

I_{pom} povećava se ostaje ista smanjuje se
puta ? puta

4.1. Spojite maketu tako da se može mjeriti ulazni napon pomaka (Sl. 2.3). Pojačanje namjestite tako (otpornici ($R_1 + 100\Omega$) i R_2 na maketi) da izlazni napon uslijed napona pomaka pojačala bude u području 1V. Ulazni napon pomaka U_{pm} odredite prema (9).

U_{pom} povećava se ostaje ista smanjuje se $\frac{dU_{\text{pom}}}{dT} > 0$
puta $\times 1,1$
($\approx 10\%$) puta

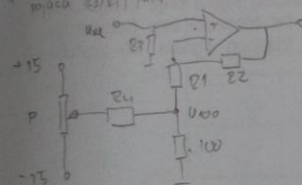
5.1. Na temelju rezultata mjerenja ($U_{\text{pri}}, I_{\text{in}}, I_{\text{opt}}$) nacrtajte shemu (Sl. 2.4) i izračunajte elemente sklopa za kompenzaciju izlaznog napona pomaka za **neinvertirajuće** pojačalo s pojačanjem $A=100$ i ulaznim otporom $22\text{ k}\Omega$. Podaci o temperaturnom klizanju operacijskog pojačala nalaze se u DODATKU.

Zastavite operacijsko pojačalo na maketi. Pratite izlazni napon. Je li kompenzacijom napona izlazni napon pomaka jednak nuli u širem temperaturnom području?

5.3. U Tablici operacijskih pojačala u DODATKU očitajte granice vrijednosti napona i struja pomaka te temperaturnog klizanja za operacijska pojačala deklarirana kao (precizna) pojačala s malim naponima pomaka, te pojačala s velikom brzinom porasta (slew rate) i širokopojasnih pojačala. Očitane vrijednosti upišite u tablicu:

Operacijska pojačala	U_{pom} [μV]	dU_{pom}/dT [$\mu V/^{\circ}C$]	I_{pom} [nA]	dI_{pom}/dT [nA/ $^{\circ}C$]	I_{id} [nA]
Precizna	10-500	0,1-3	0,002-35	75-180	0,002-40
S velikom brzinom porasta	300	1	-	9 000	450
Širokopojasna	10 000	5	400	7 000	8 000

NEINVERTIRAJUĆE
+ neinvertirajućeg ulaznog signala, ali U_{100m}



$$\left| \frac{I_2}{R_1} \right| U_{100m} \geq U_{12/off}$$

$$U_{100m} \geq \frac{R_1}{R_2} U_{12/off} = \frac{1}{14} U_{12/off}$$

$$U_{100m} = 15V \cdot \frac{100}{R_1 + 100}$$

$$R_1 = \frac{15V \cdot 100}{U_{100m}} - 100$$

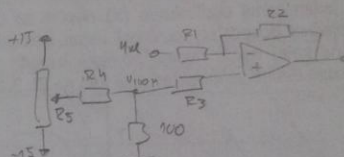
$$R_1 = 107,1 \Omega \pm 5\Omega$$

$$R_2 = 15 M\Omega$$

TL081: $U_{12/off} = 120,075 mV$
 $U_{100m} \geq 8,577 mV$
 $R_1 \leq 174,791 \pm 5\Omega$
 $R_1 = 150 \pm 5\Omega$

LM741: $U_{12/off} = 105 mV$
 $U_{100m} \geq 7,5 mV$
 $R_1 \leq 199,9 \pm 5\Omega$
 $R_1 = 180 \pm 5\Omega$

