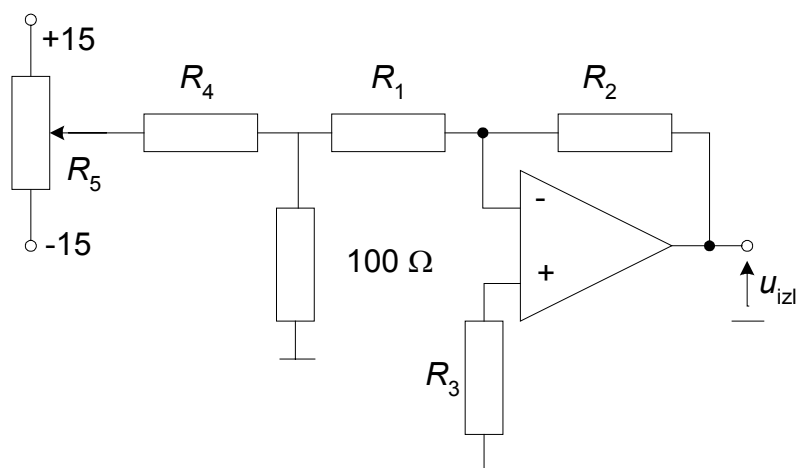


Proračunajte elemente i nacrtajte električne sheme pojačala izvedenih operacijskim pojačalom:

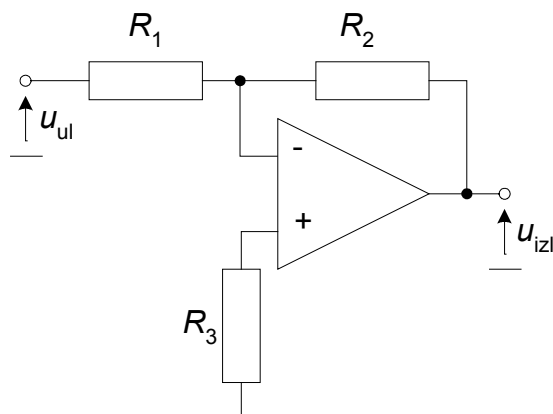
tip pojačala	pojaćanje	ulazni otpor
neinvertirajuće pojačalo	15	100 k Ω
invertirajuće pojačalo	-15	100 k Ω

Vrijednost otpornika odaberite tako da je izlazni napon pomaka uslijed ulaznih struja najmanji. Odredite izlazni napon pomaka za ta pojačala na sobnoj temperaturi, te njegovu promjenu uslijed promjene temperature u području od 0–40°C, i to ako su izvedena operacijskim pojačalom LM741 ili TL081 (podaci za navedena operacijska pojačala nalaze se u tablici). Za zadana pojaćanja proračunajte iznose otpornika u sklopu za kompenzaciju izlaznog napona pomaka na sobnoj temperaturi (prema shemi na slici).

PARAMETAR	OZNAKA	TL081	LM741
napon pomaka	U_{pom} [mV]	8	5
temp. klizanje napona pomaka	dU_{pom}/dT [$\mu V/^{\circ}C$]	10	60
ulazna struja	I_{ul} [nA]	0,2	200
ulazna struja pomaka	I_{pom} [nA]	0,05	20
temperatura klizanje struje pomaka	dI_{pom}/dT [pA/ $^{\circ}C$]	60	60
gustoća napona šuma	e_s [nV/ \sqrt{Hz}]@1kHz	15	23
gustoća struje šuma	i_s [pA/ \sqrt{Hz}]@1kHz	-	-
pojaćanje	A_v [dB]	106	94
umnožak pojaćanja i širine frekvencijskog pojasa	GBW [MHz]	4	0,7
najveća brzina porasta izlaznog napona	SR [V/ μs]	8	0,25
faktor rejekcije	CMMR [dB]	70	70
struja napajanja	I_s [mA]	2,5	2,8
napon napajanja	U_s [V]	$\pm 6/\pm 18$	± 22
ulazni otpor	R [Ω]	10^{12}	



