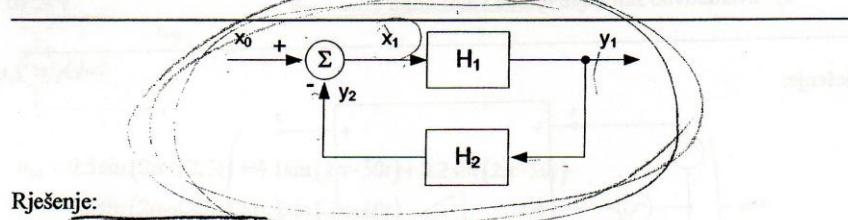


**Zadaci:**

- Mjerno pojačalo izvedeno je s povratnom vezom. Pojačalo ima pojačanje u glavnoj grani  $H_1=100$ , a u grani povratne veze  $H_2=100$ .
  - Kolika je pogreška mjerjenja koju unosi pojačalo?  $p=?$
  - Kolika je najveća moguća pogreška ovakvog pojačala ako pojačanja u pojedinim granama zbog nesavršenosti mogu odstupati  $\pm 10\%$  od nazivne vrijednosti.

$$p_{\max}=?$$



Rješenje:

a) 
$$p = \frac{y_2 - x_0}{x_0} \cdot 100\% \quad \text{pogreška mjerjenja}$$

$$\begin{aligned} y_2 &= H_2 \cdot y_1 = H_2 \cdot H_1 \cdot x_1 = H_1 H_2 (x_0 - y_2), \\ y_2 (1 + H_1 H_2) &= H_1 H_2 x_0 \end{aligned}$$

$$y_2 = \frac{H_1 H_2}{1 + H_1 H_2} x_0 \quad - \text{Želimo izraziti } y_2 \text{ preko } x_0$$

$$p = \frac{\frac{H_1 H_2}{1 + H_1 H_2} x_0 - x_0}{x_0} = \frac{H_1 H_2 - 1 - H_1 H_2}{1 + H_1 H_2} = \boxed{\frac{1}{1 + H_1 H_2} \cdot 100\%}$$

$$p = -\frac{1}{1 + 100 \cdot 100} \cdot 100\% = \boxed{-0,01\%}$$

b) 
$$\boxed{p_{\max} = -\frac{1}{1 + H_{1\min} \cdot H_{2\min}} \cdot 100\% = -\frac{1}{1 + 90 \cdot 90} \cdot 100\% = \boxed{-0,01234\%}}$$

Zavod za elektroničke sisteme i obradbu signala

2. Diferencijalnim pojačalom sa simetričnim izlazom čije je pojačanje  $A_d=1000$ , faktor rejekcije  $H=10^4$  i faktor diskriminacije  $F=10^4$  mjeri se protufazni napon

$$u_p = \Delta u_{12} = 10^{-3} \sin(2\pi \cdot 12,5 \cdot t) [V]$$

uz prisutnost istofaznog napona smetnji  $u_i$  od gradske mreže amplitude 2V.

a) skicirajte mjerne pojačalo

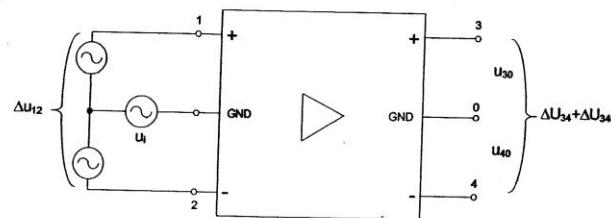
b) izračunajte analitički valni oblik napona  $u_{30}$  i  $u_{40}$

c) kvalitativno skicirajte njihov valni oblik

$$\begin{aligned} A_d &= 1000 & H &= 10^4 & \text{faktor rejekcije} \\ & & F &= 10^4 & \text{faktor diskriminacije} \end{aligned}$$

$$U_i = 2V$$

Rješenje:



a)  $u_p = \Delta u_{12} = 10^{-3} \sin(2\pi \cdot 12,5 \cdot t) [V]$

$u_i = u_{sm} = 2 \cdot \sin(2\pi \cdot 50t) [V]$ , - frekv. svestrje gradske mreže f=50 Hz  
 $A_d = 1000, H = 10^4, F = 10^4$

$$A_d = \frac{\Delta u_{34}}{\Delta u_{12}}$$

b)  $\Delta u_{34} = A_d \Delta u_{12} = 1000 \cdot 10^{-3} \sin(2\pi \cdot 12,5 \cdot t)$ ,

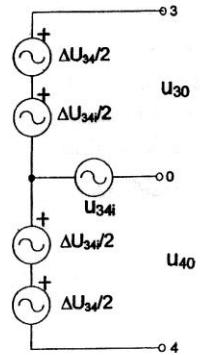
$$H = \frac{A_d}{\Delta u_{34i}}$$

$$\Delta u_{34i} = \frac{A_d u_i}{H} = \frac{10^3 \cdot 2 \sin(2\pi \cdot 50t)}{10^4} = 0.2 \sin(2\pi \cdot 50t) [V]$$

$$F = \frac{A_d}{\frac{u_{34i}}{u_i}}$$

$$u_{34i} = \frac{u_{30} + u_{40}}{2} = \frac{A_d u_i}{F} = \frac{10^3 \cdot 2 \cdot \sin(2\pi \cdot 50t)}{10^4} = 0.2 \cdot \sin(2\pi \cdot 50t)$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala



$$u_{30} = \frac{\Delta U_{34}}{2} + \frac{\Delta U_{34i}}{2} + u_{34i}$$

$$u_{40} = -\frac{\Delta U_{34}}{2} - \frac{\Delta U_{34i}}{2} + u_{34i}$$

$$u_{30} = 0.5 \sin(2\pi \cdot 12.5t) + 0.1 \sin(2\pi \cdot 50t) + 0.2 \sin(2\pi \cdot 50t)$$

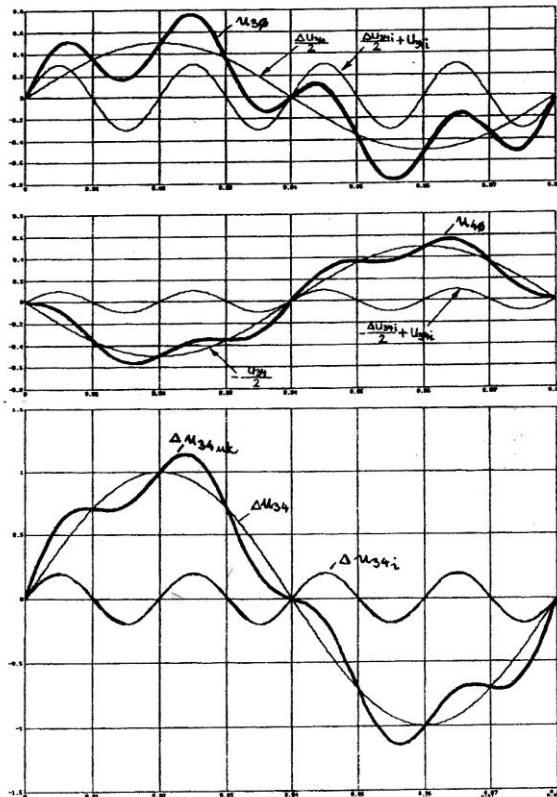
$$= 0.5 \sin(2\pi \cdot 12.5t) + 0.3 \sin(2\pi \cdot 50t)$$

$$u_{40} = -0.5 \sin(2\pi \cdot 12.5t) - 0.1 \sin(2\pi \cdot 50t) + 0.2 \sin(2\pi \cdot 50t)$$

$$= -0.5 \sin(2\pi \cdot 12.5t) + 0.1 \sin(2\pi \cdot 50t)$$

$$\boxed{\Delta U_{34uk} = u_{30} - u_{40} = \Delta U_{34} + \Delta U_{34i} = }$$

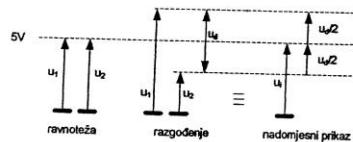
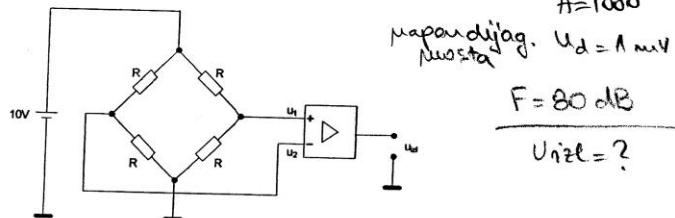
$$= 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 12.5t) + 0.2 \sin(2\pi \cdot 50t)$$



Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

3. Diferencijalnim pojačalom s asimetričnim izlazom i pojačanjem  $A = 1000$  mjeri se napon dijagonale tenzometarskog mosta izvedenog s istim otpornicima. Uslijed djelovanja sile, napon na dijagonali mosta iznosi 1mV. Napajanje mosta izvedeno je istosmjernom naponom iznosa 10V. Ako je faktor diskriminacije diferencijalnog pojačala  $F = 80\text{dB}$ , koliki je napon na izlazu pojačala?

Rješenje:



$$u_i = \frac{u_1 + u_2}{2} = \frac{5.0005 + 4.9995}{2} = 5\text{V}$$

$$u_d = u_1 - u_2 = 10^{-3}\text{ V} = 1\text{ mV}$$

$$u_{izl,d} = A_d \cdot u_d = 1000 \cdot 10^{-3} = 1\text{ V}$$

$$u_{izl,i} = A_i \cdot u_i$$

$$F = \frac{A_d}{A_i} \Rightarrow A_i = \frac{A_d}{F}$$

$$u_{izl,i} = \frac{A_d}{F} u_i = \frac{1000}{10^4} \cdot 5 = \pm 0.5\text{ V}$$

$$u_{izl,k} = u_{izl,d} \pm u_{izl,i} = 1 \pm 0.5\text{ V} = 0.5\text{ V} \div 1.5\text{ V}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

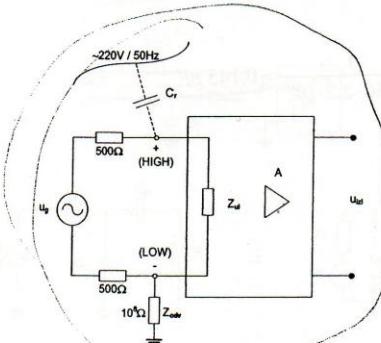
4. Plivajuće pojačalo ulazne impedancije  $1 M\Omega \parallel 15 pF$  i pojačanja 100 priključeno je na izvor napona čiji je unutrašnji otpor jednak na "+" (HIGH) i na "-" (LOW) ulazu i iznosi  $500 \Omega$ . Odvojna impedancija "-" (LOW) stezaljke prema mreži je  $10^8 \Omega$ . Stezaljka "+" (HIGH) spregnuta je s vodovima gradske mreže preko rasipnog kapaciteta  $C_r$ .

a) Nacrtajte shemu mjerjenja za opisani slučaj.

b) Izračunajte najveću dopuštenu vrijednost rasipnog kapaciteta  $C_r$  ako napon smetnje na izlazu pojačala mora biti manji od  $1 mV$ .

$$C_{r\max} = ? , U_{sm,iz} < 1 mV$$

Rješenje:



$$Z_{ul} = 1 M\Omega \parallel 15 pF$$

$$A = 100$$

$$R_g = 500 \Omega$$

$$Z_{odv} = 10^8 \Omega$$

$$a) Z_{ul} = 1 M\Omega \parallel 15 pF = \frac{R_{ul} \cdot \frac{1}{j\omega C_{ul}}}{R_{ul} + \frac{1}{j\omega C_{ul}}} = \frac{R_{ul}(1 - j\omega R_{ul} C_{ul})}{1 + (\omega R_{ul} C_{ul})^2}$$

$$\boxed{|Z_{ul}| = R_{ul} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\omega R_{ul} C_{ul})^2}}{1 + (\omega R_{ul} C_{ul})^2} = \frac{R_{ul}}{\sqrt{1 + (\omega R_{ul} C_{ul})^2}}}$$

$$= \frac{10^6}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-12})^2}} = \frac{10^6}{\sqrt{1 + 2.22 \cdot 10^{-5}}} \doteq 1 M\Omega$$

$$\boxed{|Z_{ul}| \gg R_g = 1 k\Omega \quad (\text{na } f=50\text{Hz})}$$

$$b) U_{sm,iz} = \frac{U_{mreze} \cdot R_g \cdot A}{\sqrt{X_{Cr}^2 + (R_g + Z_{odv})^2}}$$

$$\boxed{U_{sm,iz}^2 \cdot X_{Cr}^2 + U_{sm,iz}^2 \cdot (R_g + Z_{odv})^2 = (U_{mreze} \cdot R_g \cdot A)^2}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

$$\boxed{X_C = \frac{\sqrt{(U_{mreže} \cdot R_g \cdot A)^2 - U_{sm,iz}^2 (R_g + Z_{odv})^2}}{U_{sm,iz}}}$$
$$= \frac{\sqrt{(220 \cdot 10^3 \cdot 100)^2 - [10^{-3} (10^3 \cdot 10^8)]^2}}{10^{-3}}$$
$$= 10^3 \cdot \sqrt{4.84 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{10}}$$
$$= 2.2 \cdot 10^{10}$$
$$\boxed{\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_r} = 2.2 \cdot 10^{10}}$$
$$C_r = \frac{1}{2\pi f \cdot 2.2 \cdot 10^{10}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 2.2 \cdot 10^{10}} = \underline{0.145 \text{ pF}}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

5. Na električni voltmeter ulaznog otpora  $1M\Omega$  priključen je jednim svojim krajem koaksijalni kabel. Taj je kabel s vodom rasvjetne mreže spregnut preko svojih kapaciteta  $C_1 = C_2 = 5 \text{ pF}$ .  $C_1$  je koncentrirani kapacitet između vodiča rasvjetne mreže i plašta kabela,  $C_2$  je koncentrirani kapacitet između plašta kabela i zemlje, dok je koncentrirani kapacitet između plašta i vodiča kabela  $C_0 \gg C_1 + C_2$ . Koliki će se napon smetnje zbog ove kapacitivne sprege pojaviti na ulazu električnog voltmetra?

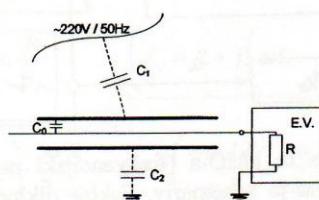
Rješenje:

$$R = 1 M\Omega$$

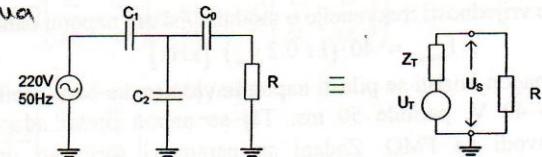
$$C_1 = C_2 = 5 \text{ pF}$$

$$C_0 \gg C_1 + C_2$$

$$U_S = ?$$



nadojedena  
stvar :



$$U_T = \frac{U_{220V}}{1+C_2/C_1} = \frac{220}{1+1} = 110 \text{ V}$$

$$C_T = \frac{C_0(C_1 + C_2)}{C_0 + C_1 + C_2} = C_1 + C_2 = 10 \text{ pF}$$

$$U_s = U_T \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C_T}} = \frac{U_T [(\omega C_T R)^2 + jR\omega C_T]}{1 + \omega^2 C_T^2 R^2}$$

$$\omega^2 C_T^2 R^2 \ll 1$$

$$U_s = U_T [(\omega C_T R)^2 + (j\omega R C_T)]$$

$$|U_s| = U_T \sqrt{[(\omega C_T R)^2 + (\omega C_T R)^2]}$$

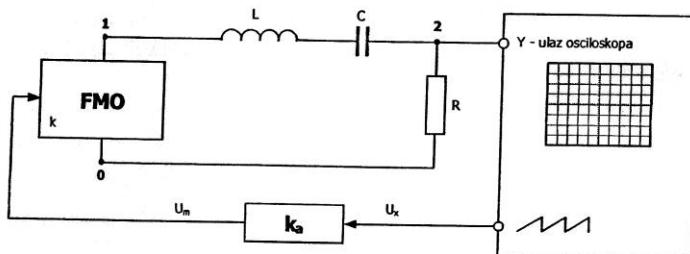
$$= U_T \omega C_T R \sqrt{1 + (\omega C_T R)^2}$$

$$\approx U_T \omega C_T R$$

$$= 110 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 10^6 = 345 \text{ mV}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

6. Spojem prema slici želi se na zaslonu katodnog osciloskopa promatrati amplitudno-frekvencijska karakteristika seriskog titravnog kruga.