INVERTIRAJUĆE



$$\left| \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) U_{100m} \right| \geq U_{12/off}$$

$$U_{100m} \geq \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{12/off} = \frac{1}{16} U_{12/off}$$

$$U_{100m} = 15V \cdot \frac{100}{R_1 + 100}$$

$$R_1 = \frac{15V \cdot 100}{U_{100m}} - 100$$

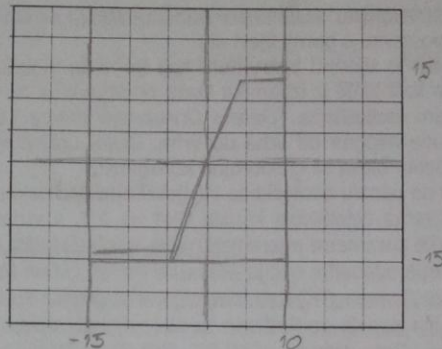
$$R_1 = 100 \pm 5\Omega$$

$$R_2 = 1,5 M\Omega$$

TL081: $U_{12/off} = 128,075 mV$
 $U_{100m} \geq 8,005 mV$
 $R_1 \leq 187,21 \pm 5\Omega$
 $R_1 = 150 \pm 5\Omega$

LM741: $U_{12/off} = 110 mV$
 $U_{100m} \geq 6,875 mV$
 $R_1 \leq 217,382 \pm 5\Omega$
 $R_1 = 180 \pm 5\Omega$

$x = CH1 \quad u/a2$
 $y = CH4 \quad i2/a2$



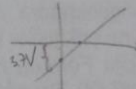
$F_x = 5V/div \quad F_y = 6V/div$

Amplitudno-amplitudna karakteristika pojačala u otvorenoj petlji

3. Mjerenje izlaznog napona pomaka

3.1. Osjetljivosti prikaza amplitudno-amplitudne karakteristike postavite tako da se vidi uski dio oko ishodišta te je moguće očitati izlazni napon uslijed ulaznog napona i struje pomaka.

$U_{pom\ iz} [V]$	3.7V
-------------------	------



Koja ulazna veličina najviše doprinosi izlaznom naponu i zašto?

I_{pom}

U_{pom}

zbog velikog ulaznog otpora

4. Snimanje amplitudno-frekvencijske karakteristike pojačala uz otvorenu petlju povratne veze

4.1. Pomoću programa HP VEE izvedite automatsko mjerenje amplitudno-frekvencijske karakteristike. Postavite panel **generatora funkcija** u sredinu zaslona. Na panelu odaberite **sinusni signal** frekvencije 100Hz, amplitudu postavite tako da izlazni napon očitani na osciloskopu (CH4) bude 10V od vrha do vrha. (Preklopka za kompenzaciju u položaju KOMP1.) *$U_{in} = 3.2 + 1.3$*
 Potrebno je odrediti frekvencijsko područje snimanja amplitudno-frekvencijske karakteristike. Generatoru funkcija dodajte ulazni podatkovni priključak za frekvenciju. (State driver \Rightarrow Add terminal \Rightarrow Data Input \Rightarrow (Select Input to Add) \Rightarrow FREQUENCY (Real) \Rightarrow OK) Otvorite izbornik **Flow** i odaberite opciju **For Log Range**. (Flow \Rightarrow Repeat \Rightarrow For Log Range). Postavite dobiveni panel lijevo od panela funkcijskog generatora. Ovaj panel predstavlja programski odsječak kojim se određuje promjena frekvencije funkcijskog generatora. U mjesta *From*, *Thru*, */Dec* upišite početnu, završnu frekvenciju i korak promjene frekvencije (logaritamsko mjerilo). Upišite **10, 100k, 10**. Time će se frekvencija mijenjati od **10Hz-100kHz s 10 koraka po dekadi**.

Da biste mogli pratiti promjenu frekvencije signala funkcijskog generatora, potrebno je dodati programski blok za kašnjenje kojim se unosi kašnjenje nakon svakog koraka promjene frekvencije. U izborniku **Flow** odaberite opciju **Delay**. (Flow \Rightarrow Delay) Panel funkcije kašnjenja postavite ispod bloka **For Log Range**. U blok za kašnjenje upišite **1**. Time se unosi kašnjenje 1s. Potrebno je dodati i programski blok za pokretanje programa. U izborniku **Flow** odaberite opciju **Start**. (Flow \Rightarrow Start) Blok za pokretanje programa postavite iznad bloka **For Log Range**.