INVERTIRAJUĆE POJAČALO



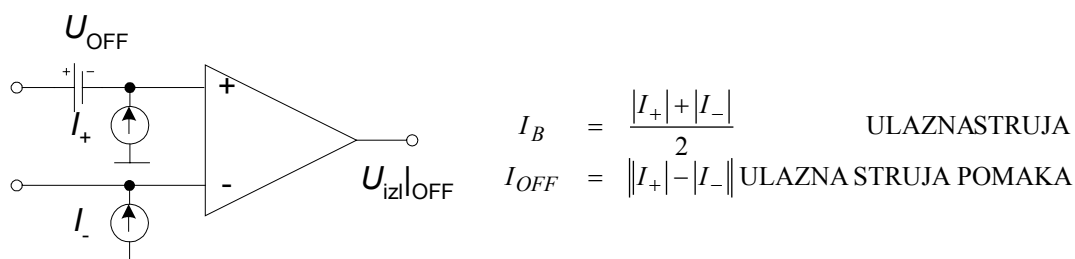
$$A = -15$$

$$R_{ul} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_{ul} = R_1 \Rightarrow R_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = -AR_1 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = 93,75 \text{ k}\Omega$$



$$U_{izl|OFF} = \left\{ |U_{OFF}| + |I_+| \cdot R_3 - |I_-| \cdot R_2 \parallel R_1 \right\} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$U_{izl|OFF} = \left\{ |U_{OFF}| + |I_{OFF}| \frac{R_3 + R_2 \parallel R_1}{2} + |I_B| \cdot (R_3 - R_2 \parallel R_1) \right\} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \Rightarrow R_3 = R_1 \parallel R_2 \Rightarrow$$

$$U_{izl|OFF} = \left\{ |U_{OFF}| + |I_{OFF}| \frac{R_3 + R_2 \parallel R_1}{2} \right\} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

TL081 (JFET)

$$U_{OFF} = 8 \text{ mV}$$

$$I_{OFF} = 0,05 \text{ nA}$$

LM 741 (BJT)

$$U_{OFF} = 5 \text{ mV}$$

$$I_{OFF} = 20 \text{ nA}$$

$$U_{izl|OFF} = 128,075 \text{ mV}$$

$$U_{izl|OFF} = 110 \text{ mV}$$

Promjena napona pomaka određuje se na osnovu dU_{izl}/dT :

$$\Delta U_{izlT} = \frac{dU_{izl}}{dT} \Delta T \rightarrow \boxed{\Delta U_{izlT} = \left\{ \left| \frac{dU_{OFF}}{dT} \right| + \left| \frac{dI_{OFF}}{dT} \right| R_3 \right\} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \Delta T}$$

Za $\Delta T = 40^\circ\text{C}$:

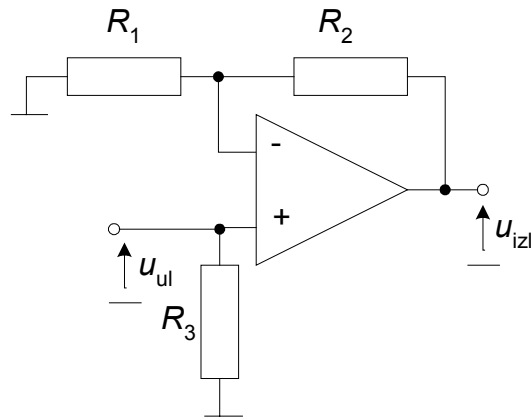
$$\begin{array}{l} \textbf{TL081} \\ dU_{OFF}/dT = 10 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \\ dI_{OFF}/dT = 60 \text{pA}/^\circ\text{C} \end{array}$$

$$\Delta U_{izlT} = 10 \text{ mV}$$

$$\begin{array}{l} \textbf{LM 741} \\ dU_{OFF}/dT = 60 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \\ dI_{OFF}/dT = 60 \text{pA}/^\circ\text{C} \end{array}$$

$$U_{izlT} = 42 \text{ mV}$$

(domaći rad) NEINVERTIRAJUĆE POJAČALO



$$A = 15$$

$$R_{ul} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_{ul} = R_3 \Rightarrow R_3 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 14$$

$$R_3 = R_1 \parallel R_2$$

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = R_3 \Rightarrow \frac{R_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = R_3$$

$$R_2 = AR_3 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

$$R_1 = R_2/14 = 107,14 \text{ k}\Omega$$

$$U_{iz/IFF} = \left\{ |U_{OFF}| + |I_{OFF}| \frac{R_3 + R_2 \parallel R_1}{2} \right\} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

