal diferencijatora koji radi bez dodatnog otpora  $R_D$ . Uloga ovoga otpora je da priguši pikove / oscilacije, šum/, koji se kod diferencijatora javlja naročito na višim frekvencijama. On se bira tako da bude mali u odnosu na R, kako ne bi uticao na samo funkcionisanje diferencijatora / u konkretnom slučaju  $R_D = 100\Omega$ /.

Donji trag:

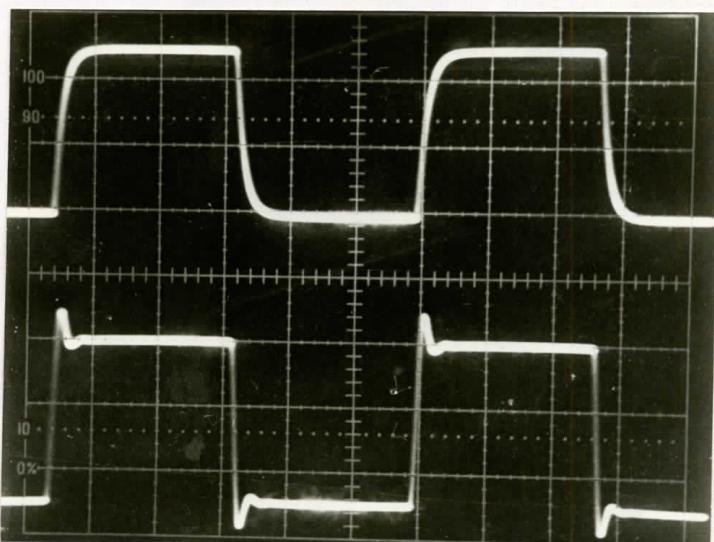
izlaz diferencijatora u koji nije ugradjen  $R_D$

Gornji trag:

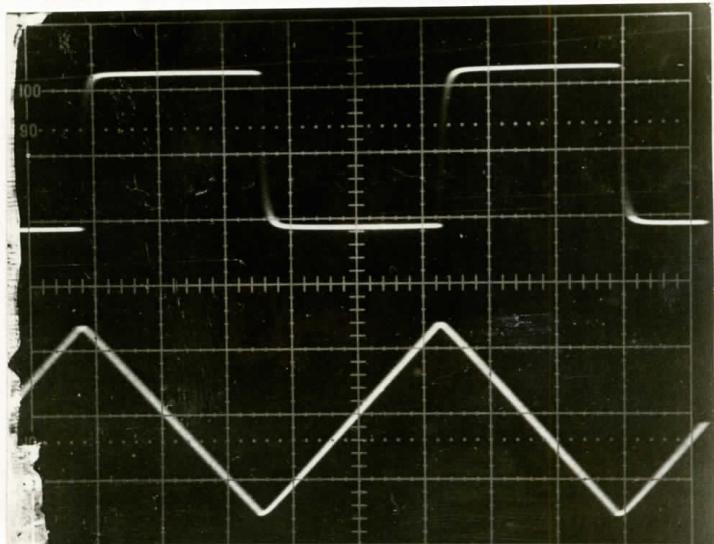
izlaz diferencijatora sa ugradjenim  $R_D = 100\Omega$