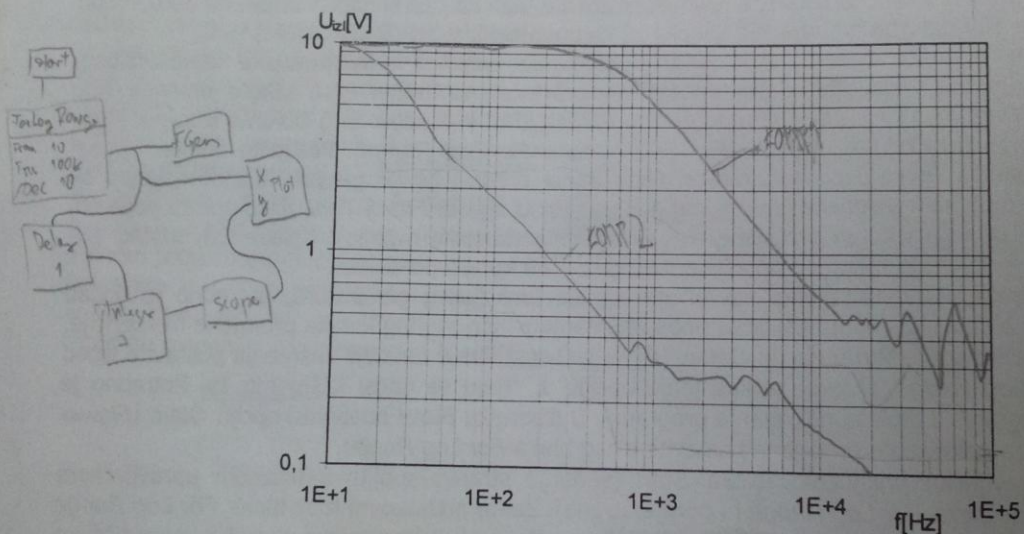
Izlaznu upravljačku priključnicu bloka **Start** (s donje strane) spojite s ulaznom upravljačkom priključnicom bloka **For Log Range** (s gornje strane). Zatim podatkovni izlaz bloka **For Log Range** spojite s podatkovnim ulazom (**FREQUENCY**) panela funkcijskog generatora i s upravljačkim ulazom bloka za kašnjenje. Ovim je određena programska struktura koja će upravljati radom

Terminal⇒ Data output⇒ PULSE_MSMT_VALUE⇒ OK). Time je omogućena primjena podatka o vršnoj vrijednosti napona izmjerenog kanalom CH4 osciloskopa za snimanje amplitudno-frekvencijske karakteristike. Minimizirajte panel digitaliziranog osciloskopa. Povežite izlaznu cjelobrojnu konstantu s ulaznom priključnicom PULSE_MSMT panela

stranica 17.

Na bloku za prikaz podataka, iz vršne vrijednosti napona izmjerenog osciloskopom i postavljene vrijednosti frekvencije signala generatora funkcija, iscrtava se amplitudno-frekvencijska karakteristika. Na ulazne podatkovne priključke bloka za XY prikaz priključite podatkovni izlaz bloka za određivanje promjene frekvencije *For Log Range* (X) i podatkovni izlaz panela digitaliziranog osciloskopa PULSE_MSMT_VALUE (Y). Povećajte blok za XY prikaz tako da zauzima najveći dio zaslona. Postavite logaritamsku skalu na X i Y osi i to kroz 6 dekada. (XvsY Plot⇒ Edit Properties⇒ (Traces and Scales)⇒ Mapping⇒ Linear/Log, Log Cycles⇒ 6⇒ OK) Uključite oznake koje ćete koristiti pri mjerenju (Markers⇒ Two, Interpolate). Isključite brisanje prethodnog prikaza pri iscrtavanju sljedećeg. (Initialization⇒ Clear at PreRun, Clear at Activate⇒ Off⇒ OK). Izbrišite prikaz dobiven u točki 2.1. (XvsY Plot⇒ Clear Control⇒ Display)

Pritiskom na tipku **START** snimite **amplitudno-frekvencijsku karakteristiku pojačala u otvorenoj petlji** za kompenzaciju KOMP1, u frekventijskom opsegu od 10Hz do 100kHz. Na bloku za XY prikaz odaberite opciju za snimanje nove krivulje. (XvsY Plot⇒ Clear Control⇒ Next Curve) Preklopku na maketi prebacite u položaj KOMP2, te snimite i ovu amplitudno-frekvencijsku karakteristiku. Precrtajte i označite snimljene amplitudno-frekvencijske karakteristike:



stranice 17&18.