TL081

$$U_{OFF} = 8 \text{ mV}$$

$$I_{OFF} = 0,05 \text{ nA}$$

LM 741

$$U_{OFF} = 5 \text{ mV}$$

$$I_{OFF} = 20 \text{ nA}$$

$$U_{iz/IFF} = 120,075 \text{ mV}$$

$$U_{iz/IFF} = 105 \text{ mV}$$

$$\Delta U_{iz/IT} = \frac{dU_{izl}}{dT} \Delta T \Rightarrow \Delta U_{iz/IT} = \left\{ \left| \frac{dU_{OFF}}{dT} \right| + \left| \frac{dI_{OFF}}{dT} \right| R_3 \right\} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \Delta T$$

Za $\Delta T = 40^\circ\text{C}$:

TL081

$$dU_{OFF}/dT = 10 \text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

$$dI_{OFF}/dT = 60 \text{ pA}/^\circ\text{C}$$

LM 741

$$dU_{OFF}/dT = 10 \text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

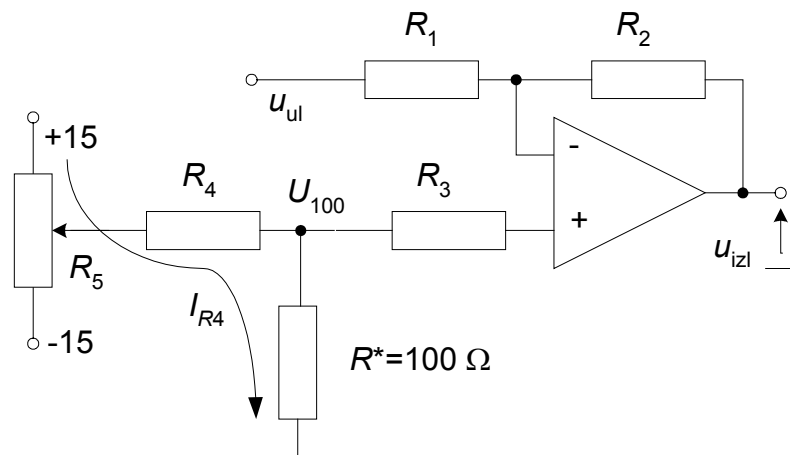
$$dI_{OFF}/dT = 60 \text{ pA}/^\circ\text{C}$$

$$\Delta U_{iz/IT} = 9,6 \text{ mV}$$

$$U_{iz/IT} = 39,6 \text{ mV}$$

Sklop za kompenzaciju napona pomaka:

INVERTIRAJUĆE POJAČALO



Dodaje se R^* s ciljem da pad napona na tom otporniku (U_{100}) kompenzira napon na izlazu koji je posljedica napona pomaka.

Dimenzioniranje otpora:

- $U_{R^*} \cdot (1 + R_2/R_1) \geq U_{izl|off}$
- $R^* \ll R_3$;
- $R_4 \gg$ (ograničava I_{R4}), takav da na R^* dobijemo odgovarajući napon
- $R_5 : I_{R4} = 2 - 5 \text{ mA}$

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

$$U_{100} \geq \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{izl|off} = \frac{1}{16} U_{izl|off}$$

$$U_{100} = 15 \text{ V} \frac{100}{100 + R_4}$$

$$R_4 = 15 \text{ V} \frac{100}{U_{100}} - 100$$

TL081

$$U_{OFF} = 128,075 \text{ mV}$$

$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega ; R_2 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

$$U_{100} \geq 8,005 \text{ mV}$$

$$R_4 \leq 187,3 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 150 \text{ k}\Omega$$