Y osa 1 V/cm

X osa 0,1 ms

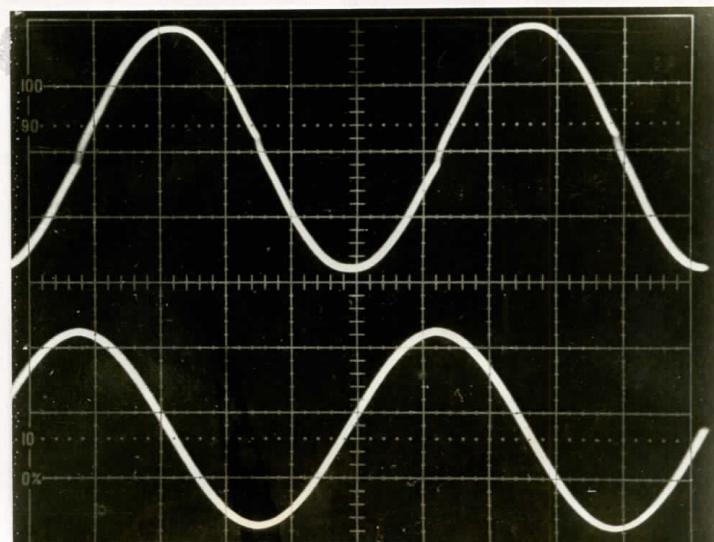


Donji trag : ulaz 0,5 V/cm  
gornji trag: izlaz 0,2 V/cm  
X osa 0,2 ms/cm  
frekvencija 1 KHZ



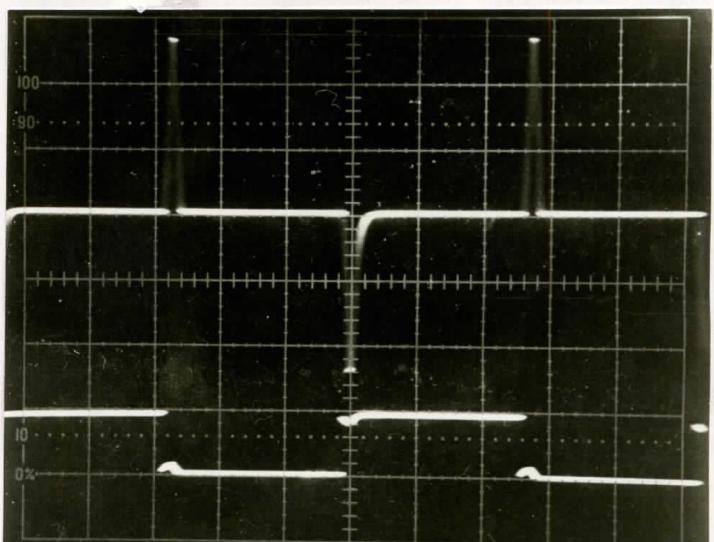
Sl. 53

Donji trag: ulaz 0,5 V/cm  
gornji trag:izlaz 0,2 V/cm  
X osa 0,2 ms/cm  
frekvencija 1 KHZ



Sl. 54

Donji trag: ulaz 5 V/cm  
gornji trag: izlaz 5 V/cm  
X osa 0,2 ms/cm  
frekvencija 1 KHZ



Sl. 55

#### 4. UPOTREBA OPERACIONIH POJAČAVAČA, PROBLEMI U RADU SA OPERACIONIM POJAČAVAČIMA

##### 4. 1. Upotreba operacionih pojačavača

Danas se u svetu proizvodi veliki broj operacionih pojačavača različitih tipova i namena. Pojačavač FAIRCHILD MA 747 DC samo je jedan od njihovih brojnih predstavnika. Izabran je zbog toga što je tipičan primer grupe pojačavača koja se najčešće proizvodi i u praksi primenjuje. Ova grupa pojačavača najčešće nosi oznaku 741 / MOTOROLA, SGS, ITT, FAIRCHILD /, ali neke tvornice stavljuju i druge oznake / RCA : CA 3010; SPAGUE : ULS 2 171; PHILIPS : TBA 221 ; /. Ovo su operacioni pojačavači u pravom smislu reči. Najčešće se koriste u kolima koja obavljaju matematičke operacije. Uz kola koja su opisana u radu : invertujući, neinvertujući, adicioni i diferencijalni pojačavač, integrator i diferencijator koriste se i za izradu logaritamskih i antilogaritamskih pojačavača. Sva ova kola obično se koriste u analognim računarima. Sa ovom vrstom pojačavača moguće je realizovati i pretvarače napona u struju ili struje u napon, različite frekventne filtere, generatore funkcija, kola u impulsnoj tehnici, kao što je, naprimjer, Šmitovo okidno kolo, oscilatore, multivibratore. Ovaj tip pojačavača ima veoma široku namenu.

Postoji i veliki broj tipova operacionih pojačavača uže, specijalne namene, kao što su oni koji se ugradjuju u video pojačavače / imaju veoma širok propusni opseg /, zatim pojačavači koji se koriste u izradi stabilisanih izvora, u komparatorima i tako dalje. Smatra se da operacioni pojačavači čine gotovo polovinu svih proizvedenih linearnih integrisanih kola.