Očitajte granične frekvencije pojačala u otvorenoj petlji za pojedine kompenzacije s izmjerene karakteristike (rabite markere):

f_{gK1} [Hz]	389
f_{gK2} [Hz]	247

* markering (10/12 izlazi napon)

5. Utjecaj povratne veze na stabilnost pojačala

5.1. Odspojite ulazni napon i isključite napajanje makete. Između priključnica 2 i 3, te 4 i 5 na maketi spojite otpornike od $1k\Omega$. Između priključnica 6 i 7 na maketi spojite visokoomsku dekadu. Na visokoomskoj dekadi postavite otpor $1k\Omega$. Izlaz makete promatrajte na osciloskopu (LOCAL).

Napomena: Oklop dekade uzemljite na maketi.

Analizirajte električku shemu sklopa (Sl. 3.4). Izračunajte pojačanje tako spojenog pojačala:

A_1	2
-------	---

$$A = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \quad (\text{neinvertirajućem p.})$$

Uključite napon napajanja makete. Prebacite preklopku za kompenzaciju u položaj KOMP1. Izmjerite frekvenciju samooscilacija pojačala:

f_{oscK1} [kHz]	853
-------------------	-----

~ period 1500 ns

Povećavajte pojačanje pojačala (promjenom otpora dekade) dok oscilacije ne prestanu. Kod kojeg pojačanja prestaju samooscilacije?

$A_2 = A_{os}$	19
----------------	----

$$A = 1 + \frac{18k}{1k}$$

Prebacite preklopku za kompenzaciju u položaj KOMP2 te smanjujte pojačanje. Dolazi li do samooscilacija?

pojačalo oscilira

pojačalo ne oscilira

Usporedite rezultate ovog mjerenja sa snimljenim amplitudno-frekvencijskim karakteristikama za obje kompenzacije.

U drugom slučaju je pojačalo je bolje kompenzirano

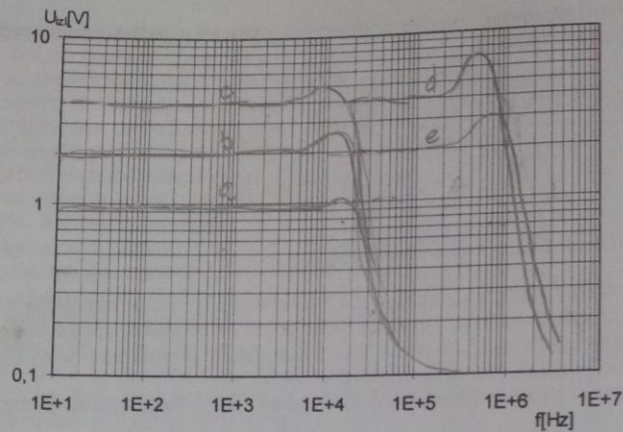
6. Amplitudno-frekvencijska karakteristika pojačala uz zatvorenu petlju povratne veze

6.1. U ovoj točki se promatra amplitudno-frekvencijska karakteristika pojačala uz različita pojačanja. Ponovite postupak iz točke 4.1, na panelu funkcijskog generatora postavite amplitudu napona **100mV** od vrha do vrha, a frekvenciju mijenjajte od **10Hz-10MHz** s korakom 10. Na izborniku Main Panel na panelu osciloskopa postavite osjetljivost kanala CH4 na **500mV**, a kanala CH1 na **50mV**. Izbrišite prikaz na bloku XY dobiven u točki 4.1. (XvsY Plot \Rightarrow Clear Control \Rightarrow Display)

Napon iz generatora funkcija priključite na priključnicu 3' na maketi. Pojačanje pojačala postavite pomoću otporničke dekade. Uz iste parametre mjerenja snimite amplitudno-frekvencijske karakteristike za pojačanja 5, 10 i 20 puta za obje kompenzacije. Precrtajte i označite amplitudno-frekvencijske karakteristike za kompenzacije KOMP1 i KOMP2:

* naredba
prevelik
po frekvi
maji zbog
odpovij

stranice 18,19&20.