Amplituda izlaznog napona iz FMO-a (frekvencijski moduliranog oscilatora) je 0.3 V, a unutrašnji otpor mu je zanemariv. Faktor otklona Y - ulaza osciloskopa iznosi  $F_y = 100 \text{ mV/d.sk}$ .

Ovisnost trenutne vrijednosti frekvencije o modulacijskom naponu dana je izrazom:

$$f_{mom} = 40 \cdot (1 + 0.2 u_m) [\text{kHz}]$$

Za modulacijski napon koristi se pilasti napon iz vremenske baze osciloskopa koji se mijenja od 0 do 40 V, perioda 50 ms. Taj se napon preko adaptera konstante  $k_a = 0.0625$  dovodi na FMO. Zadani su parametri seriskog titravnog kruga:  $C = 3.53 \text{ nF}$ ,  $R = 16.665 \Omega$ ,  $L = 3.537 \text{ mH}$ . (prepostaviti da je  $R_s$  zavojnice zanemariv).

- Koliko iznosi maksimalna devijacija frekvencije?
- Izračunajte frekvenciju rezonancije  $f_r$ , faktor dobrote  $Q$  i pojas propuštanja seriskog titravnog kruga (-3dB)
- Odredite frekvencijsko mjerilo voblera na X - osi osciloskopa.
- Na osnovu podataka iz zadatka i rješenja pod a), b) i c) potrebno je odrediti transfer funkciju titravnog kruga, te u naravnoj veličini nacrtati sliku koja će se dobiti na zaslonu katodnog osciloskopa, s izračunatim vrijednostima amplitude otklona, koje odgovaraju frekvencijama na rubovima zastora, te  $f_g$ ,  $f_b$ , i  $f_r$ .
- Potrebno je izračunati vrijednosti i u mjerilu nacrtati amplitudno-amplitudnu karakteristiku adaptera.
- Na koju vrijednost treba postaviti konstantu adaptera  $k_a$ , ukoliko želimo kod zadanog titravnog kruga, na zaslonu osciloskopa promatrati amplitudno-frekvencijsku karakteristiku od donje do gornje granične frekvencije?

Rješenje:

$$\begin{aligned} a) f_{mom} &= f_0 (1 + k \cdot u_m) = f_0 (1 + k \cdot k_a \cdot u_x) [\text{kHz}] = f_0 + \Delta f \\ \text{iz zadatka } &\rightarrow f_{mom} = 40 (1 + 0.2 \cdot 0.0625 \cdot 40) [\text{kHz}] \\ \Delta f &= k \cdot f_0 \cdot u_x = 40 \cdot 0.2 \cdot 2.5 \cdot 10^3 = 20 \text{ kHz} \end{aligned}$$

## Zavod za električne sisteme i obradbu signala

$$b) f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3.537 \cdot 3.53}} = 45 \text{ kHz}$$

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{RC\omega_r} = \frac{1}{R\sqrt{C}} = \frac{2\pi \cdot 45 \cdot 3.537}{16.665} = 60$$

$$D_f = f_g - f_d = \frac{f_r}{Q} = \frac{45 \cdot 10^3}{60} = 750 \text{ Hz}$$

$$c) F_{xy} = \frac{\Delta f}{x} = \frac{20 \text{ kHz}}{10 \text{ cm}} = 2 \text{ kHz/cm}$$

$$d) \frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{R}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{R}{Z_s} \quad \left( Z_s = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right)$$

$$Z_s = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \cdot \frac{\omega_r R}{R \cdot \omega_r} = R + j\left(\frac{\omega \omega_r L R}{\omega_r R} - \frac{\omega_r R \cdot 1}{\omega \omega_r R C}\right)$$

$$= R + jRQ\left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right) = R\left(1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right)\right)$$

$$\frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{1}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right)} = H(j\omega)$$

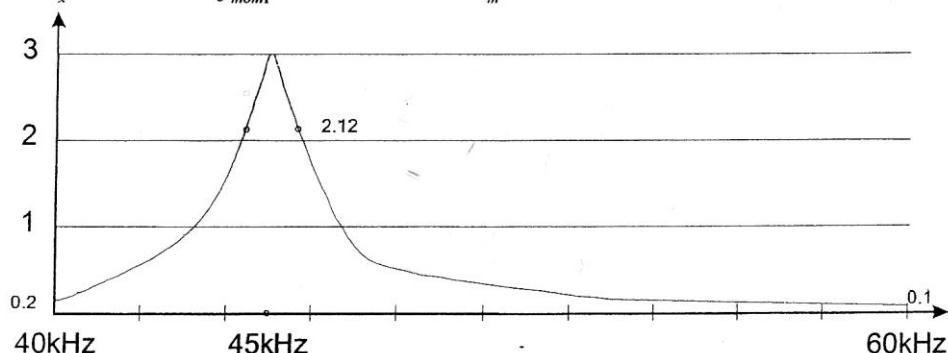
za granične frekvencije:  $\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} = \frac{1}{Q} = \frac{\omega^2 - \omega_r^2}{\omega \cdot \omega_r} = \frac{(\omega - \omega_r)(\omega + \omega_r)}{\omega \cdot \omega_r}$

za  $Q > 10 \Rightarrow Q = \frac{\omega_r}{2(\omega - \omega_r)} = \frac{\omega_r}{\Delta\omega} = \frac{\omega_r}{\omega_g - \omega_d}$

$$f_d = 44.625 \text{ Hz} = f_r - \frac{D_f}{2}$$

$$f_g = 45.375 \text{ Hz} = f_r + \frac{D_f}{2}$$

e)  $u_x = 0 \text{ V}$        $f_{moml} = 40 \text{ kHz}$        $u_m = 0 \text{ V}$   
 $u_x = 40 \text{ V}$        $f_{moml} = 60 \text{ kHz}$        $u_m = 2.5 \text{ V}$



Zavod za električne sustave i obradbu signala

f) promatrani su rubni uvjeti i  $f_0$  postaje  $f_d$

$$f_g = f_d(1 + k \cdot u_m) \quad u_m = k_a \cdot u_x = k_a \cdot 40$$

$$\Delta f = k \cdot f_d \cdot u_m \Rightarrow k = \frac{\Delta f}{f_d \cdot u_m} = \frac{\Delta f}{f_d \cdot k_a \cdot u_x}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta f = 750 \text{ Hz} \\ f_d = 44.625 \text{ kHz} \\ u_x = 0 \div 40 \text{ V} \end{array} \right\} k_a = \frac{750}{44.625 \cdot 10^3 \cdot 0.2} = 0.0021008$$

$$f_{mom} = f_0(1 + 2.1008 \cdot 10^{-3} \cdot 0.2 \cdot u_x) \quad \text{kHz}$$

$$F_{sv} = \frac{750 \text{ Hz}}{10} = 75 \text{ Hz/cm}$$

**Zadaci iz  
Elektroničke instrumentacije (1.dio)**

**Teorijska pitanja:**

- + 1. Skicirajte shemu neinvertirajućeg programabilnog pojačala i opišite način rada. O čemu ovisi točnost pojačanja takvog pojačala?
- + 2. Opišite koje tehnologije analognih sklopki razlikujemo te ih usporedite.
- + 3. Opišite analogno sklopke u integriranim krugovima, tehnologije u kojima se izvode te ih usporedite.
- + 4. Opišite koje načine rada razlikujemo kod analognih sklopki u integriranim krugovima.
- + 5. Opišite načine upravljanja analognim sklopkama u integriranim krugovima.
- + 6. Opišite načine preslušavanja analognih sklopki u integriranim krugovima te načine kako ga je moguće smanjiti.

## **Zadaci iz Elektroničke instrumentacije (2.dio)**

### **Teorijska pitanja:**

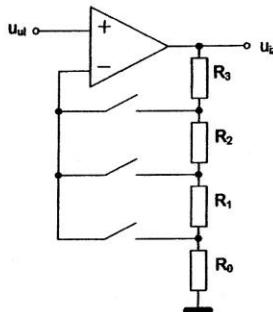
1. Opišite sklopove za uzimanje i zadržavanje uzorka (*sample & hold*).
2. Objasnite nesavršenosti kod sklopova za uzimanje i zadržavanje uzoraka.
3. Objasnite pojam apeturno vrijeme.
4. Opišite digitalno analogne pretvornike s R-2R ljestvičastom mrežom otpornika.
5. Opišite multiplicirajući digitalno analogni pretvornik.
6. Opišite pogreške i nesavršenosti multiplicirajućih digitalno analognih pretvornika.
7. Opišite digitalne potenciometre.
8. Objasnite način rada sklopova s preklapanjem kapaciteta.
9. Objasnite način rada digitalno analognog pretvornika s težinskom mrežom preklapajućih kapaciteta.
10. Opišite instrumentacijsko pojačalo.
11. Opišite čopersko pojačalo.
12. Opišite pojačalo s automatskim poništenjem napona pomaka (*autozero*).

# A. DIO

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

## Zadaci:

- Proračunati otpore težinske mreže neinvertirajućeg PGA pojačala s pojačanjima 500, 100 i 5 prikazanog slikom. Koliko smiju biti tolerancije otpornika da bi pogreške pojačanja za isti signal bile  $< 0.1\%$  ?



Rješenje:

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

za  $A=500$

$$500 = 1 + \frac{R_3 + R_2 + R_1}{R_0}$$

$$499 R_0 = R_3 + R_2 + R_1$$

za  $A=100$

$$100 = 1 + \frac{R_2 + R_3}{R_0 + R_1}$$

$$99(R_0 + R_1) = R_2 + R_3$$

za  $A=5$

$$5 = 1 + \frac{R_2}{R_0 + R_1 + R_2}$$

$$4(R_0 + R_1 + R_2) = R_3$$

pripremamo  $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$

$$499 = R_3 + R_2 + R_1$$

$$99 = R_3 + R_2 - 499 R_1 > -$$

$$4 = R_3 - 4R_2 - 4R_1$$

$$400 = R_1 + 99 R_1$$

$$400 = 100 R_1$$

$$\underline{R_1 = 4 \text{ }\mu\Omega}$$

$$495 = 5R_2 + 5R_1$$

$$495 = 5R_2 + 20$$

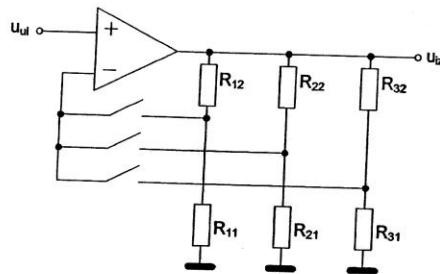
$$475 = 5R_2$$

$$\underline{R_2 = 95 \text{ }\mu\Omega}$$

$$R_3 = 499 - 95 - 4 = \underline{400 \text{ }\mu\Omega}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

2. Proračunati otpore težinske mreže neinvertirajućeg PGA pojačala s pojačanjima 500, 100 i 5 prikazanog slikom. Koliko smiju biti tolerancije otpornika da bi pogreške pojačanja za isti signal bili  $< 0.1\%$ ?



Rješenje:

$$A_1 = 500$$

$$A_2 = 100$$

$$A_3 = 5$$

$$\varepsilon < 0.1\% = 0.001$$

$$\text{uzimimo } R_{11} = R_{21} = R_{31} = 1k\Omega \quad ?$$

uzimimo  $R_{11} = R_{21} = R_{31} = 1k\Omega$  ili neka druga vrijednost iz E-niza

$$\text{za } A=500 \quad \frac{R_{12}}{R_{11}} + 1 = A_1 \Rightarrow R_{12} = 499 k\Omega$$

$$500 = 1 + \frac{R_{12}}{R_{11}} \Rightarrow \frac{R_{12}}{R_{11}} = 499 \Rightarrow R_{12} = 499 R_1, R_{12} = 499 k\Omega$$

$$\text{za } A=100 \quad \frac{R_{22}}{R_{21}} + 1 = A_2 \Rightarrow R_{22} = 99 k\Omega$$

$$100 = 1 + \frac{R_{22}}{R_{21}} \Rightarrow \frac{R_{22}}{R_{21}} = 99 \Rightarrow R_{22} = 99 R_2, R_{22} = 99 k\Omega$$

$$\text{za } A=5 \quad \frac{R_{32}}{R_{31}} + 1 = A_3 \Rightarrow R_{32} = 4 k\Omega$$

$$5 = 1 + \frac{R_{32}}{R_{31}} \Rightarrow \frac{R_{32}}{R_{31}} = 4 \Rightarrow R_{32} = 4 R_3, R_{32} = 4 k\Omega$$

~~znamo~~ → Najgori slučaj za A=500

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

$$A(1+\delta) = 1 + \frac{R_2(1+\delta)}{R_1(1-\delta)}$$

$$500.5 = 1 + \frac{499(1+\delta)}{(1-\delta)}$$

$$\Rightarrow \delta \approx 0.05\%$$

$$A_j = 1 + \frac{R_{j2}}{R_{j1}}$$

$$499.5(1-\delta) = 499(1+\delta)$$

$$\Rightarrow 499.5 - 499.5\delta = 499 + 499\delta$$

$$998.5\delta = 0.5$$

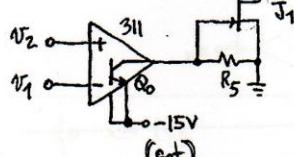
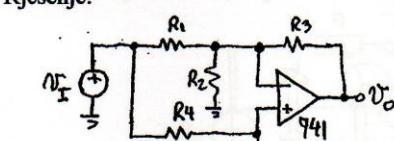
$$\delta = 0.0005$$

$$\delta = 0.05\%$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

3. Koristeći 311 komparator, 2N4391 nJFET tranzistor i 741 operacijsko pojačalo, projektirati sklop koji bi za: analogni signal  $u_{ul}$  i dva kontrolna signala  $u_1$  i  $u_2$ , dao izlazni napon  $u_{izl}$  takav da vrijedi:  $u_{izl} = 10 \cdot u_{ul}$  za  $u_1 > u_2$  i  $u_{izl} = -10 \cdot u_{ul}$  za  $u_1 < u_2$ . Napajanje sklopa iznosi  $\pm 15V$ .

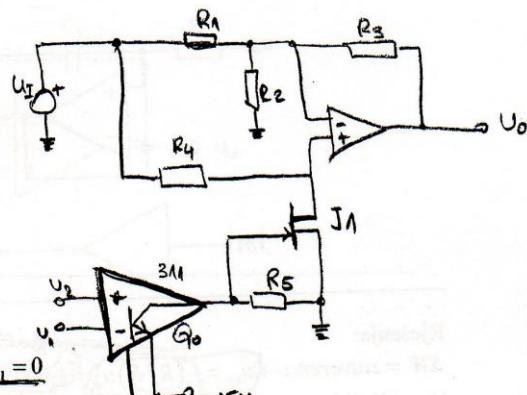
Rješenje:



$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 > u_2 \rightarrow Q_0 = ON \rightarrow J_1 = OFF \rightarrow i_{R4} = 0 \rightarrow i_{R1} = 0 \\ \rightarrow u_o = (1 + R_3 / R_2) u_I \\ u_1 < u_2 \rightarrow Q_0 = OFF \rightarrow J_1 = ON \rightarrow u_{R2} = 0 \rightarrow \\ \rightarrow u_o = -(R_3 / R_1) u_I \end{array} \right.$$

Npr.

$$u_{izl}: R_3 = 20k\Omega, R_2 = 180k\Omega, R_1 = 18k\Omega \\ R_4 = 20k\Omega, R_5 = 3.3k\Omega$$



$$10 \cdot 15 = \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) \cdot 15$$

$$g = \frac{R_3}{R_2} \rightarrow R_3 = g R_2$$

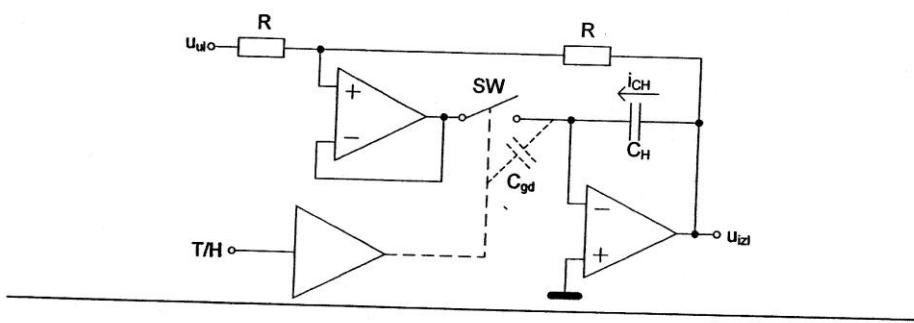
$$10 \cdot u_I = \left( - \frac{R_3}{R_1} \right) \cdot u_I$$

$$10 R_1 = + R_3$$

minus je bio samo  
zbroj priključaka

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

4. Sklop za uzimanje i zadržavanje uzorka (T&H) prikazan je slikom, gdje su  $C_{gd} = 1 \text{ pF}$ ,  $C_H = 1 \text{ nF}$ , dok je struja curenja kroz  $C_H$  iznosi  $1 \text{ nA}$ . Ako je  $u_{in} = 1 \text{ V}$ , potrebno je izračunati iznos  $u_{out}$ :
- neposredno nakon što je sklop uključen u mod zadržavanja uzorka (*hold mode*)
  - i  $50 \text{ ms}$  kasnije.