Razvoj ovih integrisanih kola odvijaće se i dalje u dva pravca. Sa jedne strane, teži se da se napravi standardni operacioni pojačavač široke namene, koji će moći da se koristi u što većem broju uredjaja, dok se, istovremeno, radi i na usavršavanju pojačavača specijalne namene.

Prednosti integrisanih kola u odnosu na ona sa diskretnim komponentama su očigledne. Pouzdanost uredjaja je veća, dimenzije i težina su mnogo manje, potrošnja je manja, održavanje uređaja znatno lakše. Znatno se smanjuju i mnogi elementi veze: žič-

ne forme, broj lemnih mesta, broj konektora. Cena integrisanih kola mnogo je manja od cene odgovarajućeg kola u diskretnom izvodjenju.

Razvoj integrisanih kola još više će poboljšati ove prednosti, tako da se može očekivati da će ova kola u budućnosti gotovo potpuno istisnuti kola sa diskretnim elementima.

#### 4. 2. Problemi u radu sa operacionim pojačavačima

I pored svih prednosti linearnih integrisanih kola, postoje i određeni problemi koji se javljaju u njihovoj proizvodnji i u radu sa njima.

Zahtev za minijaturizacijom kola i njegovom realizacijom na jednoj poluprovodničkoj pločici nije uvek ostvarljiv. Problem pretstavljaju kapaciteti i induktivnost. Monolitskom tehnologijom do sada su ostvarene induktivnosti ne veće od nekoliko mikrohenrija. Teško je konstruisati i kondenzatore veće od 100 pF. U slučaju da su potrebne veće vrednosti, jedino rešenje je da se primeni hibridna tehnologija i da se diskretna induktivnost ili kapacitet pričvrste za monolitsku pločicu [1]. Problem pretstavlja i snaga ovih uređaja. Integrисано kolo koje bi imalo snagu veću od 5 W bilo bi veoma neekonomično u odnosu na uređaje sa diskretnim komponentama.

I u radu sa ovim kolima javljaju se izvesne teškoće. Konkretno, u radu sa operacionim pojačavačem  $\mu$ A 747 DC teškoću su pretstavljala merenja sa otvorenom petljom.

Operacioni pojačavači su predviđeni za rad u režimu sa povratnom spregom, tako da i merenja koja se vrše bez ove sprege pretstavljaju problem. Prvi problem je samo pojačanje pojačavača na frekvencijama nižim od  $10^3$  Hz / za  $\mu$ A 747 DC pojačanje iznosi od  $10^3$  do  $10^5$ .

Sve spoljašnje smetnje se pojačavaju u velikoj meri. Rešenje je u mikrominiturizaciji, dobrom uzemljenju /oklopiti uređaj ili koristiti oklopne kablove / i dobro stabilizovanoj mreži. Na nižim frekvencijama oseća se i uticaj napona razdešenosti, koji je teško potpuno anulirati. Ovo se rešava postavljanjem veoma preciznog, zgodnog za podešavanje potenciometra na za to predviđeno

mesto. Na višim frekvencijama javlja se šum koji utiče na tačnost merenja. Ovde se mora obratiti pažnja i na brzinu prebacivanja, koja ograničava izlazni napon na visokim frekvencijama / naročito na frekvencijama višim od 100 KHZ do 200 KHZ/. Uticaj temperaturu na pojačavač takođe nije bez značaja i najbolje je stalno raditi pri konstatnoj temperaturi ambijenta, jer su tada sve karakteristike konstantne u svim merenjima / ne menjaju se od merenja do merenja/.

Ovo su značajniji problemi koje susrećemo u radu sa operacionim pojačavačima.

N a p o m e n a: U toku rada došlo je do izvesne neispravnosti osciloskopa. Ovo se primećuje na jednom delu oscilograma - fotografija kao nelinearnost rasporeda signala po X osi /kao da su svi signali sabijeni na desnu stranu /. Zbog toga ispod takvih slika ne piše vrednost vremenske baze, nego vrednost frekvencije pročitana sa generatora signala. Očitavanje trajanja perioda i frekvencije sa osciloskopa nepouzdano je.