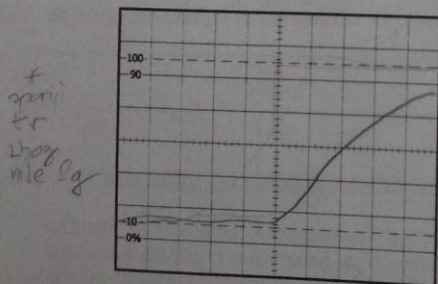


Očitajte granične frekvencije za sve slučajeve:

A	5	10	20
f_{gK1} [kHz]	osc	90 ^a	700 ^a
f_{gK2} [kHz]	80 ^a	40 ^b	20 ^c

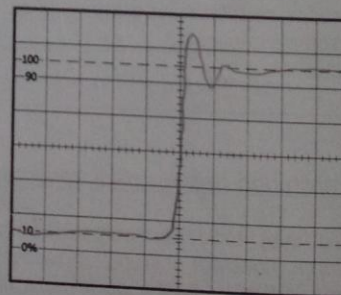
7. Odziv pojačala na pravokutni napon

7.1. Pomoću visokoomske dekadje namjestite pojačanje pojačala 20 puta. Na panelu funkcijskog generatora postavite pravokutni napon frekvencije **500Hz**. Amplitudu namjestite tako da izlazni napon makete bude **10V** od vrha do vrha. Izlaz generatora funkcija spojite u točku 3' na maketi. Na osciloskopu s prednje ploče (**LOCAL**) namjestite vremensku bazu, osjetljivosti kanala te otvorite izbornik **DISPLAY** i izaberite prikaz u jednom prozoru s uključenim rasterom i povezivanje točaka. Snimite oscilogram uzlaznog brida izlaznog pravokutnog napona za obje frekvencijske kompenzacije pojačala uz jednako vremensko mjerilo (**10μs**).



Odziv na skokovitu pobudu uz kompenzaciju dominantnim polom (KOMP 2)

$$F_x = 2V/div \quad F_y = 10μs/div$$



Odziv na skokovitu pobudu uz kompenzaciju polom i nulom (KOMP 1)

$$F_x = 2V/div \quad F_y = 10μs/div$$

U kakvoj su vezi snimljeni oscilogrami s amplitudno-frekvencijskim karakteristikama pojačala?

Nadvišenje u karakteristikama → istovremeno

PRIPREMNI ZADACI

1. Neinvertirajućim pojačalom izvedenim operacijskim pojačalom treba pojačavati zadane napone:

amplituda ulaznog napona $U_{ul}[V]$	pojačanje
0,01	750
0,1	100
1	7,5
2	1
5	2
10	1

Odredite amplitude izlaznih napona operacijskog pojačala. Izračunajte najviše frekvencije sinusnog i trokutastog napona tih amplituda koji se može pojačati bez izobličenja uslijed konačne brzine porasta izlaznog napona pojačala.

Vrijednosti odredite za operacijska pojačala **LM741** i **TL081** za koje se podaci nalaze u DODATKU.

$$v_o(t) = V_m (1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_t} = \frac{0,16}{f_t}$$

$$t_R = \tau (\ln 0,9 - \ln 0,1) = \tau \cdot 2,2$$

$$t_R = 2,2 \cdot \tau = 2,2 \cdot \frac{0,16}{f_t} = \frac{0,35}{f_t}$$

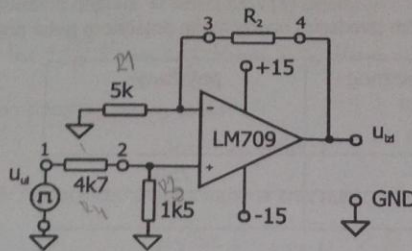
$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V_m (cent)}{\tau}$$

$$V_m (cent) = SR \cdot \tau = SR \cdot \frac{1}{2\pi f_t}$$

$$\left(\frac{dv_o}{dt} \right)_{max} \leq SR$$

$$f \cdot V_{om} \leq \frac{SR}{2\pi}$$

$$2\pi f \cdot V_{om} \leq SR$$



Slika 4.2 Električka shema makete za mjerenje vremena porasta i granične frekvencije operacijskih pojačala

1. Maketu s integriranim krugom spojite prema Sl. 4.2 kao neinvertirajuće pojačalo. U krug povratne veze spojite otporničku dekadu R_2 , između invertirajućeg ulaza pojačala i mase na maketi je spojen otpornik od $5k\Omega$. Funkcijski generator se spaja u priključnicu 2 ili preko otpornog djelila 1:4 (otpornici $1,5k\Omega$ i $4,7k\Omega$ su ugrađeni na maketi) u priključnicu 1.