LM 741

$$U_{OFF} = 110 \text{ mV}$$

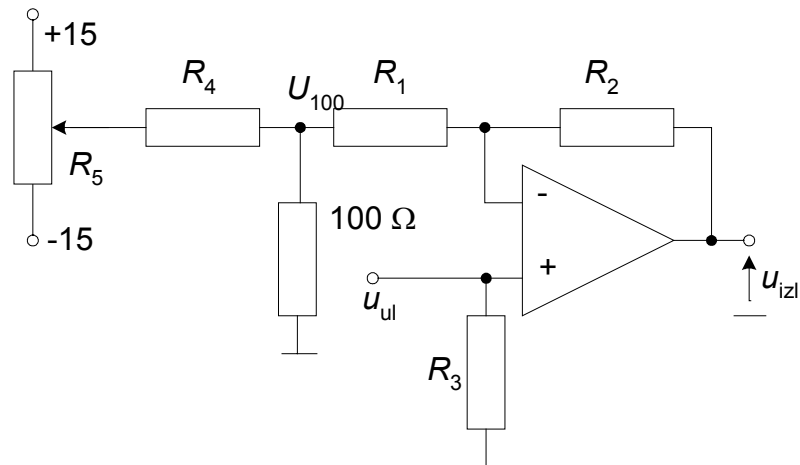
$$R_1 = 107,14 \text{ k}\Omega ; R_2 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

$$U_{100} \geq 6,875 \text{ mV}$$

$$R_4 \leq 217,98 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 180 \text{ k}\Omega$$

NEINVERTIRAJUĆE POJAČALO



$$\left| \frac{R_2}{R_1} U_{100} \right| \geq U_{izl_{off}}$$

$$U_{100} \geq \frac{R_2}{R_1} U_{izl_{off}} = \frac{1}{14} U_{izl_{off}}$$

$$U_{100} = 15 \text{ V} \frac{100}{100 + R_4}$$

$$R_4 = 15 \text{ V} \frac{100}{U_{100}} - 100$$

TL081

$$U_{\text{OFF}} = 120,075 \text{ mV}$$

$$R_1 = 107,14 \text{ k}\Omega ; R_2 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

LM 741

$$U_{\text{OFF}} = 105 \text{ mV}$$

$$R_1 = 107,14 \text{ k}\Omega ; R_2 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