Rješenje:

$$SW = \text{zatvorena} \rightarrow u_{out} = -(R/R)u_{in} = -1.000 \text{ V} \quad \text{nuimis}$$

Upravljački sklop mijenja napon od  $0\text{V}$  do  $-15\text{V}$  kako bi otvorio sklopku SW, dakle:  
 $\Delta Q = 15\text{V} \cdot 1\text{pF} = 15\text{pC}$

$$\Delta Q = U \cdot C_{gd}$$

a) naboj od  $15\text{pC}$  se izbjije iz  $C_H$ , čime se promijeni izlazni napon za:

$$\Delta u_{out} = \frac{\Delta Q}{C_H} = \frac{15e-12}{1e-9} = 15\text{mV}$$

$$u_{out} = -1.000 + 0.015 = -0.985\text{V}$$

$\rightarrow$  izlazni napon nakon promjene

b)  $50\text{ms}$  kasnije:

$$C_H \Delta u_{out} = I_L \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow \Delta u_{out} = \frac{I_L \cdot \Delta T}{C_H} = \frac{\ln A \cdot 50\text{ms}}{\ln F} = 50\text{mV}$$

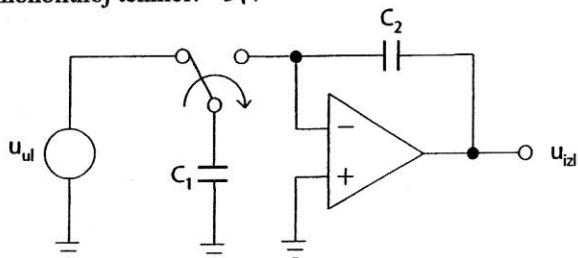
$$u_{out} = -0.985 + 0.050 = -0.935\text{V}$$

$\rightarrow$  izlazni napon  $50\text{ms}$  nakon

promjene (ponovno uvećan za  $\Delta u_{out}$ )

Zavod za elektroničke sisteme i obradbu signala

5. Integrator s preklapanjem kapaciteta prikazan je slikom. Ako frekvencija preklapanja kapaciteta  $C_1$  iznosi  $f_{cl} = 1\text{kHz}$ , dok kapaciteti kondenzatora iznose  $C_1 = 1\text{ pF}$ ,  $C_2 = 15.9\text{ pF}$ . Potrebno je odrediti frekvenciju jediničnog pojačanja, ako se pretpostavi da je  $f_0 \ll f_{cl}$ . Ako bi se integrator ipak želio realizirati kao klasični integrator, koliko bi iznosio iznos otpora  $R_1$  te da li bi kao takav bio moguć za realizaciju u monolitnoj tehnici? **DR**



$$f_0 = ?$$

$$f_0 \ll f_{cl}$$

frekvencija  
jediničnog  
pojačanja

$$\omega_0 = \frac{1}{R_1 C_2} = \frac{1}{\frac{1}{f_{cl} \cdot C_1} \cdot C_2} = f_{cl} \cdot \frac{C_1}{C_2}$$

$$\omega_0 = 10^3 \cdot \frac{10^{-12}}{15.9 \cdot 10^{-12}} = 62.89308 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

$$\Rightarrow f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 10.002744 \text{ Hz}$$

- ako bi se koristio "klasični" integrator



(ovaj put  
obrnutu  
račinamo  
 $R_1$  je povratnog  
 $\omega_0$ )

$$\omega_0 = \frac{1}{R_1 C_2} \rightarrow R_1 = \frac{1}{\omega_0 C_2} = \frac{1}{62.89308 \cdot 15.9 \cdot 10^{-12}}$$

$$R_1 = 0.001 \cdot 10^{12} = 10^9 \Omega = 1 \text{ G}\Omega$$

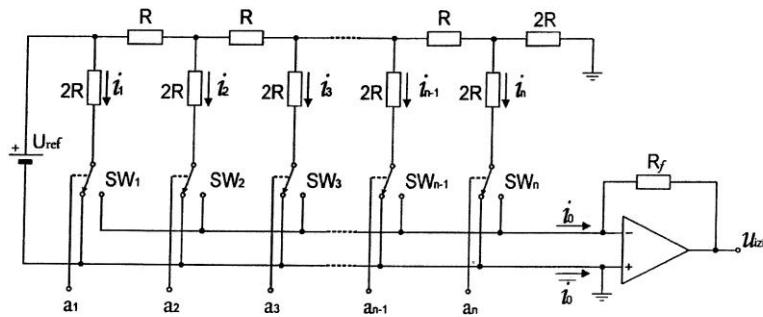
$$R_1 = ?$$

## 2. Dio

Zavod za električne sustave i obradbu signala

### Zadaci:

1. Digitalno analogni pretvornik s R-2R ljestvičastom mrežom radi u strujnom načinu rada. Vrijednost otpora iznose  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ , a referentnog napona  $U_{REF} = 5 \text{ V}$ . Ako je na sklopke 4-bitnog pretvornika ( $n = 4$ ) dovedena digitalna kombinacija  $a_1a_2a_3a_4 = 1011$  koliki je iznos izlazni napon  $u_{izl}$ ?



Rješenje:

$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_f = 10 \text{ k}\Omega$$

$$U_{REF} = 5 \text{ V}$$

$$n = 4$$

$$a_1a_2a_3a_4 = 1011$$

$$u_{REF} = 5$$

$$U_{izl} = -R_f \cdot i_0$$

$$i_0 = \frac{U_{REF}}{R} \left( 1 \cdot 2^{-1} + 0 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3} + 1 \cdot 2^{-4} \right)$$

$$= \frac{U_{REF}}{R} \cdot \left( \frac{11}{16} \right)$$

$$U_{izl} = -\frac{R_f}{R} \cdot U_{REF} \cdot \frac{11}{16}$$

$$U_{izl} = -3.4376 \text{ V}$$

$$U_{izl} = -\frac{R_f}{R} \cdot U_{REF} \cdot \left( \frac{a_1}{2^1} + \frac{a_2}{2^2} + \frac{a_3}{2^3} + \dots + \frac{a_n}{2^n} \right)$$

$$U_{izl} = -\frac{R_f}{R} \cdot U_{REF} \cdot \left( \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{4} + \frac{a_3}{8} + \frac{a_4}{16} \right)$$

$$U_{izl} = -\frac{R_f}{R} \cdot U_{REF} \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} \right)$$

$$U_{izl} = -\frac{R_f}{R} \cdot U_{REF} \cdot \frac{8+2+1}{16} = -\frac{R_f}{R} \cdot U_{REF} \cdot \frac{11}{16}$$

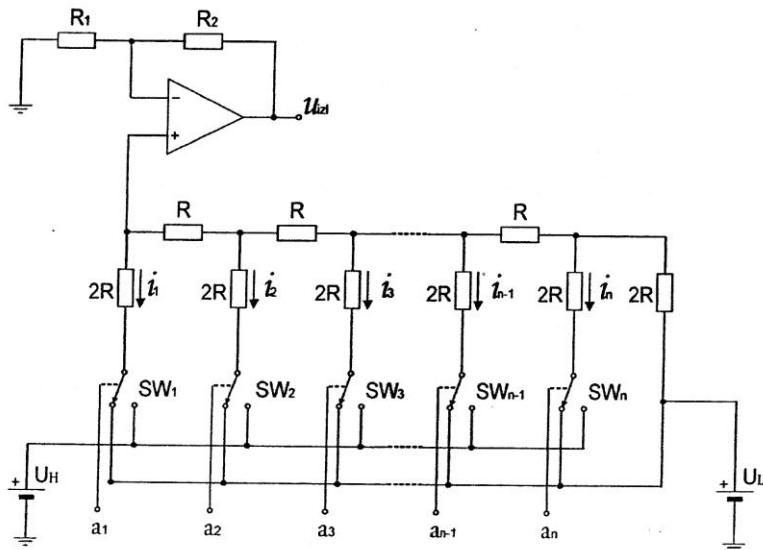
$$U_{izl} = -\frac{R_f}{R} \cdot U_{REF} \cdot \frac{11}{16}$$

Zavod za elektroničke sisteme i obradbu signala

2. Digitalno analogni pretvornik s R-2R ljestvičastom mrežom radi u naponskom načinu rada. Vrijednost otpora iznosi  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ , a referentnog napona  $U_H = 2.5 \text{ V}$ . Ako je na sklopke 4-bitnog pretvornika ( $n = 4$ ) dovedena digitalna kombinacija  $a_1a_2a_3a_4 = 1011$  koliki je iznos izlazni napon  $u_{izl}$  za slučajeve:

a.)  $U_L = -2.5 \text{ V}$

b.)  $U_L = 0 \text{ V}$



Rješenje:

$$U_{izl} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left[ U_L + (U_H - U_L) \left( \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \dots + \frac{b_n}{2^n} \right) \right]$$

a)  $U_{izl} = \left(1 + \frac{10^4}{10^4}\right) \cdot \left[ -2.5 + (2.5 + 2.5) \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} \right) \right]$

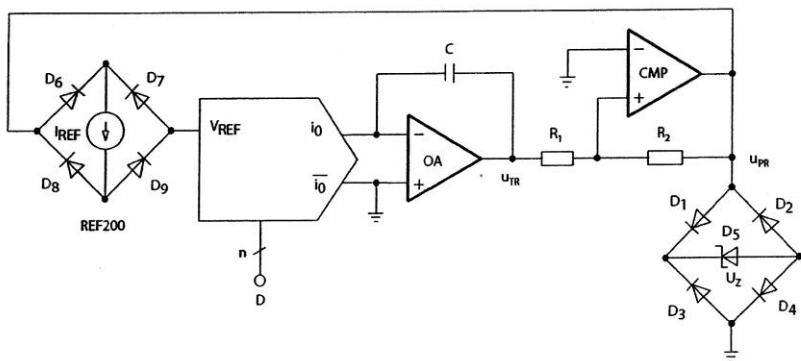
$$U_{izl} = 2 \cdot \left[ -2.5 + 5 \cdot \left( \frac{11}{16} \right) \right] = 2 \cdot \left[ -2.5 + \frac{55}{16} \right] = \underline{1.875}$$

b)  $U_{izl} = \left(1 + \frac{10^4}{10^4}\right) \cdot \left[ 0 + (2.5 - 0) \left( \frac{11}{16} \right) \right] = 2 \cdot \left[ 2.5 \cdot \frac{11}{16} \right] =$

$$U_{izl} = \underline{3.4375}$$

3. Digitalni programabilni generator trokutastog ( $u_{pr}$ ) i pravokutnog ( $u_{pr}$ ) valnog oblika prikazan je slikom. Multiplicirajući analogno – digitalni pretvornik (MDAP) je razlučivosti  $n = 12$  bita i koristi se za digitalno upravljanje punjenjem i pražnjenjem kondenzatora  $C = 1 \text{ nF}$ , čim se digitalno upravlja i frekvencijom  $f_0$  oscilatora. Kako bi se izbjegla mreža ljestvičastih otpora MDAP koristi REF200 strujni izvor od  $I_{REF} = 100 \mu\text{A}$  čime na svojem izlazu MDAP daje  $i_0 = \pm D \cdot I_{REF}$ . Amplituda izlaznih napona  $u_{PR}$  i  $u_{TR}$  iznosi  $U_{clamp} = 5 \text{ V}$ , napon koljena dioda iznosi  $U_D = 0.7 \text{ V}$ .

- Koliko treba iznositi probajni napon Zenner diode  $U_{ZS}$ ?
- Potrebito je odrediti izraz za frekvenciju oscilatora  $f_0$ .
- Odrediti najvišu frekvenciju oscilatora.



Rješenje:

$$M = 12$$

$$C = 1 \text{ nF}$$

$$I_{REF} = 100 \mu\text{A}$$

$$i_0 = \pm D \cdot I_{REF}$$

$$U_{clamp} = 5 \text{ V}$$

$$U_D = 0.7 \text{ V}$$

$$\text{a)} U_{ZS} = ? \quad \text{probajni napon Zenner diode}$$

$$\text{b)} f_0 = ? \quad \text{frekvencija oscilatora}$$

$$\text{c)} \quad \text{(odrediti izraz)}$$

$$\text{odrediti najvišu frekvenciju oscilatora}$$

a)

$$U_{clamp} = 2U_D + U_{ZS}$$

$$U_{ZS} = U_{clamp} - 2U_D = 5 - 2 \cdot 0.7 \\ U_{ZS} = 3.6 \text{ V}$$

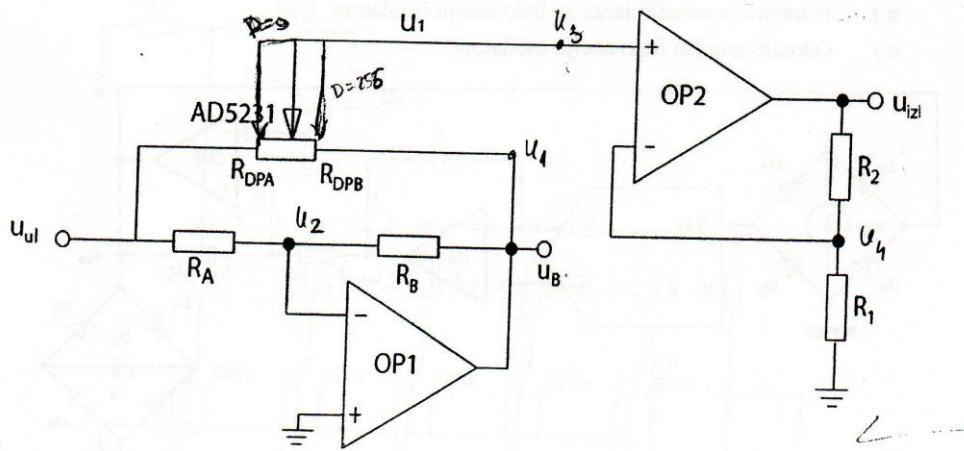
b)

$$D = 1 - 2^{-M} = 1 - 2^{-12} = 0.9997553$$

$$f_0 = D \cdot \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{I_{REF}}{(4C \cdot U_{clamp})}$$

$$\text{c)} f_{max} =$$

4. Programabilno pojačalo promjenjivog pojačanja projektirano je upotrebom digitalnog potenciometra AD5231 ukupnog otpora  $R_{DP}$ . Otpor promjenjivog potenciometra podesiv je u 256 koraka. Ako se postavi da je  $R_A = R_B$  te  $R_2 = 9 \cdot R_1$  potrebno je odrediti:
- opći izraz ukupno pojačanje  $A = u_{izl} / u_{ul}$
  - raspon u kojem je moguće podesiti pojačanje za dva krajnja koraka digitalnog potenciometra:  $D = 0$  i  $D = 256$



Rješenje:

a)

$$A_{izl} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{9R_1}{R_1} = 10$$

b1)  $D = 0$

$$R_{DPA} = 0$$

→ ulaz direktno proslijeden prema OP2

$$u_1 = u_{ul}$$

$$A = +10$$

$$A = \frac{u_{izl}}{u_{ul}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$u_4 = u_- = u_+ = u_3$$

$$\rightarrow u_3 \rightarrow \frac{0 - u_3}{R_1} = \frac{u_3 - u_{ul}}{R_2}$$

$$u_{izl} = u_3 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$u_4 = u_3 = u_{ul}$$

b2)  $D = 256$

$$R_{DPA} = R_{DP}, R_{DPB} = 0$$

$$\rightarrow u_1 = -\frac{R_B}{R_A} u_{ul} = -u_{ul}$$

$$A = -10$$

$$u_{izl} = -u_{ul} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$A = -\frac{u_{izl}}{u_{ul}} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$u_3 = u_1 = u_B$$

$$\text{za } u_2 \rightarrow \frac{u_{ul} - u_3}{R_A} = \frac{u_2 - u_3}{R_B} \rightarrow u_{ul} =$$

$$\text{za } u_1 \rightarrow \frac{u_{ul} - u_1}{R_{DPA}} = \frac{u_1 - u_2}{R_B} \rightarrow u_2 =$$

**Zadaci iz  
Elektroničke instrumentacije (3.dio)**

**VER 05**

moj 5.dio

**Teorijska pitanja:**

1. Opišite integrirajući analogno digitalni pretvornik s jednim pilastim naponom.
2. Opišite integrirajući analogno digitalni pretvornik s dvostrukim pilastim naponom. ✓
3. Opišite integrirajući analogno digitalni pretvornik s višestrukim pilastim naponom.
4. Opišite integrirajući analogno digitalni pretvornik s pretvorbom napona u frekvenciju. ✓
5. Opišite analogno digitalni pretvornik sa slijednim približavanjem (sa sukcesivnom aproksimacijom). ✓
6. Opišite paralelni analogno digitalni pretvornik. ✓
7. Opišite ispreplićući (*interleaving*) analogno digitalni pretvornik.
8. Opišite paralelno - serijski analogno digitalni pretvornik.
9. Opišite analogno digitalni pretvornik sa slijednim oduzimanjem (*ripple through*).
10. Opišite posmačni (protočni) analogno digitalni pretvornik (*pipelined*).
11. Opišite sigma-delta analogno digitalni pretvornik. ✓
12. Objasnite pojmove preklapanje spektra, analogni antialiasing filter, kvantizacijski šum, *dithering*.