Prema izrazu (9) za pojačanje neinvertirajućeg pojačala izračunajte veličinu otpora R_2 tako da pojačanje pojačala iznosi 5 i 50 puta.

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad R_2 = (A-1) \cdot R_1 \quad (9).$$

A	5	50
R_2 [k Ω]	20 k Ω	245 k Ω
R_1 [k Ω]	5	5

2. Mjerenje vremena porasta t_r

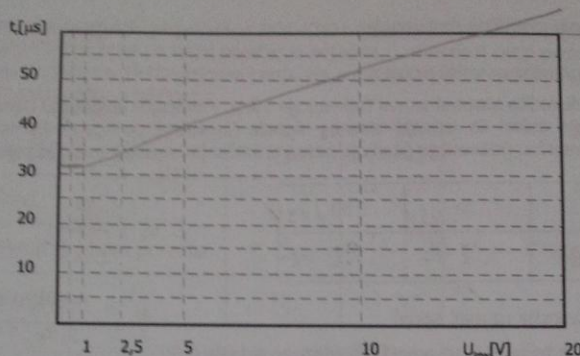
2.1. Namjestite otpor dekad tako da je pojačanje pojačala 50. Na ulaz pojačala dovedite **pravokutni** napon frekvencije 300Hz.

Napomena: Oklop otporničke dekad uzemljite na maketi.

Izmjerite ovisnost vremena porasta t_r o vršnoj vrijednosti **izlaznog** napona U_{iz} koji se mijenja promjenom ulaznog napona pojačala. *+ može se mijenjati atenuacija -10, -20, -40 dB Voltcraft*

$U_{iz\text{ vr}}$ [V]	0,5	1	2,5	5	10	20
t_r [μ s]	32 μ s	32 μ s	34 μ s	60 μ s	52 μ s	108 μ s

2.2. Prikažite grafički ovisnost izmjerenog vremena porasta o veličini izlaznog napona $t_r = f(U_{iz\text{ vr}})$.

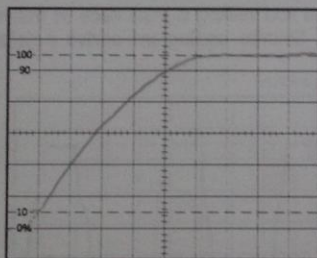


Izmjerena ovisnost vremena porasta t_r o vršnoj vrijednosti izlaznog napona pojačala U_{izl}

2.3. Iz grafičkog prikaza zaključite kod kojih napona pojačalo radi u području malih odnosno velikih signala.

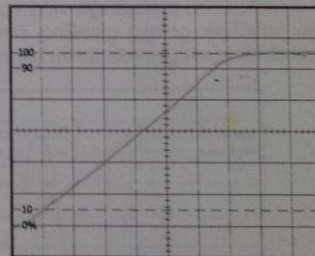
područje malih signala	područje velikih signala
$U_{izl w} < 5 V$	$U_{izl w} > 10$

2.4. Nacrtajte oscilogram **prednjeg brida** izlaznog napona za veliki i mali signal.



Oscilogram izlaznog napona u području malog signala

$F_x = 10 \mu s/div$ $F_y = 0.2 V/div$



Oscilogram izlaznog napona u području velikog signala

$F_x = 20 \mu s/div$ $F_y = 5 V/div$

3. Određivanje najveće brzine porasta izlaznog napona pojačala P

3.1. Iz oscilograma prednjeg brida pravokutnog napona veličine $20V_w$ na izlazu pojačala dobivenog u točki 2.4. odredite najveću brzinu porasta napona $(du_{izl}/dt)_{max}$ pojačala (slew rate). Dobiveni rezultat usporedite s vrijednosti za maksimalnu brzinu porasta izračunatu iz grafičkog prikaza (točka 2.2).