$$U_{100} \geq 8,577 \text{ mV}$$

$$R_4 \leq 174,791 \text{ k}\Omega$$

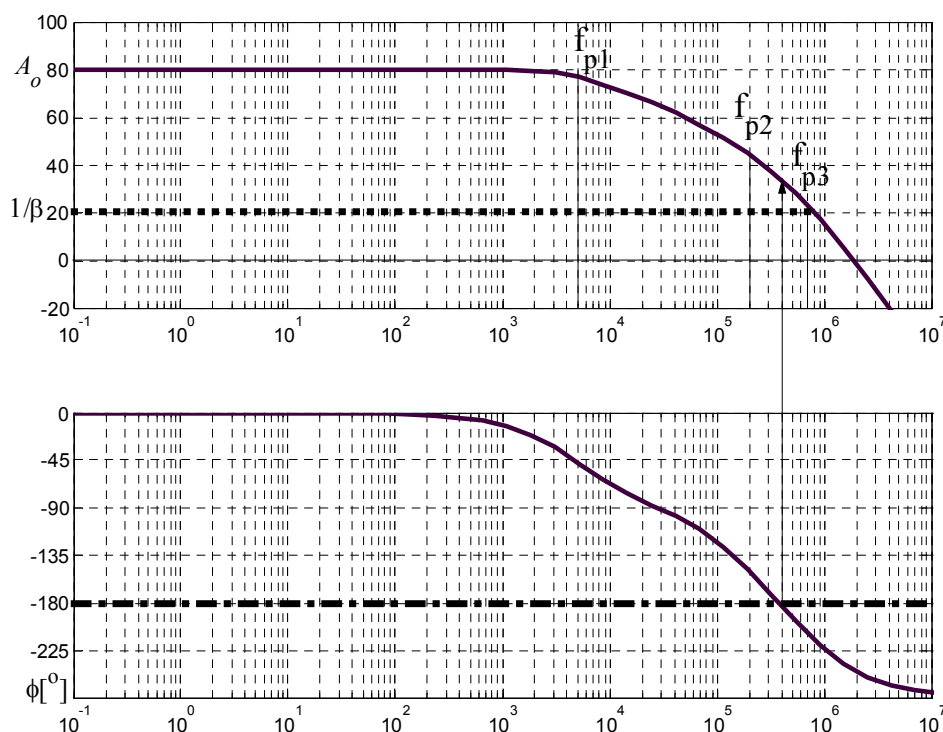
$$R_4 = 150 \text{ k}\Omega$$

$$U_{100} \geq 7,5 \text{ mV}$$

$$R_4 \leq 199,9 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 180 \text{ k}\Omega$$

Operacijskim pojačalom s nekompenziranom amplitudno – frekvencijskom karakteristikom zadanom slikom ($A_o=80$ dB, frekvencije polova $f_{p1}=5$ kHz, $f_{p2} = 200$ kHz, $f_{p3} = 700$ kHz) treba izvesti neinvertirajuće pojačalo pojačanja 10.



Odredite frekvenciju dominantnog pola kojim treba kompenzirati amplitudno – frekvencijsku karakteristiku pojačala da ne dođe do samooscilacija za zadano pojačanje, uz fazno osiguranje 45° .

Nacrtajte amplitudno i fazno frekvencijsku karakteristiku kompenziranog pojačala (Bode-ov dijagram).

Izračunajte najvišu frekvenciju signala koji se tim neinvertirajućim pojačalom može pojačati uz pogrešku uslijed konačnog pojačanja manju od 1 %.

$A_0=80 \text{ dB}$
 $f_{p1}=5 \text{ kHz}$
 $f_{p2} = 200 \text{ kHz}$
 $f_{p3} = 700 \text{ kHz}$
 $A=10$
 $f_\beta = 1 \text{ kHz}$
 $\text{F.O.} = 45^\circ$

Pojačanje povratne veze iznosi:

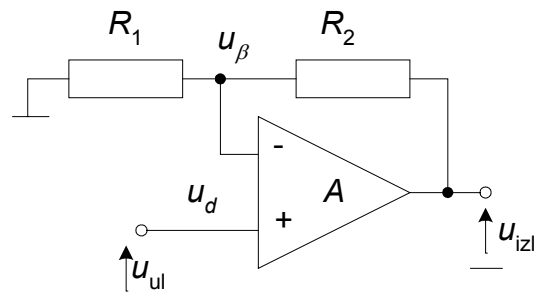
$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Ako je $A\beta \gg 1$, pojačanje zatvorene petlje iznosi:

$$A = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 10 = 20 \text{ dB}$$

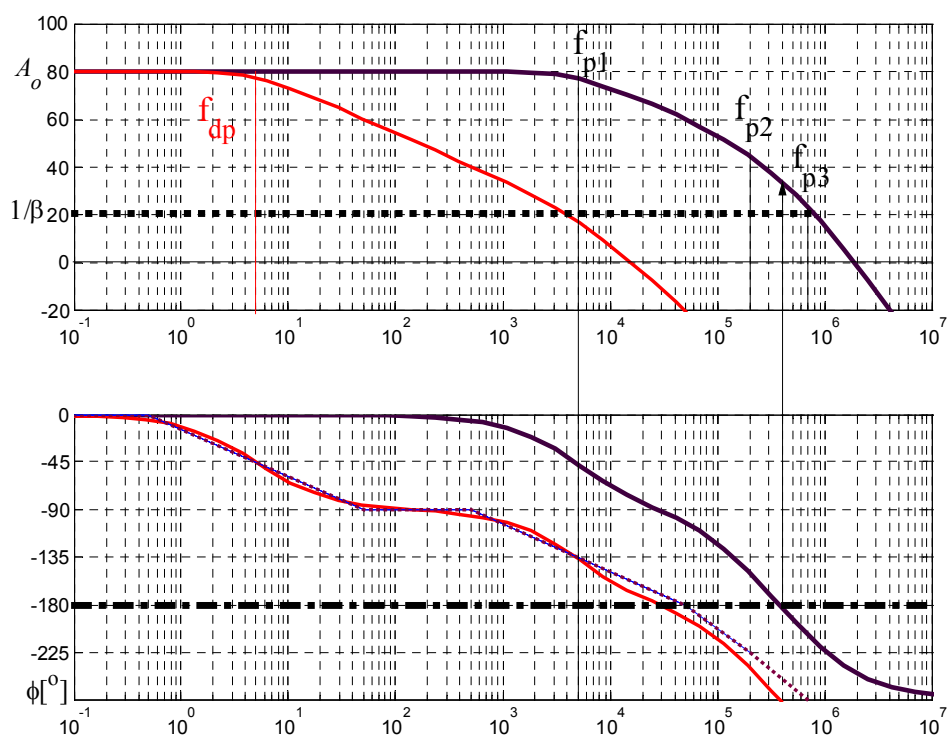
Opća formula za pojačanje zatvorene petlje:

$$\left. \begin{aligned} u_\beta &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{izl} \\ u_{izl} &= (u_{ul} - u_\beta) \cdot A(f) \end{aligned} \right\} A(f) = \frac{A(f)}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A(f)}$$



Kompenzacija dominantnim polom ($f_{dp} \ll f_{p1}$)

$\text{F.O.} = 45^\circ = (180^\circ - \varphi) \rightarrow$ Fazni kut mora biti barem $\varphi = 135^\circ$, na frekvenciji kod koje je pojačanje petlje (loop gain) $A(f_\beta)\beta = 1 \rightarrow A(f_\beta) = 1/\beta$
 Za $f \gg f_{dp}$ dominantni pol zakreće fazu za -90° . Na frekvenciji prvog slijedećeg pola (f_1) dolazi do dodatnog zakreta faze od dodatnih -45° . \rightarrow Ukupno: $\varphi = 135^\circ$. $\rightarrow f_\beta = f_{p1} = 5 \text{ kHz}$



$$A(f_\beta) = \frac{1}{\beta} \left\{ \begin{aligned} A_o f_{dp} &= \frac{1}{\beta} f_\beta \cdot f_{dp} = \frac{f_\beta}{A_o \beta} = \frac{f_{p1}}{A_o \beta} = \frac{5000}{10000 \cdot 0,1} = 5 \text{ Hz} \\ A(f_{dp}) &= A_o \end{aligned} \right.$$

Pogreška:

$$|p| = \left| \frac{A_{real} - A_{ideal}}{A_{ideal}} \right| = \left| \frac{A_{real}}{A_{ideal}} - 1 \right| \leq 0,01$$

$$\left| \frac{\beta A(f_g)}{1 + \beta A(f_g)} - 1 \right| = \left| \frac{\beta A(f_g) - 1 - \beta A(f_g)}{1 + \beta A(f_g)} \right| = \left| \frac{-1}{1 + \beta A(f_g)} \right| \leq 0,01$$

$$1 + \beta A_o(f_g) \geq 100$$

$$A_o(f_g) \geq \frac{99}{\beta} = 990 = 59,91 \text{ dB}$$

Očitano na frekvencijskoj karakteristici: $f_g = 50 \text{ Hz}$

(Domaći rad) Neinvertirajućim pojačalom izvedenim operacijskim pojačalom treba pojačavati zadane napone:

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

Odredite amplitudu izlaznog 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 tablici.