**Zadaci  
Elektroničke instrumentacije (4.dio)**

**VER 03**

**Teorijska pitanja**

1. Opišite uzroke pogreške kod izvora istosmjernog referentnog napona sa Zener diodom.
2. Skicirajte sve izvedbe izvora istosmjernog referentnog napona sa Zener diodom.
3. Opišite izvore istosmjernog referentnog napona temeljene na širini zabranjenog pojasa (*bandgap*).
4. Opišite koje izvore izmjeničnog napona razlikujemo.
5. Skicirajte shemu oscilatora s Wienovim mostom i opišite način rada.
6. Skicirajte shemu LC oscilatora i opišite način rada.
7. Skicirajte shemu oscilatora s kristalom kremena i opišite način rada.
8. Skicirajte shemu generatora funkcija i opišite način rada.
9. Skicirajte shemu diodnog sintetizatora valnog oblika i opišite način rada.
10. Opišite neposredne (direktne) sintetizatore frekvencije.
11. Opišite generatore spektra.
12. Skicirajte shemu faznog detektora i opišite način rada.
13. Opišite posredne (indirektne) sintetizatore frekvencije temeljene na fazno vezanoj petlji (PLL).
14. Objasnite načelo direktnе digitalne sinteze frekvencije. (DDS).
15. Skicirajte shemu selektivnog voltmetra i opišite način rada.
16. Opisati rad analizatora spektra sa slijednim načinom analize.
17. Opisati rad analizatora spektra s paralelnim načinom analize.
18. Objasnite način rada pretvornika efektivne vrijednosti u istosmjerni napon.
19. Objasnite način mjerjenja efektivne vrijednosti upotrebom množila.

## Zadaci iz Električne instrumentacije (3.dio)

1. Analogno digitalni pretvornik s dvostrukim pilastim naponom, 14-bitne razlučivosti, projektiran je da potiskuje smetnju gradske mreže frekvencije 50 Hz i njezine više harmonike.
- Koliko treba iznositi frekvencija takta  $f_0$  takvog pretvornika? Koliko je vremena  $T$  potrebno za analogno-digitalnu pretvorbu ulaznog signala ako se na ulaz dovodi signal pune skale?
  - Koliko iznosi vrijednost RC konstante, ako je  $U_{REF} = 2.5 \text{ V}$ , a vršna vrijednost ulaznog signala iznosi 5 V?  $U_{in} = 5 \text{ V}$
  - Ako starenje komponenti izaziva promjenu otpora  $R$  za +5 %, a kapaciteta  $C$  za -2 %, kako će se to odraziti: na izlazni napon integratora, a kako na točnost pretvorbe?

ADP

Rješenje:

a)  $f_0 = 983.040 \text{ kHz}, T = 33.3 \text{ ms}$

a)  $f_0 = 60 \cdot 2^{14}$ ;  $T = \frac{2 \cdot 2^M}{f_0}$

b)  $RC = 8.3 \text{ ms}$

c)  $\Delta U_{INT} = 4.859 \text{ V}$ , točnost neće biti promijenjena

a)  $f_0 = 60 \cdot 2^{14} = 983.040 \text{ kHz}$   
 $T = \frac{2 \cdot 2^{14}}{f_0} = \frac{2^{15}}{983.040 \cdot 10^3} = 0.03 \text{ s} = 33.3 \text{ ms}$

b)  $\frac{5}{2^{14} \cdot T_0} = \frac{2.5}{RC} \rightarrow SRC = 2.5 \cdot 2^{14} \cdot T_0 \Rightarrow RC = \frac{2.5}{5} \cdot 2^{14} \cdot \frac{1}{f_0}$   
 $RC = 8.3 \text{ ms}$

b)  $\frac{U_{in}}{2^M \cdot T_0} = \frac{U_{REF}}{RC} \rightarrow RC = \frac{U_{REF}}{U_{in}} \cdot 2^M \cdot \frac{1}{f_0}$

c)  $T_{stari} = R(1+0.05) \cdot C(1-0.02) = 1.05R \cdot 0.98C = 1.029 \cdot RC$   
 $T_{novi} = 1.029 \cdot T_{stari}$

$\Delta U_{int} = \frac{5}{1.029} = 4.859 \text{ V}$

, točnost neće biti promijenjena

c)  $T_{stari} = RC$  ,  $T_{novi} = R(1+\gamma_1) \cdot C(1+\gamma_2)$

$\Delta U_{int} = \frac{U_{in}}{T_{novi}/T_{stari}}$

2. Analogno-digitalni pretvornik integrirajućeg tipa s dvostrukim pilastim naponom realiziran je operacijskim pojačalom  $A=10^3$ .

- a.) Uz pretpostavku da je izlazni napon pojačala  $u_{izl}(t)$  inicijalno nula, potrebno je pronaći  $u_{izl}(t \geq 0)$ , ako je na ulazu prisutan napon  $u_{ul}(t) = 1 \text{ V}$ .  
 b.) Pronaći minimalnu vrijednost RC produkta tako da je pogreška izlaznog napona pojačala  $u_{izl}(t=100\text{ms})$  manja od 1mV.

ADP

Rješenje:

$$a) u_{ul} \approx 10^3 \left( e^{-t/(10^3 RC)} - 1 \right)$$

$$b) RC \geq \frac{1}{14.14 \text{ s}}$$

$$\begin{aligned} a) \quad & u_{izl}(0) = 0 \\ & u_{izl}(\infty) = -A \cdot u_{ul} \\ & T = (1+A) RC \\ & u_{izl}(t) = u_{izl}(\infty) + [u_{izl}(0) - u_{izl}(\infty)] \cdot e^{-t/T} \end{aligned}$$

$$a) u_o(0) = 0 ; u_o(\infty) = -A \cdot u_T = -10^3 \text{ V}$$

$$T = R_{eq} \cdot C = (1+A) RC = 10^3 RC$$

$$u_o(t) = u_o(\infty) + [u_o(0) - u_o(\infty)] \cdot e^{-t/T}$$

$$u_o(t) = -10^3 + [0 + 10^3] \cdot e^{-t/10^3 RC} = 10^3 \left[ e^{-t/10^3 RC} - 1 \right]$$

$$b) \text{ideal. } u_o(t) = u_o(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t u_T dt$$

$$u_o(\text{ideal.})(t) = -\frac{1}{RC} \cdot t$$

$$u_o(100\text{ms}) - u_o(\text{ideal.})(100\text{ms}) \leq 1 \text{ mV}$$

$$10^3 \left[ e^{-0.1/10^3 RC} - 1 \right] + \frac{1}{RC} \cdot 0.1 \leq 10^{-3}$$

$$10^3 \left[ 1 - \frac{1}{10^4 RC} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{10^4 RC} \right)^2 + \dots - 1 \right] + \frac{1}{10 RC} \leq 10^{-3}$$

$$\frac{10^3}{2} \left( \frac{1}{10^4 RC} \right)^2 \leq 10^{-3} \quad \frac{1}{10^4 RC} = \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot 2}{10^3}}, \quad \frac{1}{10^4 RC} \leq \frac{\sqrt{2}}{10^3}$$

$$RC \geq \frac{1}{10^4} \cdot \frac{10^3}{\sqrt{2}} ; \quad RC \geq \frac{1}{10\sqrt{2}} ; \quad RC \geq \frac{1}{14.14} \text{ s}$$

$$\Rightarrow u_o(\text{ideal.})(100\text{ms}) = -\frac{1}{RC} \cdot t = -\frac{1}{14.14} \cdot 100\text{ms} = -14.14 \cdot 0.1 = -1.414$$

b)

$$u_{izl}(\text{ideal.})(t) = u_{izl}(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t u_{ul} dt \approx -\frac{u_{ul}}{RC} \cdot t$$

$$u_{izl}(t) - u_{izl}(\text{ideal.})(t) \leq \underbrace{pogreške}_{iznos}$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

3. U digitalnom voltmetu s pretvorbom napona u vrijeme, prikazanog slikom, kao generator pilastog napona koristi se Millerov integrator vremenske konstante  $10\text{ms}$ . Na ulaz Millerovog integratora spojen je napon  $10\text{V}$ . Izlaznom naponu Millerovog integratora pribrojen je istosmjerni napon  $10\text{V}$ , tako da je hod napona koji se dovodi na komparator od  $10\text{V}$  do  $0\text{V}$ . Vrijeme povrata pilastog napona je  $20\mu\text{s}$ . Na ulaz digitalnog voltmetra spojen je napon  $4,7\text{V}$ .

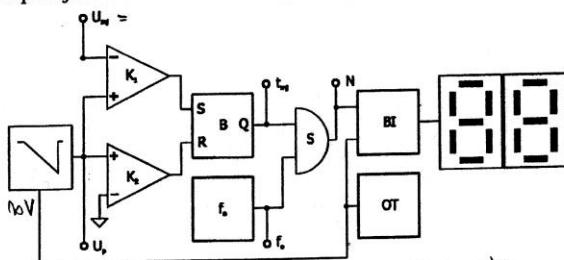
  - Izračunajte vrijeme trajanja impulsa na izlazu bistabila,  $t_{wj} = ?$
  - broj izbrojenih impulsa uz frekvenciju  $f_0$  osnovnog takta  $10\text{kHz}$ ,  $N = ?$
  - te najveću brzinu ponavljanja mjerena ovim voltmetrom, uz pretpostavku da je na ulaz priključen maksimalni dozvoljeni napon (maksimalna dinamika).

$$\tau = 10 \text{ ms}$$

$$U_{\text{el}} = 10 \text{ V}$$

$\Delta\eta = \eta_Y$

30A15



Tx - m. 9. Ch.

Rješenje:

a)  $t_x = 4.7 \text{ ms}$

b)  $N = 47$

c)  $n = 99.8 \text{ mj./s}$

2

$$\frac{U_{el}}{t_x} = \frac{U_{max}}{\tau}$$

$$\frac{4.7V}{tx} = \frac{10V}{10 \cdot 10^{-3}}, tx = \frac{4.7 \cdot 10^{-2}}{10}$$

$$tx = 4.7 \cdot 10^{-3} = \underline{4.7 \text{ ms}}$$

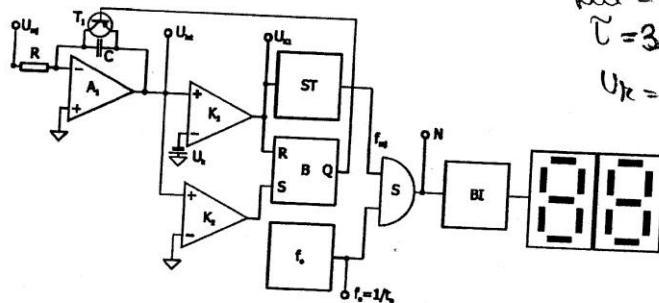
$$b) \boxed{N = \frac{tx}{T_0} = tx \cdot f_0 = 4.7 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 = \underline{\underline{47}}}$$

$$c) \quad n = \left| M = \frac{1 \text{ ms}}{T + 20 \mu\text{s}} \right| = \frac{1 \text{ ms}}{10 \text{ ms} + 20 \mu\text{s}} = \frac{1 \text{ ms}}{10.02 \text{ ms}} = 99.8 \frac{\text{ms}}{\text{s}}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

4. Digitalnim voltmetrom s pretvorbom napona u frekvenciju, prikazan slikom, mjeri se istosmerni napon 2,8V. Millerov integrator ima ulazni otpor  $22k\Omega$  i vremensku konstantu  $300\mu s$ . Napon komparacije  $U_K = -3V$ , a za izbijanje kondenzatora se koristi tranzistorска sklopka zanemarivog otpora u vođenju.

- a.) Izračunajte trajanje nabijanja kondenzatora u Millerovom integratoru.  
 b.) Izračunajte broj impulsa koje brojilo izbroji u toku jednog mjernog ciklusa koji traje  $250ms$ .  
 c.) Kolika je pogreška mjerjenja, ako je otpor tranzistorске sklopke u vođenju  $35\Omega$ ?



$$U_{ref} = 2,8V$$

$$R_{ul} = 22k\Omega$$

$$T_0 = 300\mu s$$

$$U_K = -3V$$

Rješenje:  
 a)  $t_i = 321.429 \mu s$   
 b)  $N = 777$   
 c)  $p = -0.16\%$

a)  $U_{ref} = U(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{ref} dt = \frac{1}{300 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,8 \cdot t$   
 $-3V = -9333,3 \cdot t$   
 $t = 0,000321428 = 321.428 \mu s$

b)  $N = f_{ul} \cdot T_0 = \frac{1}{f_{ul}} \cdot T_0 = \frac{250 \mu s}{321.429 \mu s} = \frac{250}{0.321429} = 777$   
 $f_{ul} = N \cdot \frac{f_0}{k}$

c)  $C = \frac{1}{R \cdot T_0} = \frac{1}{22 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = 0.151515 F$

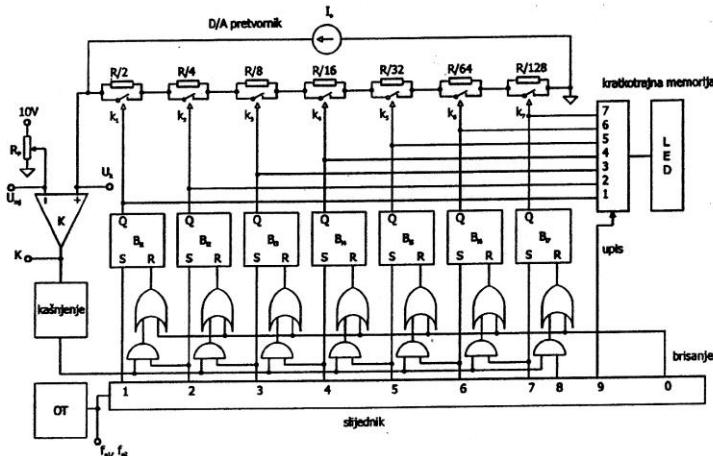
$$T_{movi} = \frac{1}{(R + R_{stopt}) \cdot C} = \frac{1}{(22035) \cdot 0.151515} = 299.523 \mu s$$

$$p = greska = \frac{T_{stari}}{T_{movi}} = \frac{300}{299.523} = 1.0015925$$

$$greska = 0.0015925 = 0.159 \approx 0.16\%$$

5. Digitalni voltmeter sa sukcesivnom aproksimacijom ima mjereno područje 10V. U digitalno/analognom pretvorniku voltmetera koristi se težinska otpornička mreža od sedam otpornika i izvor konstantne struje  $1\text{mA}$ .