Z A K L J U Č A K

Sadržaj ovoga rada je prikaz osobina, mogućnosti i nekih vidova primene operacionih pojačavača preko jednog njihovog tipičnog pretstavnika široke namene.

Pristup proračunavanju i realizaciji više različitih tipova kola preko idealnog operacionog pojačavača pokazao je dobre rezultate. Ova aproksimacija daje dobro slaganje teorijski očekivanih i praktično merenih vrednosti, tako da se može koristiti uvek, osim u slučaju kada se zahteva ekstremna tačnost u projektovanju.

Ovakav metod rada čini operacione pojačavače, zbog jednostavnog pristupa i realizacije kola, veoma pogodnim za praktičan rad.

Zbog bogatstva mogućnosti, univerzalnosti i relativno male cene, ova vrsta linearnih integrisanih kola postaje sve značajnija u praksi.

Ovo je i razlog tome da se javlja potreba za boljim upoznavanjem operacionih pojačavača, što je i namera ovoga rada.

S P I S A K O Z N A K A

- $A_o$  pojačanje operacionog pojačavača sa otvorenom petljom za jednosmerni signal
- $A(f)$  pojačanje operacionog pojačavača sa otvorenom petljom za naizmenični signal
- $A_r (A_r, A'_r, A_r, \dots)$  pojačanje pojačavača sa zatvorenom petljom računato prema izrazima za kola sa idealnim operacionim pojačavačem
- $A_s (A_s, A'_s, A_s, \dots)$  stvarno, mereno pojačanje pojačavača sa zatvorenom petljom
- $K (K_1, K_2, \dots)$  odnos maksimalnih vrednosti ulaznog i izlaznog signala
- $V_i$  ulazni signal
- $V_o$  izlazni signal
- $V_s$  signal generatora
- $V_s$  napon napajanja
- $V_{10}$  napon razdešenosti na ulazu
- $V_{00}$  napon razdešenosti na izlazu
- $V_{i\max}, V_{o\max}$  maksimalne vrednosti ulaznog i izlaznog signala
- $V_{IM}, V_{OM}, I_{OM}, V_{SM}$  maksimalni dozvoljeni nivoi
- $I_b^+, I_b^-$  struje pobude
- $I_{IO}$  struja razdešenosti
- $I_f, I_s$  struje kroz otpore
- $C$  kapacitet kondenzatora
- $R (R_f, R_s, R_L, R_D, R_1, \dots)$  aktivni, omski otpori
- $R_i, R_o$  aktivni deo ulazne i izlazne impedanse
- $Z, Z_f, Z_s$  impedanse
- $f$  frekvencije
- $f_p$  prelomna frekvencija operacionog pojačavača sa otvorenom petljom
- $f_{pr}$  prelomna frekvencija pojačavača sa zatvorenom petljom - računata
- $f_{ps} (f_{p1}, f_{p2}, \dots)$  prelomna frekvencija pojačavača sa zatvorenom petljom - merena

L I T E R A T U R A

- [1] D. M. Pantić - B.M. Milojević : Linearna integrisana kola i njihova primena, Tehnička knjiga, Zagreb 1974.
- [2] Raković B. D. : Elektronika I, Naučna knjiga, Beograd 1972.
- [3] J. Millman - C.C. Halkias : Integrated Electronics, Analog and Digital Circuits, International Student Edition, Mc Graw - Hill Kogakusha. LTD. Tokyo 1972.
- [4] G. B. Clayton : Experiments with Operational Amplifiers, Wireless World, South Croydon, juni-novembar 1972.
- [5] Pavlov M. : Elektronika II, skripta, Novi Sad 1973.
- [6] RCA : Linear Integrated Circuits, RCA Corporation, Somerville 1972.
- [7] Bajić D. : Elektronska kola, uredjaji i merni instrumenti II, Beogradski izdavačko grafički zavod, Beograd 1972.
- [8] Cvekić V. : Integrisana kola, Tehnička knjiga, Beograd 1973.