PARAMETAR	OZNAKA	TL081	LM741
napon pomaka	$U_{pom} [mV]$	8	5
temp. klizanje napona pomaka	$dU_{pom}/dT [\mu V/^{\circ}C]$	10	60
ulazna struja	$I_{ul} [nA]$	0,2	200
ulazna struja pomaka	$I_{pom} [nA]$	0,05	20
temperatura klizanje struje pomaka	$dI_{pom}/dT [pA/^{\circ}C]$	60	60
gustoća napona šuma	$e_s [nV/\sqrt{Hz}]@1kHz$	15	23
gustoća struje šuma	$i_s [pA/\sqrt{Hz}]@1kHz$	-	-
pojačanje	$A_v [dB]$	106	94
umnožak pojačanja i širine frekvencijskog pojasa	GBW [MHz]	4	0,7
najveća brzina porasta izlaznog napona	SR [V/ μs]	8	0,25
faktor rejekcije	CMMR [dB]	70	70
struja napajanja	$I_s [mA]$	2,5	2,8
napon napajanja	$U_s [V]$	$\pm 6/\pm 18$	± 22
ulazni otpor	$R [\Omega]$	10^{12}	

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

Brzina porasta signala mora biti manja od maksimalne brzine porasta signala:

Trokutasti napon

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{MAX} = \frac{2U_M}{\frac{T}{2}} = 4U_M f \leq SR$$

$$f_M \leq \frac{SR}{4U_M}$$

Sinusni napon

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{MAX} = \omega U_M \leq SR$$

$$f_M \leq \frac{SR}{2\pi U_M}$$

	TL081: SR= 8 V/μs f_M [kHz]		LM741: SR= 0,25 V/μs f_M [kHz]	
U_M [V]	<i>sinus</i>	<i>trokut</i>	<i>sinus</i>	<i>trokut</i>
2	637	1000	19,9	31,3
7,5	170	267	5,3	8,3
10	127	200	4	6,3

Šum mjernog pojačala zadan je spektralnim gustoćama naponskog šuma $6,7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ i strujnog šuma $1,2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ (izvori bijelog šuma). Izračunajte ukupnu vršnu vrijednost ulaznog napona šuma, ako se na pojačalo priključi izvor signala izlaznog otpora $2 \text{ k}\Omega$? Koliki je faktor šuma u tom slučaju? Odredite optimalnu vrijednost unutarnjeg otpora izvora signala i faktor šuma za tu vrijednost otpora.

$$\begin{aligned}u_s^* &= 6,7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \\i_s^* &= 1,2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \\R_g &= 2 \text{ k}\Omega \\T &= 298 \text{ K} \\k &= 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}\end{aligned}$$

Termički šum izlaznog otpora izvora je:

$$u_{sRg}^* = \sqrt{4kTR_g} = 5,737 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$$

Ukupna efektivna vrijednost šuma na ulazu pojačala jednaka je korijenu zbroja kvadrata svih izvora šuma:

$$u_{suk}^* = \sqrt{u_s^{*2} + (i_s^* \cdot R_g)^2 + u_{sRg}^{*2}} = 9,14 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Kako je šum stohastički signal, a efektivna vrijednost odgovara standardnom odstupanju, da bi dobili vrijednost od vrha do vrha moramo uzeti u obzir interval $\pm 3\sigma$.

$$u_{sukVV}^* = 6 \cdot u_{suk}^* = 54,85 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Faktor šuma je jednak omjeru ukupnog šuma i šuma na ulazu:

$$F = \frac{u_s^{*2} + (i_s^* \cdot R_g)^2 + u_{sRg}^{*2}}{u_{sRg}^{*2}} = 2,539 = 4,05 \text{ dB}$$

Optimalna vrijednost unutarnjeg otpora izvora signala s obzirom na faktor šum je vrijednost za koju imamo minimum faktora šuma:

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial F}{\partial R_g}\right) &= \frac{\partial}{\partial R_g} \frac{u_s^{*2} + (i_s^* \cdot R_g)^2 + 4kTR_g}{4kTR_g} = 0 \\ \left(\frac{\partial F}{\partial R_g}\right) &= -\frac{u_s^{*2}}{4kTR_g^2} + \frac{i_s^{*2}}{4kT} = 0\end{aligned}$$

$$R_{gOPT} = \sqrt{\frac{u_s^{*2}}{i_s^{*2}}} = 5,583 \text{ k}\Omega$$

$$F_{OPT} = 1 + \frac{\sqrt{u_s^{*2} \cdot i_s^{*2}}}{2kT} = 1,977 = 2,96 \text{ dB}$$