- a.) Izračunajte vrijednosti otpornika za težinsku mrežu.  
 b.) Koji se digitalni podatak dobiva na izlazu digitalnog voltmetra ako je mjereni napon  $7,2\text{V}$ ?  $U_X = 7,2\text{V}$



Rješenje:

$$a) R = 10079 \Omega$$

$$b) 1011011 (7.16514 \text{ V})$$

$$a) U = I \cdot R \quad I = \frac{1}{1000} \text{ mA} \quad R = \frac{U}{I} = \frac{10 \text{ V}}{\frac{1}{1000} \text{ mA}} = 10000 \Omega$$

$$U = I \cdot (R/2 + R/4 + R/8 + R/16 + R/32 + R/64 + R/128) = I \cdot \frac{1023}{1024} \Omega = 10078.75 \Omega \approx 10079 \Omega$$

$$b) U_X = 7.2 \text{ V}$$

$$U_{REF} = 10 \text{ V}$$

$$1) U_{K1} = \frac{U_{REF}}{2} = 5 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \text{ V} \geq U_{K1} = 5 \text{ V} \Rightarrow a_0 = 1$$

$$U_{K2} = \frac{U_{REF} \cdot 3}{4} = 7.5 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \leq U_{K2} = 7.5 \text{ V} \Rightarrow a_1 = 0$$

$$U_{K3} = \frac{U_{REF} \cdot 5}{8} = 6.25 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \geq U_{K3} = 6.25 \text{ V} \Rightarrow a_2 = 1$$

$$U_{K4} = \frac{U_{REF} \cdot 11}{16} = 6.875 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \geq U_{K4} = 6.875 \text{ V} \Rightarrow a_3 = 1$$

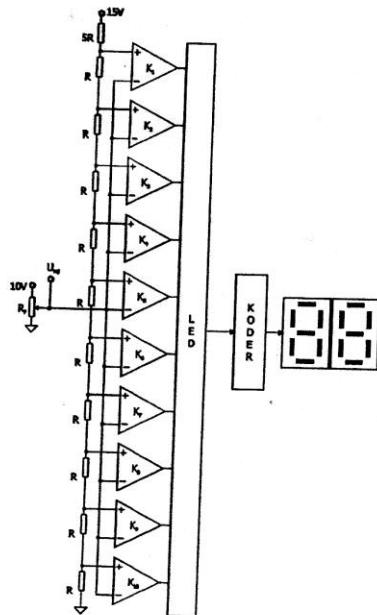
$$U_{K5} = \frac{U_{REF} \cdot 23}{32} = 7.1875 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \geq U_{K5} = 7.1875 \text{ V} \Rightarrow a_4 = 1$$

$$U_{K6} = \frac{U_{REF} \cdot 47}{64} = 7.34375 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \leq U_{K6} = 7.34375 \text{ V} \Rightarrow a_5 = 0$$

$$U_{K7} = \frac{U_{REF} \cdot 93}{128} = 7.7656 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \leq U_{K7} = 7.7656 \text{ V} \Rightarrow a_6 = 0$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

6. Odredite broj komparatora potreban da se paralelnim analogno/digitalnim pretvornikom izvede 8-bitno razlučivanje. Ako je precizno otporničko djelilo spojeno između napona 10V i 0V, odredite u kojim će stanjima biti izlazi komparatora kada se na ulaz priključi napon 3,8V.



Rješenje:  
 $N = 97$  (za 3.8 V)

$$m = 8$$

$$2^M - 1 = 2^8 - 1 = 255$$

- broj komparatora potreban za 8-bitno razlučivanje

$$N = \frac{3.8 \text{ V}}{10 \text{ V}} \cdot 255 = 96.9 \approx 97$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

7. Analogno digitalni pretvornik sa slijednim oduzimanjem (*ripple through ADC*) karakterizira amplitudna razlučivosti 12 bita i brzine uzorkovanja 20 MS/s.
- Koliko je minimalno komparatora potrebno za realizaciju ovog pretvornika?
  - Ako referentni napon pretvornika iznos  $U_{REF} = 2.5 \text{ V}$  i ako je na ulazu pretvornika doveden napon  $U_{in} = 1.00 \text{ V}$ , koja se vrijednost može očitati na izlazu 1-bitnih stupnjeva od najznačajnijeg prema najmanje značajnom bitu?

Rješenje:

a) potrebno je 12 komparatora

b)

$U_x = 1V$	$a_0 \Rightarrow 0$	$a_5 \Rightarrow 0$
$U_{REF} = 2.5V$		$a_1 \Rightarrow 0$
$\rightarrow 1V - 0 = 1V$	$a_2 \Rightarrow 1$	
$\rightarrow 1V \cdot 2 = 2V$	$a_3 \Rightarrow 1$	
$U_x = 2V$	$a_4 \Rightarrow 0$	$a_6 \Rightarrow 0$
$U_{REF} = 2.5V$	$a_7 \Rightarrow 1$	$a_8 \Rightarrow 0$
$\rightarrow 2V - 0 = 2V$	$a_9 \Rightarrow 0$	$a_9 \Rightarrow 0$
$\rightarrow 2V \cdot 2 = 4V$	$a_{10} \Rightarrow 1$	$a_{10} \Rightarrow 1$
$U_x = 4V$	$a_{11} \Rightarrow 1$	
$U_{REF} = 2.5V$		
$\rightarrow 4V - 2.5V = 1.5V$		
$\rightarrow 1.5 \cdot 2 = 3V$		
$U_x = 3V$	$a_3 \Rightarrow 1$	
$U_{REF} = 2.5V$		
$\rightarrow 3V - 2.5V = 0.5V$		
$\rightarrow 0.5V \cdot 2 = 1V$		
$U_x = 1V$	$a_4 \Rightarrow 0$	
$U_{REF} = 2.5V$		
$\rightarrow 1V - 0 = 1V$		
$\rightarrow 1V \cdot 2 = 2V$		
$U_x = 2V$	$a_5 \Rightarrow 0$	
$U_{REF} = 2.5V$		
$\rightarrow 2V - 0 = 2V$		
$\rightarrow 2V \cdot 2 = 4V$		

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

9.  $\Sigma\Delta$  analogno digitalni pretvornik razlučivosti 12 bita koristi se za pretipkavanje audio signala gornje granične frekvencije 44.1 kHz.  
Kolika je potrebna frekvencija pretipkavanja kako bi se postigla 16 bitna razlučivost?

Rješenje:

$$kf_s = 11.29 \text{ MHz}$$

- udvostručuje se frekv. otpkavanja pa poljšat će razlučivost za 0.5 bita
- mi trebamo poljšati razlučivost za 4 bita, znati trebamo povećati frekv. otpkavanja 256 puta!

$$44.1 \text{ kHz} \cdot 256 = 11289.6 \text{ kHz} = 11.2896 \text{ MHz} \approx 11.29 \text{ MHz}$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

10. Analogno digitalni pretvornik razlučivosti 8 bita koristi se za pretvorbu signala gornje granične frekvencije 100 kHz metodom pretipkavanja kako bi se povećala razlučivost na 12 bita.

- Kolika frekvencija uzorkovanja je potrebna, ako bi se signal otiskao običnim ADP 8-bitne razlučivosti, izravno metodom pretipkavanja?
- Kolika frekvencija uzorkovanja je potrebna ako se ADP iz a) dijela zadatka smjesti u  $\Sigma-\Delta$  pretvornik?

Rješenje:

a)  $kf_s = 51.2 \text{ MHz}$

(puta: udvostručenje frekvencije pretipkavanja poboljšat će razlučivost za 0.5 bita)

b)  $kf_s = 1.888 \text{ MHz}$

(puta: maksimalni omjer signal-šum za obični ADP iznosi  $SNR_{max} = 6.02 \cdot n + 1.76 \text{ dB}$ , a isti omjer za  $\Sigma-\Delta$  pretvornik iznosi  $SNR_{max} = 6.02 \cdot (n + 1.5 \cdot m) - 3.41 \text{ dB}$  što ukazuje da svako udvostručenje frekvencije pretipkavanja poboljšava odnos za 1.5 bita)

a) - treba poboljšati razlučivost za 4 bita, a  $f_s^{new}$  za  $2^8$  puta  
 $(256)$

$$\boxed{\frac{f_s}{2 \cdot f_g} \geq 2 \cdot f_{max}} = 200 \text{ kHz}$$

$$200 \text{ kHz} \cdot 256 = \underline{51.2 \text{ MHz}}$$

b) ta dobiva ADP  $\rightarrow SNR_{max} = 6.02 \cdot n + 1.76 \text{ dB} = 6.02 \cdot 12 + 1.76$

a  $\Sigma-\Delta$  pretvornik  $\rightarrow SNR_{max} = 6.02 \cdot (n + 1.5 \cdot m) - 3.41 = 6.02 \cdot (8 + 1.5 \cdot m) - 3.41$

$$6.02 \cdot 12 + 1.76 = 6.02 \cdot (8 + 1.5 \cdot m) - 3.41$$

$$72.24 + 1.76 = 48.16 + 9.03m - 3.41$$

$$9.03m = 29.25 \rightarrow m = 3.2392$$

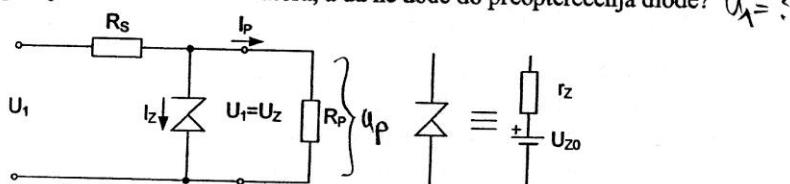
$$\boxed{k = 2^m} = 2^{3.2392} = 9.4427$$

$$\boxed{k \cdot f_s = 9.4427 \cdot 2 \cdot 100 \text{ kHz} = \underline{1.888 \text{ MHz}}}$$

**Zadaci:**

1. U stabilizatoru napona koristi se Zener dioda slijedećih značajki:  $U_{Z0} = 20 \text{ V}$ ,  $I_{Z\min} = 10 \text{ mA}$ ,  $r_z = 10 \Omega$ ,  $P_{\max} = 1,0 \text{ W}$ .

- a.) Odredite najveću vrijednost otpora serijskog otpornika  $R_s$  u stabilizatoru tako da stabilizator ispravno radi uz ulazni napon  $U_1 = 25 \text{ V}$  i priključeno trošilo  $R_p = 1 \text{ k}\Omega$ .  $R_{s\max} = ?$
- b.) Uz tako određeni serijski otpor, koliki se najveći istosmjerni napon  $U_1$  smije priključiti na ulaz stabilizatora, a da ne dođe do preopterećenja diode?  $U_1 = ?$



Rješenje:

a.)  $R_{s\max} = 166,667 \Omega$

b.)  $U_1 = 31,962 \text{ V}$

a)

- 20V je približan napon koji tever dioda mora osigurati na trošku, tj. ovom  $R_p$  otporniku  
- ovaj put možemo razvijati pad naponu na  $r_z$  (0.1V)  
- začici 20V na desnoj granici 1000 Ω daje struju  $I_p = 20 \mu\text{A}$   
- izvor diodu rade još 10 mA (zadano)  
- izvor otpor  $R_s$  onda ide 30 mA (20 mA izvor troška + 10 mA izvor diodi)  
- s obzirom na razliku naponova 25V na ulazu i 20V (tever),  
pad naponu na otporniku je  $R_s$  je 5V

$R_{s\max} = \frac{5V}{30 \mu\text{A}} = 0,16666 \cdot 10^3 = 166,667 \Omega$

b)

$P_{\max} = 1 \text{ W} = I_{\max} \cdot U_p = I_{\max} (20 + I_{\max} \cdot 10)$

$U_p = U_2 + I_{\max} \cdot r_z = 20 + (I_{\max} \cdot 10)$

$I_{\max} = 0,0488 \text{ A}$

$U_1 = R_s \cdot (I_{\max} + 20 \mu\text{A}) + U_p$

$U_1 = 166,667 (0,019 + 0,02) + 20,1$

$U_1 = 31,725 \text{ V}$

## **Zadaci Elektroničke instrumentacije (4.dio)**

### **Teorijska pitanja**

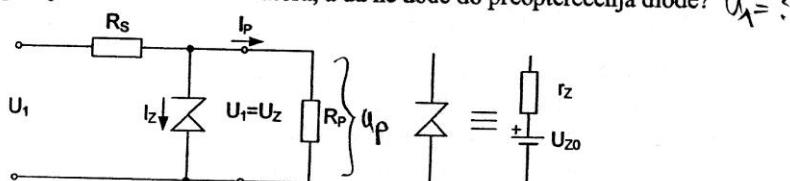
1. Opišite uzroke pogreške kod izvora istosmjernog referentnog napona sa Zener diodom.
2. Skicirajte sve izvedbe izvora istosmjernog referentnog napona sa Zener diodom.
3. Opišite izvore istosmjernog referentnog napona temeljene na širini zabranjenog pojasa (*bandgap*).
4. Opišite koje izvore izmjeničnog napona razlikujemo.
5. Skicirajte shemu oscilatora s Wienovim mostom i opišite način rada.
6. Skicirajte shemu LC oscilatora i opišite način rada.
7. Skicirajte shemu oscilatora s kristalom kremena i opišite način rada.
8. Skicirajte shemu generatora funkcija i opišite način rada.
9. Skicirajte shemu diodnog sintetizatora valnog oblika i opišite način rada.
10. Opišite neposredne (direktne) sintetizatore frekvencije.
11. Opišite generatore spektra.
12. Skicirajte shemu faznog detektora i opišite način rada.
13. Opišite posredne (indirektne) sintetizatore frekvencije temeljene na fazno vezanoj petlji (PLL).
14. Objasniti načelo direktne digitalne sinteze frekvencije. (DDS).
15. Skicirajte shemu selektivnog voltmetra i opišite način rada.
16. Opisati rad analizatora spektra sa slijednim načinom analize.
17. Opisati rad analizatora spektra s paralelnim načinom analize.
18. Objasnite način rada pretvornika efektivne vrijednosti u istosmjerni napon.
19. Objasnite način mjerjenja efektivne vrijednosti upotrebom množila.

**Zadaci:**

1. U stabilizatoru napona koristi se Zener dioda slijedećih značajki:  $U_{Z0} = 20 \text{ V}$ ,  $I_{Z\min} = 10 \text{ mA}$ ,  $r_z = 10 \Omega$ ,  $P_{\max} = 1,0 \text{ W}$ .

a.) Odredite najveću vrijednost otpora serijskog otpornika  $R_s$  u stabilizatoru tako da stabilizator ispravno radi uz ulazni napon  $U_1 = 25 \text{ V}$  i priključeno trošilo  $R_p = 1 \text{ k}\Omega$ .  $R_{s\max} = ?$

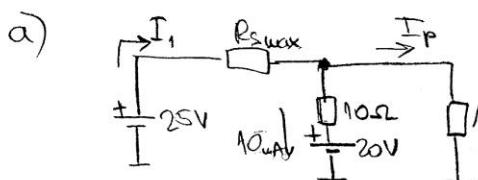
b.) Uz tako određeni serijski otpor, koliki se najveći istosmjerni napon  $U_1$  smije priključiti na ulaz stabilizatora, a da ne dođe do preopterećenja diode?  $U_1 = ?$



Rješenje:

a.)  $R_{s\max} = 166,667 \Omega$

b.)  $U_1 = 31,962 \text{ V}$



- 20V je približan napon koji tever dioda mora osigurati na trošku, tj. ovom  $R_p$  otporniku

- ovaj put možemo razvijati pad naponu na  $r_z$  (0.1V)

- zači 20V na desnoj granici 1000 Ω daje struju  $I_p = 20 \text{ mA}$

- iznos diodi rde još 10 mA (zadano)

- iznos otpor  $R_s$  onda ide 30 mA (20 mA iznos troška + 10 mA iznos diodi)

- s obzirom na razliku naponova 25V na ulazu i 20V (tever), pad naponu na otporniku je  $R_s$  je 5V

$$R_{s\max} = \frac{5V}{30 \text{ mA}} = 0,16666 \cdot 10^3 = 166,667 \Omega$$

b)

$$P_{\max} = 1 \text{ W} = I_{\max} \cdot U_p = I_{\max} (20 + I_{\max} \cdot 10)$$

$$U_p = U_2 + I_{\max} \cdot r_z = 20 + (I_{\max} \cdot 10)$$

$$I_{\max} = 0,0488 \text{ A}$$

$$U_1 = R_s \cdot (I_{\max} + 20 \text{ mA}) + U_p$$

$$U_1 = 166,667 (0,0488 + 0,02) + 20,1$$

$$U_1 = 31,725 \text{ V}$$

Zavod za elektroničke sisteme i obradbu signala

2. Izvori istosmjernog referentnog napona temeljen je na širini zabranjenog pojasa (*bandgap*). Napon zabranjenog pojasa iznosi 1,205 V, a referentni napon iznosi 1,2872 V. Temperaturni koeficijent termičkog napona iznosi  $0,0862 \text{ mV}^\circ\text{C}$ . Ako je spoj temperaturno kompenziran koliko je puta temperaturni koeficijent pn spoja ( $U_{BE} = 650 \text{ mV}$ ) veći od temperaturnog koeficijenta termičkog napona 1 na kojoj temperaturi?