	$\left(\frac{du_{izl}}{dt}\right)_{max} [V/\mu s]$
izmjereno	0.1667
izračunato	

$$p = \frac{0.8}{t_r} \cdot U_{izl max}$$

$$= \frac{0.8}{110} \cdot 25$$

$$= 0.181$$

4. Mjerenje gornje granične frekvencije

4.1. Granična frekvencija uz veliki signal

Na ulaz pojačala dovedite **sinusni** signal frekvencije 30Hz. Povećajte amplitudu ulaznog signala do veličine nakon koje dolazi do rezanja izlaznog signala (zasićenje pojačala). Uz takvu amplitudu odredite gornju graničnu frekvenciju (do koje nema izobličenja napona) za pojačanje 5 i 50 puta.

A	5 / 12.5V	50 / 25V
f_{gr} [kHz]	3.02 kHz	2.72 kHz

$$P \leq \frac{P}{U_m 2\pi}$$

4.2. Granična frekvencija uz mali signal

Poponite mjerenje iz točke 4.1. uz amplitudu izlaznog signala 0,5V.

A	5	50
f_{gr} [kHz]	60 kHz	12 kHz

$$A=50 \quad 2 \cdot U_m = 25V$$

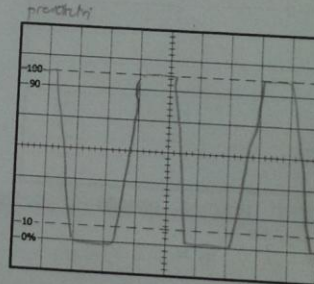
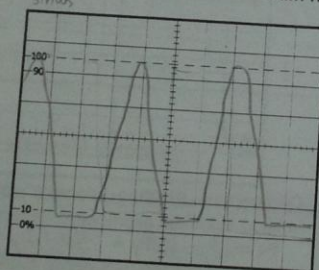
$$A=5 \quad 2 \cdot U_m = 12.5V$$

Zašto je granična frekvencija u ovim mjerenjima različita?

za veći signal je f_{gr} manji zbog točnije frekvencije pojačala

5. Izobličenje signala

5.1. Na osciloskopu promatrajte valni oblik izlaznog napona kod velikog signala kada se frekvencija signala približava gornjoj graničnoj frekvenciji pojačala. Snimite oscilogram odziva pojačala uz pobudu **sinusnim** i **pravokutnim** ulaznim naponom.



Izlazni napon uz sinusnu pobudu

$$F_x = 0.2 \frac{V}{div} \quad F_y = 2 \frac{V}{div}$$

Izlazni napon uz pravokutnu pobudu

$$F_x = 0.5 \frac{V}{div} \quad F_y = 5 \frac{V}{div}$$

5.2. Usporedite gornju graničnu frekvenciju pojačala izmjerenu u točki 4.1. s izračunatom vrijednošću najviše frekvencije, prema izrazu (8). Za najveću brzinu porasta uvrstite veličinu dobivenu mjerenjem u točki 3.1.

	f_{max} [kHz]
izmjereno	3.5
izračunato	2.5 ⁹

$$U_m = \frac{P}{U_m}$$

$$f_m \leq \frac{P}{2\pi U_m}$$

$$P = 0.16 \text{ V/}\mu\text{s}$$

$$2\pi f_m = \frac{0.16 \cdot 10^6}{1}$$

5.3. U **Tablici operacijskih pojačala** u DODATKU 3 očitajte vrijednosti najveće brzine porasta izlaznog napona i frekvencije na kojoj pojačanje pojačala u otvorenoj petlji padne na 1 za pojačala s velikom brzinom porasta, širokopojasna i pojačala s malim naponom pomaka (precizna). Očitane vrijednosti upišite u tablicu:

Operacijska pojačala	P [V/ μ s]	f_t [MHz]
Precizna	1.7	5
S velikom brzinom porasta	1200	60
Širokopojasna	350	400