Rješenje:  
 $K = 3, T = 25^\circ\text{C}$

$$U_{GP} = 1,205 \text{ V} \quad - \text{napon zabr. pojasa}$$

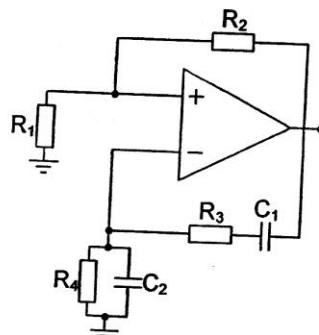
$$U_{REF} = 1,2872 \text{ V}$$

$$\Delta T = 0,0862 \text{ mV}^\circ\text{C} \quad - \text{temp. koef. tem. napom.}$$

$$U_{BE} = 650 \text{ mV} \quad - \text{temp. koef. napom. pri spoju}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

3. RC oscilator u spoju Wienovog mosta s operacijskim pojačalom koristi se kao izvor sinusnog napona frekvencije 1 kHz. Odredite vrijednosti otpornika u granama negativne i pozitivne povratne veze ako su kondenzatori u grani pozitivne povratne veze jednaki, kapaciteta 3,3 nF. Pojačanje pojačala je 80 dB na frekvenciji 1 kHz.



$$C_1 = C_2 = 3.3 \text{ nF}$$

$$A = 80 \text{ dB} \text{ na } f = 1 \text{ kHz}$$

$$R_1, R_2, R_3, R_4 = ?$$

$$A = 80 \text{ dB} = 20 \log_{10} X \rightarrow X = 10^4$$

Rješenje:

$$\text{uvjet osciliranja: } (\beta_+ - \beta_-) \cdot A \geq 1 \rightarrow \left( \frac{1}{\beta_-} - 1 \right) \cdot 10^4 \geq 1$$

$$\beta_+ = \frac{1}{3} \quad R_3 = R_4, C_1 = C_2$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_1 C_2}}, \text{ už } \omega_0 = 2\pi f_0 \rightarrow R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} = 48.23 \cdot 10^6 = 48.23 \cdot 10^3$$

$$R_3 = R_4 = R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = 48.23 \text{ k}\Omega$$

$$\beta_- = 0.3332$$

$$\beta_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \rightarrow R_2 = 47 \text{ k}\Omega, R_1 = 23.5 \text{ k}\Omega$$

$$R = R_3 = R_4$$

$$0.3332 (R_1 + R_2) = R_1$$

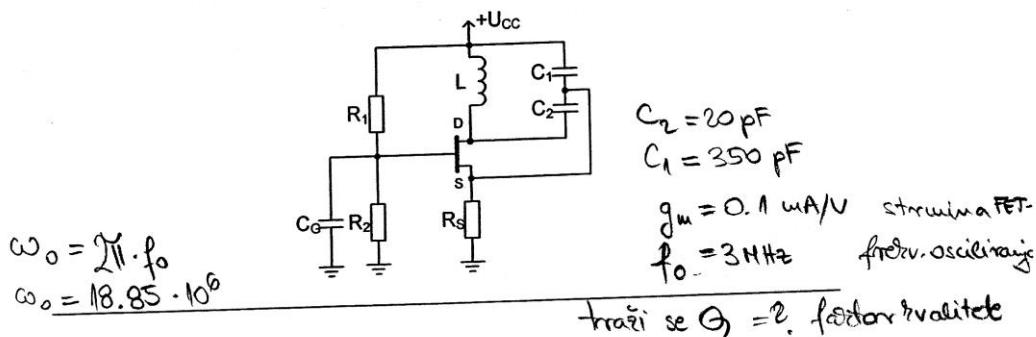
$$(1 - 0.3332) R_1 = 0.3332 R_2$$

$$0.66668 R_1 = 0.3332 R_2$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 2.0$$

Zavod za elektroničke sisteme i obradbu signala

4. U Coplittsovom LC oscilatoru kondenzator je spojen između odvoda u uvodu FET-a i iznosi  $20 \text{ pF}$ , a kondenzator spojen između napajanja oscilatora i uvoda FET-a iznosi  $350 \text{ pF}$ . Ako je strmina FET-a  $0,1 \text{ mA/V}$ , a frekvencija osciliranja  $3 \text{ MHz}$ , odredite potrebnii faktor kvalitete titravnog kruga. (odvod – eng. drain, uvod – eng. source).



Rješenje:

$$C_{uk} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\rightarrow C_{uk} = \frac{350 \cdot 10^{-12} \cdot 20 \cdot 10^{-12}}{350 \cdot 10^{-12} + 20 \cdot 10^{-12}} = \frac{7000 \cdot 10^{-24}}{370 \cdot 10^{-12}} = 18.92 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 18.92 \text{ pF}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C_{uk}} \Rightarrow \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C_{uk}}$$

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C_{uk}} = \frac{1}{18.85 \cdot 10^6 \cdot 18.92 \cdot 10^{-12}} = \underline{\omega_0 L = 2.804 \cdot 10^3}$$

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L}$$

$$g_m \cdot R_p = \frac{C_1}{C_2}$$

$$Q = \frac{1}{g_m C_1 + C_2} \cdot 2\pi f_0 = 62,4$$

$$\rightarrow R_p = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{g_m} = \frac{350}{20} \cdot \frac{1}{0.1 \cdot 10^{-3}} = \underline{175 \Omega}$$

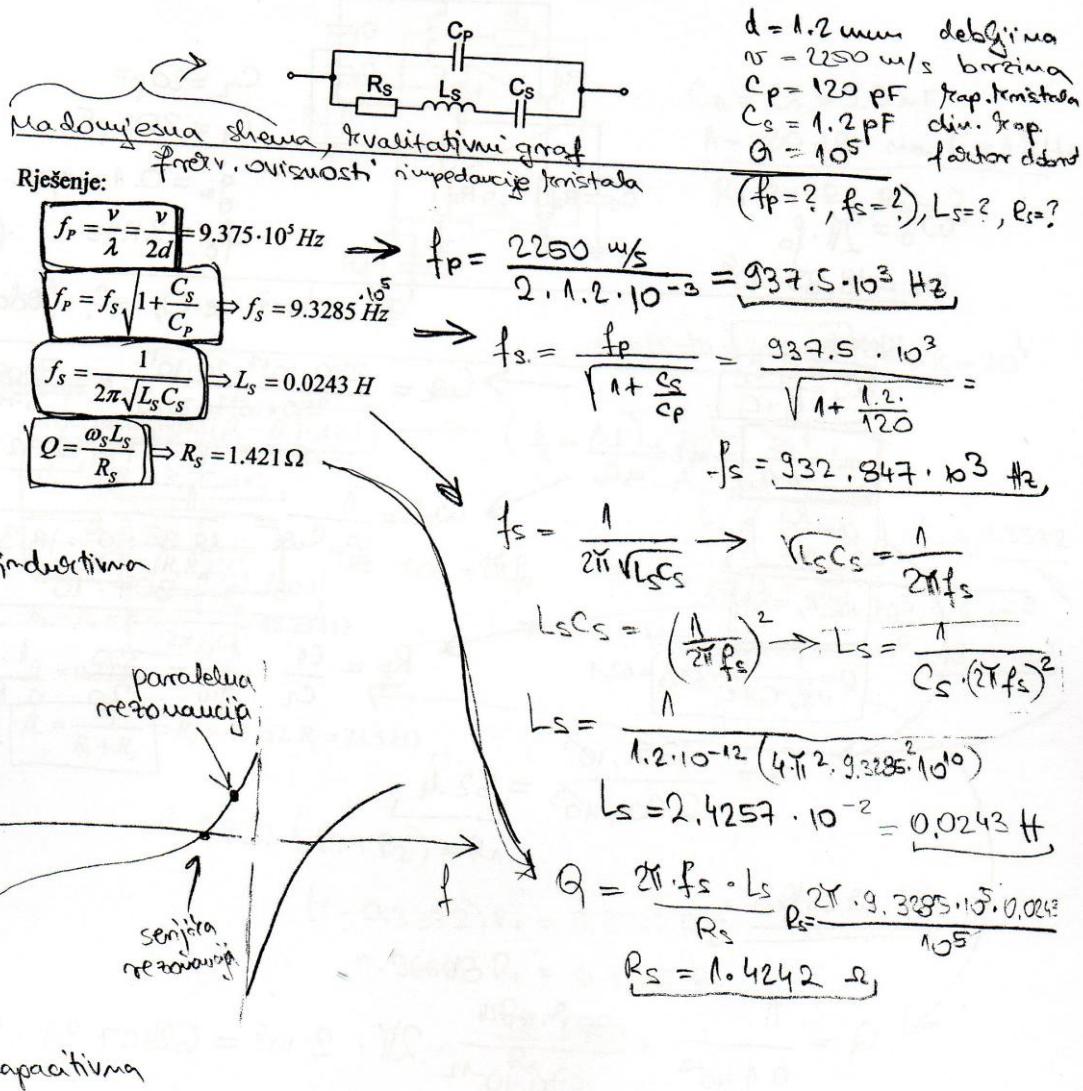
$$\rightarrow Q = \frac{175 \cdot 10^3}{2.804 \cdot 10^3} = \underline{62,4}$$

ili uvratio:

$$\rightarrow Q = \frac{1}{0.1 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{350^2 \cdot 10^{-24}}{370 \cdot 10^{-12}} \cdot 2\pi \cdot 3 \cdot 10^6 = 62407.31 \cdot 10^{-3} = \underline{62,4}$$

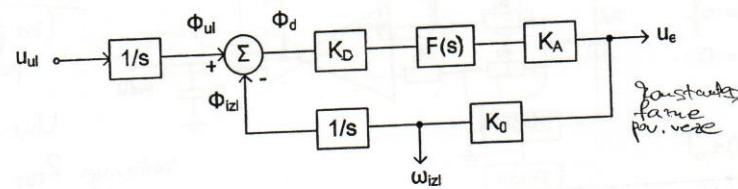
Zavod za električne sustave i obradbu signala

5. Oscilator s kristalom kremena oscilira na frekvenciji na kojoj je impedancija kristala najmanja. Brzina širenja vala po kristalu debljine 1,2 mm iznosi 2250 m/s. Kapacitet kristala iznosi je 120 pF, dinamički kapacitet 1,2 pF, a faktor dobrote  $10^5$ . Nacrtajte nadomjesnu shemu i kvalitativni graf frekvenčne ovisnosti impedancije kristala, te izračunajte vrijednosti preostalih dinamičkih parametara kristala.



Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

6. Na ulaz sklopa s faznom povratnom vezom (PLL) doveden je signal vremenski promjenjive frekvencije oblika  $f(t) = 10\text{kHz} + 200\text{Hz} \cdot \sin(2\pi \cdot 5000\text{s}^{-1} \cdot t)$ . Odredite amplitudu promjene frekvencije signala na izlazu iz naponski kontroliranog oscilatora PLL-a, ako je kao filter u PLL-u upotrebljen niskopropusni filter prvog reda, gornje granične frekvencije 100 Hz i jediničnog istosmjernog pojačanja. Konstanta fazne povratne veze iznosi  $K_v = 10^4 \text{s}^{-1}$ , a frekvencija osciliranja u slobodnom režimu 10 kHz. Naputak: frekvencija se definira kao vremenska derivacija faze signala.



1. ned  
filter - low pass  
 $f_g = 100 \text{ Hz}$   
 $K_v = 10^4 \text{ s}^{-1}$   
 $f_0 = 10^4 \text{ Hz}$

konstanta  
fazne  
pov. veze

izl = ?

Rješenje:

$$H(s) = \frac{\Phi_{izl}}{\Phi_{ul}} = \frac{K_v F(s)}{s + K_v F(s)}$$

$$F(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_g}}$$

$$|H(j\omega)| = \frac{K_v}{\sqrt{\left(K_v - \frac{\omega^2}{\omega_g}\right)^2 + \omega^2}}$$

$$\begin{cases} \omega = 5000 \cdot 2\pi \\ \omega_g = 100 \cdot 2\pi \\ K_v = 10^4 \end{cases}$$

$$|H(j\omega)| = 6.406 \cdot 10^{-3}$$

$$F(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{100 \cdot 2\pi}}$$

$$|H(j\omega)| = \frac{10^4}{\sqrt{(10^4 - (5000 \cdot 2\pi)^2)^2 + (100 \cdot 2\pi)^2}}$$

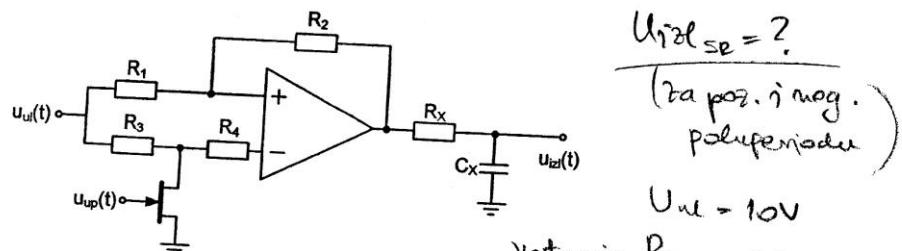
$$|H(j\omega)| = 6.4057 \cdot 10^{-3}$$

$$f_{ul}(t) = 10\text{kHz} + 200\text{Hz} \cdot \sin(2\pi \cdot 5000\text{s}^{-1} \cdot t)$$

$$\begin{aligned} f_{izl}(t) &= 10\text{kHz} + |H(j2\pi \cdot 5000)| 200\text{Hz} \cdot \sin(2\pi \cdot 5000 \cdot t + \varphi_{H(\omega)}) \\ &= 10\text{kHz} + 1.281\text{Hz} \cdot \sin(2\pi \cdot 5000 \cdot t + \varphi_{H(\omega)}) \end{aligned}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

7. Sklop prikazan slikom koristi se kao punovalni ispravljač i nema faznog pomaka između ulaznog i upravljačkog signala. Kolika je srednja vrijednost izlaznog napona za vrijeme pozitivnog, a kolika za vrijeme negativnog poluperioda ulaznog sinusnog napona amplitude 10V, ako je otpor FET-a u vođenju  $100\Omega$ , a u nevođenju  $10M\Omega$ ? Otpornici  $R_1 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$ ,  $R_x = 120k\Omega$ ,  $C_x = 1\mu F$ .



$$U_{izl,sp} = ? \\ (\text{za poz. i neg. poluperiodu})$$

$$U_{ul} = 10V$$

$$\text{Vodenje } R_{FET} = 100\Omega \\ \text{nevodenje } R_{FET} = 10M\Omega$$

Rješenje:

$$U_{izl,sp} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} u_{m_i} \sin \phi d\phi = \frac{1}{\pi} u_{m_i} (-\cos \phi) \Big|_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} u_{m_i} (1+1) = \frac{2}{\pi} u_{m_i}$$

$$u_{m_i} = \left[ \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_{FET}}{R_3 + R_{FET}} - \frac{R_2}{R_1} \right] \cdot u_{ul}$$

a) pozitivna poluperioda (FET ne vodi)

$$u_{m_i} = 0.998 \cdot u_{ul}$$

$$U_{izl,sp} = \frac{2}{\pi} u_{m_i}$$

vodenje

$$U_{m_i} = \left[ (1+1) \frac{100}{10^4 + 100} - 1 \right] \cdot u_{ul} = -0.998 \cdot u_{ul}$$

$$U_{izl,sp} = 6.3535V$$

b) negativna poluperioda (FET vodi)

$$u_{m_i} = -0.902 \cdot u_{ul}$$

$$U_{izl,sp} = 6.2401V$$

$$U_{m_i} = \left[ (1+1) \frac{10^7}{10^4 + 10^7} - 1 \right] \cdot u_{ul} = 0.998 u_{ul}$$

vodenje

$$\rightarrow U_{izl,sp} = \frac{2}{\pi} \cdot U_{m_i} = \frac{2}{\pi} \cdot 0.998 \cdot 10$$

nevodenje

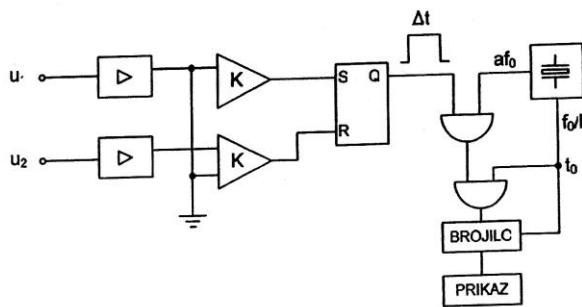
$$U_{izl,sp} = 6.3535V$$

$$U_{izl,sp} = \frac{2}{\pi} \cdot U_{m_i} = \frac{2}{\pi} \cdot (0.902) \cdot 10$$

$$U_{izl,sp} = 6.2401V$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

8. Digitalnim mjerilom faze mjeri se fazi pomak od  $20^\circ$  signala frekvencije 40kHz. Frekvencija osnovnog oscilatora je 7MHz, konstanta množenja frekvencije je 10. Impulsi se dovode li dekadsko brojilo. Ciklus mjerena traje 0,5 ms. Odredite broj impulsa li svakom paketu te prikaz na digitalnom pokazniku.



$\psi = 20^\circ$  fazi pomak  
 $f_M = 40\text{ kHz}$  frekv.sj  
 $f_0 = 7\text{ MHz}$   
 $a = 10$  - konstanta množenja frekvencije  
 $t_0 = 0.5\text{ ms}$  - ciklus mjerene

Rješenje:

$$N_I = a f_0 \frac{1}{f_M} \frac{\psi}{360^\circ} \quad \Delta t = \frac{1}{f_M} \frac{\psi}{360^\circ}$$

$$N_I = 97.22 \text{ impulsa}$$

$$N_P = t_0 f_M = 20 \text{ paketa}$$

$$N_{UK} = N_I N_P = 1940 \text{ prikaza}$$

broj impulsa u svakom paketu  $N_I = ?$   
 prikaz  $N_{UK} = ?$

$$N_I = 10 \cdot 7 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{40 \cdot 10^3} \cdot \frac{20^\circ}{360^\circ} = \frac{97.222}{\text{impulsa}}$$

broj paketa

$$N_P = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^6 = 20 \text{ paketa}$$

ciklus mjerene

$$N_{UK} = N_I \cdot N_P = 97 \cdot 20 = 1940 \text{ prikaza}$$

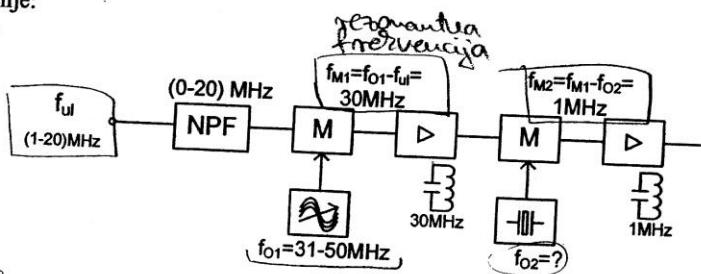
Zavod za električne sustave i obradbu signala

9. Selektivnim voltmetrom se mjeri napon u području frekvencija od 1 MHz do 20 MHz. U prvom stupnju za miješanje koristi se promjenjivi oscilator kojemu se frekvencija može mijenjati u području od 31 MHz do 50 MHz, a selektivno pojačalo tog stupnja ima rezonantnu frekvenciju 30 MHz. Selektivno pojačalo u drugom stupnju za miješanje ima rezonantnu frekvenciju 1 MHz.

- nacrtajte principijelnu blok-shemu selektivnog voltmatra s dva stupnja za miješanje i naznačite vrijednosti navedene u zadatku,
- odredite frekvenciju stabilnog oscilatora u drugom stupnju za miješanje,
- odredite koliku frekvenciju treba namjestiti na oscilatoru u prvom stupnju ako se u spektru ulaznog signala mjeri amplituda komponente od 10 MHz.

Rješenje:

a.)



b.)  $f_{O2} = ?$

$$f_{H2} = 1 \text{ MHz}$$

$$f_{M1} = 30 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ MHz} - f_{O2} = 1 \text{ MHz}$$

$$f_{H2} = f_{H1} - f_{O2} = 30 \text{ MHz} - f_{O2} \Rightarrow f_{O2} = 29 \text{ MHz}$$

$$\rightarrow f_{O2} = 30 \text{ MHz} - 1 \text{ MHz}$$

$$f_{O2} = 29 \text{ MHz}$$

c.)  $f_{O1} = ?$

$$f_{U1} = 10 \text{ MHz}$$

$$f_{M1} = 30 \text{ MHz}$$

$$\left. \begin{aligned} f_{O1} &= f_{M1} + f_{U1} = 40 \text{ MHz} \\ f_{H1} &= 30 \text{ MHz} \end{aligned} \right\}$$

$$f_{M1} = f_{O1} - f_{U1} \rightarrow f_{O1} = f_{H1} + f_{U1} = 30 \text{ MHz} + 10 \text{ MHz} = 40 \text{ MHz}$$

10. Direktnom digitalnom sintezom (DDS) realiziran je izvor sinusnog signala, a promjenjivost njegove frekvencije ostvarena je upotrebom numerički kontroliranog oscilatora. Frekvencija referentnog internog oscilatora iznosi 122,88 MHz, a brojilo faze sinusnog signala je 32-bitne razlučivosti. Ako je u registru za kontrolu frekvencije upisana binarna riječ 556AAAAB (heksadecimalno), kolika je frekvencija sinusnog signala na izlazu iz sklopa?

Rješenje:  
41 MHz

$$f_0 = 122.88 \text{ MHz}$$

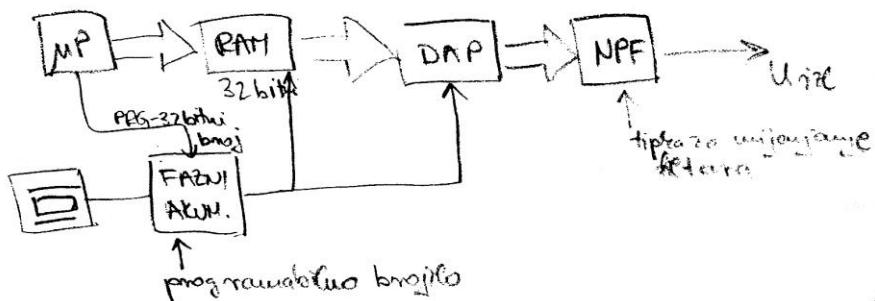
32-bitna razlučivost

register za kontrolu frekv. 556AAAAB

sim.sig.  $f_{int} = ?$

#### DIREKTNA DIGITALNA SINTEZA (DDS)

- numerički kontrolirani oscilatori (NKO)



hex  $\rightarrow$  dec

$$556AAAAB \rightarrow 1433053867$$

$$f_{int} = f_0 \cdot =$$

## Zadaci Elektroničke instrumentacije (4.dio)

### Teorijska pitanja

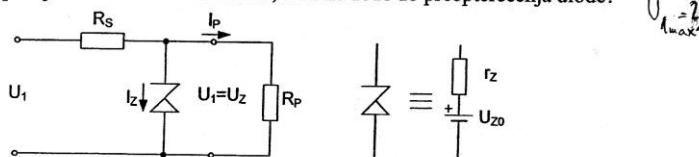
1. Opišite uzroke pogreške kod izvora istosmjernog referentnog napona sa Zener diodom.
2. Skicirajte sve izvedbe izvora istosmjernog referentnog napona sa Zener diodom.
3. Opišite izvore istosmjernog referentnog napona temeljene na širini zabranjenog pojasa (*bandgap*).
4. Opišite koje izvore izmjeničnog napona razlikujemo.
5. Skicirajte shemu oscilatora s Wienovim mostom i opišite način rada.
6. Skicirajte shemu LC oscilatora i opišite način rada.
7. Skicirajte shemu oscilatora s kristalom kremena i opišite način rada.
8. Skicirajte shemu generatora funkcija i opišite način rada.
9. Skicirajte shemu diodnog sintetizatora valnog oblika i opišite način rada.
10. Opišite neposredne (direktne) sintetizatore frekvencije.
11. Opišite generatore spektra.
12. Skicirajte shemu faznog detektora i opišite način rada.
13. Opišite posredne (indirektne) sintetizatore frekvencije temeljene na fazno vezanoj petlji (PLL).
14. Objasniti načelo direktne digitalne sinteze frekvencije. (DDS).
15. Skicirajte shemu selektivnog voltmетra i opišite način rada.
16. Opisati rad analizatora spektra sa sljednim načinom analize.
17. Opisati rad analizatora spektra s paralelnim načinom analize.
18. Objasnite način rada pretvornika efektivne vrijednosti u istosmjerni napon.
19. Objasnite način mjerena efektivne vrijednosti upotrebom množila.

**Zadaci:**

1. U stabilizatoru napona koristi se Zener dioda slijedećih značajki:  $U_{Z0} = 20 \text{ V}$ ,  $I_{Z\min} = 10 \text{ mA}$ ,  $r_z = 10 \Omega$ ,  $P_{\max} = 1,0 \text{ W}$ .

a.) Odredite najveću vrijednost otpora serijskog otpornika  $R_S$  u stabilizatoru tako da stabilizator ispravno radi uz ulazni napon  $U_1 = 25 \text{ V}$  i priključeno trošilo  $R_P = 1 \text{ k}\Omega$ .  $R_{S\max} = ?$

b.) Uz tako određen serijski otpor, koliki se najveći istosmerni napon  $U_1$  smije priključiti na ulaz stabilizatora, a da ne dođe do preopterećenja diode?



Rješenje:

a.)  $R_{S\max} = 166,667 \Omega$

b.)  $U_1 = 31,962 \text{ V}$

a)

-  $20 \text{ V}$  je pridružan napon koji Zener dioda mora osigurati na trošilju, tj. ovom  $R_P$  otporniku  
- ovaj put možemo zauzeti manji pad napon  
na  $r_Z$  ( $0,1 \text{ V}$ )  
- za  $20 \text{ V}$  na dodatnoj granici  $1000 \Omega$   
daje struju  $I_P = 20 \text{ mA}$   
- trošak diode ide još  $10 \text{ mA}$  (zadava)

- izostavljeni otpor  $R_S$  sada ide  $(20 \text{ mA})$  ( $20 \text{ mA}$  preko trošila +  $10 \text{ mA}$  preko diode)  
- S obzirom na razliku napona  $25 \text{ V}$  na ulazu i  $20 \text{ V}$  (Zener), pod naponu  
na otporniku  $R_S$  je  $5 \text{ V}$

$$R_{S\max} = \frac{5 \text{ V}}{30 \text{ mA}} = 0.16666 \cdot 10^3 = 166.667 \Omega$$

b)

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot U_p$$

$$U_p = U_z + I_{\max} \cdot r_z = 20 + I_{\max} \cdot 10$$

$$P_{\max} = I_{\max} (20 + I_{\max} \cdot 10)$$

$$1 = 20 I_{\max} + 10 I_{\max}^2$$

$$10 I_{\max}^2 + 20 I_{\max} - 1 = 0$$

$$I_{\max,1,2} = \frac{-20 \pm \sqrt{400+40}}{20} =$$

$$I_{\max} = -1 \pm 1.0488$$

$$I_{\max} = 0.0488 \text{ A}$$

$$U_o = R_S (I_{\max} + I_p) + U_p$$

$$U_o = 166.667 (0.049 + 0.02) + 20$$

$$U_o = 31.5 \text{ V}$$

Zavod za elektroničke sisteme i obradu signala

2. Izvor istosmjernog referentnog napona temeljen je na širini zabranjenog pojasa (*bandgap*). Napon zabranjenog pojasa iznosi 1,205 V, a referentni napon iznosi 1,2872 V. Temperaturni koeficijent termičkog napona iznosi 0,0862 mV/°C. Ako je spoj temperaturno kompenziran koliko je puta temperaturni koeficijent pn spoja ( $U_{BE} = 650 \text{ mV}$ ) veći od temperaturnog koeficijenta termičkog napona i na kojoj temperaturi?

Rješenje:  
 $K = 3, T = 25^\circ\text{C}$

$$U_{G0} = 1,205 \text{ V} \quad - \text{napon zabranjenog pojasa}$$

$$U_{REF} = 1,2872 \text{ V}$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = 0,0862 \text{ mV/}^\circ\text{C} \quad - \text{temperaturni koeficijent termičkog napona}$$

$$\frac{U_{BE}}{= ?} = 650 \text{ mV} \quad - \text{temp. koeficijent pn spoj}$$

$$U_{BG} = k U_T + U_{BE}$$

$$\epsilon(U_{BG}) = k \cdot \epsilon(U_T) + \epsilon(U_{BE})$$

$$\downarrow$$

$$\epsilon(U_{BG}) \rightarrow 0$$

$$| \quad k = \frac{-\epsilon(U_{BE})}{\epsilon(U_T)}$$

$$\epsilon(U_{BG}) = - \left( \frac{U_{G0} - U_{BE}}{T} + \frac{3k}{2} \right)$$

$$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$$

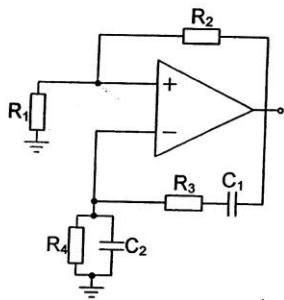
$$2 = 1,002 \cdot 10^{-19}$$

$$k = \frac{U_{G0} - U_{BE}}{U_T} + 3$$

$$U_T = \frac{kT}{2}$$

Zavod za električne sustave i obradu signala

3. RC oscilator u spoju Wienovog mosta s operacijskim pojačalom koristi se kao mjeri izvor sinusnog napona frekvencije 1 kHz. Odredite vrijednosti otpornika u granama negativne i pozitivne povratne veze ako su kondenzatori u grani pozitivne povratne veze jednaki, kapaciteta 3,3 nF. Pojačanje pojačala je 80 dB na frekvenciji 1 kHz.



$$\begin{aligned} C_1 &= C_2 = 3.3 \text{ nF} \\ A &= 8 \text{ dB} \quad \text{na } f = 1 \text{ kHz} \\ R_1, R_2, R_3, R_4 &=? \end{aligned}$$

$$A = 30 \text{ dB} = 20 \log_{10} X \rightarrow X = 10^4$$

Rješenje:

$$\left. \begin{array}{l} \text{uvjet osciliranja: } (\beta_+ - \beta_-) \cdot A \geq 1 \\ \beta_+ = \frac{1}{3}, R_3 = R_4, C_1 = C_2 \\ \omega_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_1 C_2}}, \text{ i už } \omega_0 = 2\pi f_0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \left( \frac{1}{3} - \beta_- \right) \cdot 10^4 \geq 1 \\ -\beta_- \geq \left( 1 - \frac{1}{3} \cdot 10^4 \right) : 10^4 \\ \beta_- \geq \frac{1}{3} - 10^{-4}, \quad \beta_- \leq 0.3332 \end{array}$$

$$R_3 = R_4 = R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = 48.23 \text{ k}\Omega, \quad R = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 3.3 \cdot 10^{-9}} = 48228.77 \Omega = 48.23 \text{ k}\Omega$$

$$\beta_- = 0.3332$$

$$\beta_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_2 = 47 \text{ k}\Omega, R_1 = 23.5 \text{ k}\Omega$$

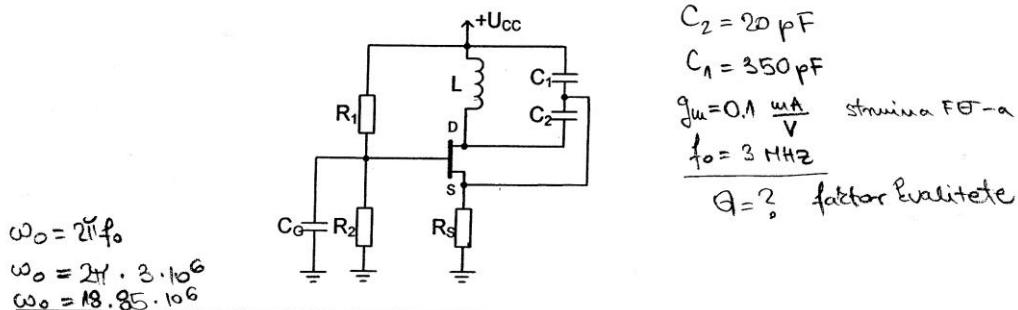
$$0.3332 \cdot (R_1 + R_2) = R_1$$

$$R_1 (1 - 0.3332) = 0.3332 R_2$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{0.6668}{0.3332} = 2.0012 \approx 2$$

Zavod za električne sisteme i obradu signala

4. U Coplittsovom LC oscilatoru kondenzator je spojen između odvoda u uvoda FET-a i iznosi  $20 \text{ pF}$ , a kondenzator spojen između napajanja oscilatora i uvoda FET-a iznosi  $350 \text{ pF}$ . Ako je strmina FET-a  $0,1 \text{ mA/V}$ , a frekvencija osciliranja  $3 \text{ MHz}$ , odredite potrebnii faktor kvalitete titrajnog kruga. (odvod – eng. drain, uvod – eng. source).



Rješenje:

$$C_{uk} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \rightarrow C_{uk} = \frac{350 \cdot 10^{-12} \cdot 20 \cdot 10^{-12}}{370 \cdot 10^{-12}} = 18,92 \text{ pF}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C_{uk}} \Rightarrow \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C_{uk}} \rightarrow \omega_0 L = \frac{1}{18,85 \cdot 10^6 \cdot 18,92 \cdot 10^{-12}} = 2,804 \cdot 10^3$$

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L} \rightarrow Q = \frac{175 \cdot 10^3}{2,804 \cdot 10^3} = 62,4$$

$$g_m \cdot R_p = \frac{C_1}{C_2} \rightarrow R_p = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{g_m} = \frac{350}{20} \cdot \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 175 \text{ k}\Omega$$

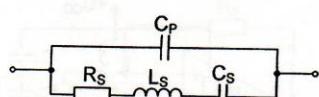
provera:  $Q = \frac{1}{g_m C_1 + C_2} 2\pi f_0 = 62,4$   
ili verifikacija:

$$Q = \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{(350 \cdot 10^{-12})^2}{370 \cdot 10^{-12}} \cdot 2\pi \cdot 3 \cdot 10^6 = 62407 \cdot 31 \cdot 10^{-3} = 62,4$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

5. Oscilator s kristalom kremena oscilira na frekvenciji na kojoj je admitancija kristala najmanja. Brzina širenja vala po kristalu debljine 1,2 mm iznosi 2250 m/s. Kapacitet kristala iznosi je 120 pF, dinamički kapacitet 1,2 pF, a faktor dobrote  $10^5$ . Nacrtajte nadomjesnu shemu i kvalitativni graf frekvenčne ovisnosti impedancije kristala, te izračunajte vrijednosti preostalih dinamičkih parametara kristala.

Nadomjesna shema:



$$d = 1.2 \text{ mm} \quad - \text{debljina kristala}$$

$$v_s = 2250 \text{ m/s} \quad - \text{brzina širenja}$$

$$C_p = 120 \text{ pF} \quad - \text{kapacitet kristala}$$

$$C_s = 1.2 \text{ pF} \quad - \text{dinamički kap}$$

$$Q = 10^5 \quad - \text{faktor dobrote}$$

Rješenje:

$$f_p = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2d} = 9.375 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

$$f_p, f_s, L_s, R_s = ?$$

$$f_p = f_s \sqrt{1 + \frac{C_s}{C_p}} \Rightarrow f_s = 9.3285 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

$$\rightarrow f_p = \frac{2250}{2 \cdot 1.2 \cdot 10^{-3}} = 9.375 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$$

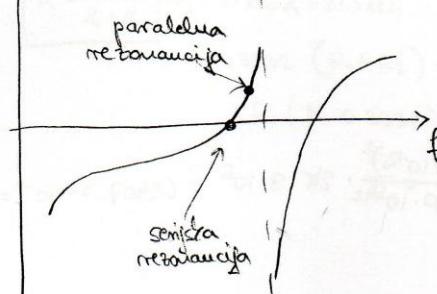
$$\rightarrow f_s = \frac{f_p}{\sqrt{1 + \frac{C_s}{C_p}}} = 9.3285 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

$$Q = \frac{\omega_s L_s}{R_s} \Rightarrow R_s = 1.421 \Omega$$

$$\rightarrow L_s = \frac{1}{C_s (2\pi f_s)^2} = 0.0243 \text{ H}$$

$$Q = \frac{2\pi f_s L_s}{R_s} \rightarrow R_s = 1.421 \Omega$$

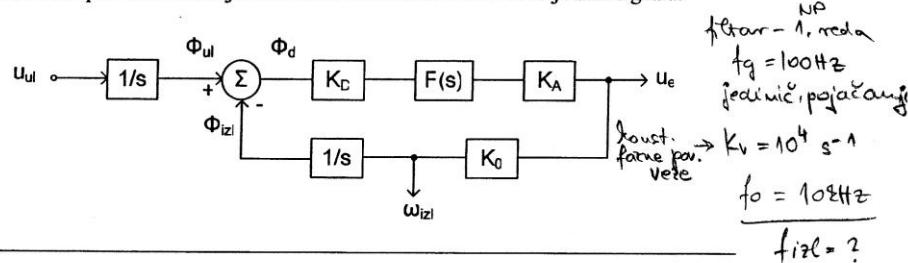
$X_L$  induktivna



$X_C$  kapacitivna

$$\omega = 2\pi \cdot 5000$$

6. Na ulaz sklopa s faznom povratnom vezom (PLL) doveden je signal vremenski promjenjive frekvencije oblika  $f(t) = 10\text{kHz} + 200\text{Hz} \cdot \sin(2\pi \cdot 5000t^{-1})$ . Odredite amplitudu promjene frekvencije signala na izlazu iz naponski kontroliranog oscilatora PLL-a, ako je kao filter u PLL-u upotrebljen niskopropusni filter prvog reda, gornje granične frekvencije 100 Hz i jediničnog istosmernog pojačanja. Konstanta fazne povratne veze iznosi  $K_v = 10^4\text{s}^{-1}$ , a frekvencija osciliranja u slobodnom režimu 10 kHz. Naputak: frekvencija se definira kao vremenska derivacija faze signala.



Rješenje:

$$H(s) = \frac{\Phi_{izl}}{\Phi_{ul}} = \frac{K_v F(s)}{s + K_v F(s)}$$

$$F(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega}}$$

$$|H(j\omega)| = \frac{K_v}{\sqrt{\left( K_v - \frac{\omega^2}{\omega_g} \right)^2 + \omega^2}}$$

$$\omega_g = 100 \cdot 2\pi \quad K_v = 10^4 \quad |H(j\omega)| = 6,406 \cdot 10^{-3}$$

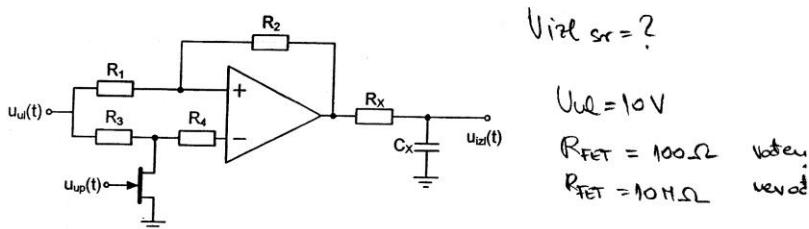
$$f_{iz}(t) = 10\text{kHz} + H(j2\pi \cdot 5000) \cdot 200\text{Hz} \cdot \sin(2\pi \cdot 5000 \cdot t + \phi_{H(\omega)})$$

$$= 10\text{kHz} + 1.281\text{Hz} \cdot \sin(2\pi \cdot 5000 \cdot t + \phi_{H(\omega)})$$

$$\frac{10^4}{\sqrt{\left(10^4 - \frac{(5000 \cdot 2\pi)^2}{100 \cdot 2\pi}\right)^2 + (5000 \cdot 2\pi)^2}}$$

Zavod za električne sustave i obradu signala

7. Sklop prikazan slikom koristi se kao punovalni ispravljač, i nema faznog pomaka između ulaznog i upravljačkog signala. Kolika je srednja vrijednost izlaznog napona za vrijeme pozitivnog, a kolika za vrijeme negativnog poluperioda ulaznog sinusnog napona amplitude 10V, ako je otpor FET-a u vođenju  $100\Omega$ , a u nevođenju  $10M\Omega$ ? Otpornici  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$ ,  $R_x = 120k\Omega$ ,  $C_x = 1\mu F$ .



Rješenje:

$$u_{izl,se} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_{m_i} \sin \varphi d\varphi = \frac{1}{\pi} u_{m_i} (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} u_{m_i} (1+1) = \frac{2}{\pi} u_{m_i}$$

$$u_{m_i} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_{FET}}{R_3 + R_{FET}} - \frac{R_2}{R_1} \cdot u_{ul}$$

a) pozitivna poluperioda (FET ne vodi)

$$u_{m_i} = 0.998 \cdot u_{ul}$$

$$u_{izl,se} = 6.3535 V$$

b) negativna poluperioda (FET vodi)

$$u_{m_i} = -0.9802 \cdot u_{ul}$$

$$u_{izl,se} = 6.2401 V$$

$$U_{izl,se} = ?$$

$$U_{ul} = 10 V$$

$$R_{FET} = 100 \Omega$$

$$R_{FET} = 10 M\Omega$$

voden  
nevoden

$$U_{izl,se} = \frac{2}{\pi} U_{ul}$$

$$U_{ul} = \left[ (1+1) \frac{10^2}{10^4 + 10^2} - 1 \right] \cdot U_{ul}$$

$$= 0.998 \cdot u_{ul} = 9.98 V$$

$$U_{izl,se} = \frac{2}{\pi} \cdot 9.98 = 6.353478 V$$

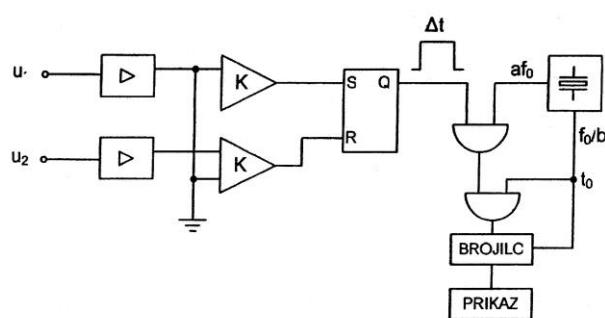
$$U_{ul} = \left[ (1+1) \cdot \frac{100}{10^4 + 10^2} - 1 \right] \cdot U_{ul}$$

$$= -0.98019 \cdot U_{ul} = -9.802 V$$

$$U_{izl,se} = \frac{2}{\pi} \cdot -9.802 = -6.2401 V$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

8. Digitalnim mjerilom faze mjeri se fami pomak od  $20^\circ$  signala frekvencije 40kHz. Frekvencija osnovnog oscilatora je 7MHz, konstanta množenja frekvencije je 10. Impulsi se dovode li dekadsko brojilo. Ciklus mjerena traje 0,5 ms. Odredite broj impulsa li svakom paketu te prikaz na digitalnom pokazniku.



$\psi = 20^\circ$  fazni pomak  
 $f_M = 40 \text{ kHz}$  frekv. sig  
 $f_0 = 7 \text{ MHz}$   
 $a = 10$  - konstanta množenja frekvencije  
 $t_0 = 0.5 \text{ ms}$  - ciklus mjerene

Rješenje:

$$N_I = a f_0 \frac{1}{f_M} \frac{\psi}{360^\circ}, \quad \Delta t = \frac{1}{f_M} \frac{\psi}{360^\circ}$$

$$N_I = 97.22 \text{ impulsu}$$

$$N_p = t_0 f_M = 20 \text{ paketa}$$

$$N_{UK} = N_I N_p = 1940 \text{ prikaza}$$

$N_I = ?$  broj impulsa  
 $N_p = ?$  broj paketa  
 $N_{UK} = ?$  broj prikaza

$$N_I = 10 \cdot 7 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{4 \cdot 10^4} \cdot \frac{20}{360^\circ}$$

$$N_I = 97.222 \text{ impulsu}$$

$$N_p = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^3 = 20 \text{ paketa}$$

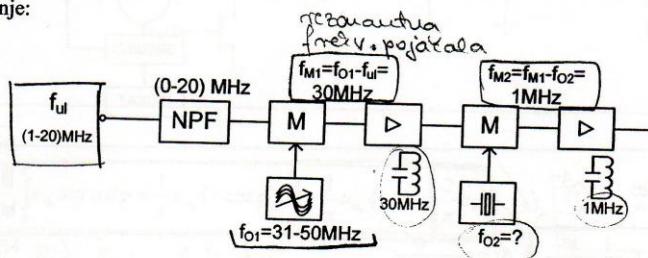
$$N_{UK} = 97 \cdot 20 = 1940 \text{ prikaza}$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

9. Selektivnim voltmetrom se mjerni napon u području frekvencija od 1 MHz do 20 MHz. U prvom stupnju za miješanje koristi se promjenjivi oscilator kojemu se frekvencija može mijenjati u području od 31 MHz do 50 MHz, a selektivno pojačalo tog stupnja ima rezonantnu frekvenciju 30 MHz. Selektivno pojačalo u drugom stupnju za miješanje ima rezonantnu frekvenciju 1 MHz.

- nacrtajte principijelnu blok-schemu selektivnog voltmatra s dva stupnja za miješanje i naznačite vrijednosti navedene u zadatku.
- odredite frekvenciju stabilnog oscilatora u drugom stupnju za miješanje,  $f_{o2} = ?$
- odredite koliku frekvenciju treba namjestiti na oscilatoru u prvom stupnju ako se u spektru ulaznog signala mjeri amplituda komponente od 10 MHz.

Rješenje:  
a.)



b.)  $f_{o2} = ?$   
 $f_{M1} = 30 \text{ MHz}$   
 $30 \text{ MHz} - f_{o2} = 1 \text{ MHz}$   
 $f_{M1} - f_{o2} = f_{IF}$   
 $\Rightarrow f_{o2} = 29 \text{ MHz}$

c.)  $f_{ul} = 10 \text{ MHz}$   
 $f_{M1} = 30 \text{ MHz}$   
 $f_{o1} = f_{M1} + f_{ul} = 40 \text{ MHz}$   
 $f_{M1} = f_{o1} - f_{ul}$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

10. Direktnom digitalnom sintezom (DDS) realiziran je izvor sinusnog signala, a promjenjivost njegove frekvencije ostvarena je upotrebom numerički kontroliranog oscilatora. Frekvencija referentnog internog oscilatora iznosi 122,88 MHz, a brojilo faze sinusnog signala je 32-bitne razlučivosti. Ako je u registar za kontrolu frekvencije upisana binarna riječ 556AAAAB (heksadecimalno), kolika je frekvencija sinusnog signala na izlazu iz sklopa?

Rješenje:  
41 MHz

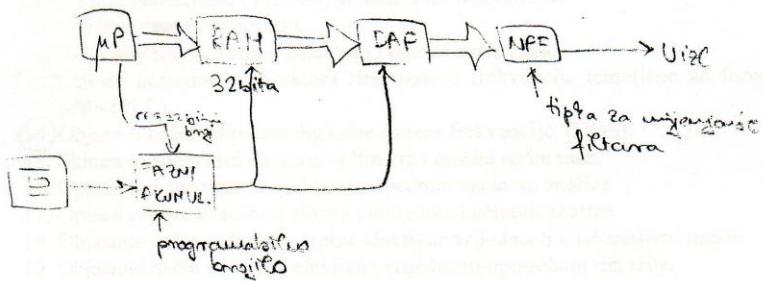
$$f_0 = 122,88 \text{ MHz}$$

32-bitna razlučivost

556AAAAB

$$f_{\text{izl}} = ?$$

DIREKTNA DIGITALNA SINTESA (DDS)



hex → dec

$$556AAAAB \rightarrow 1433053867$$

$$f_{\text{izl}} = \frac{N}{2^M} \cdot f_0 = \frac{1433053867}{2^{32}} \cdot 122,88 \text{ MHz} = 41 \text{ MHz}$$

**Zadaci iz  
Elektroničke instrumentacije (3.dio)**

**Teorijska pitanja:**

1. Što je to diferencijalni (protufazni) signal, a što je zajednički (istofazni) signal? Kako definiramo faktor rejekcije, a kako faktor diskriminacije? O čemu ovisi faktor potiskivanja zajedničkog napona  $F$ ?
2. Nacrtati nadomjesnu shemu diferencijalnog spoja mjerenog napona i mjernog uređaja. Definirati diferencijalni napon i zajednički napon, te izraze za idealni i realni mjereni napon.
3. Izvedite izraz za pojačanje ulaznog stupnja diferencijalnog pojačala.
4. Nacrtati nadomjesnu shemu plivajuće spoja mjerenog napona i mjernog uređaja.
5. Što je instrumentacijsko pojačalo i usporedite ga sa diferencijalnim pojačalom. Kako izvodimo promjenjivo pojačanje?
6. Kako se izvodi ulazni stupanj instrumentacijskog pojačala i kako ga štimmo od velikih diferencijalnih napona?
7. Objasnite statičke nesavršenosti instrumentacijskog pojačala i kako ih otklanjam? Objasnite izvore šuma kod instrumentacijskog pojačala.
8. Što je čopersko pojačalo i za što ga koristimo?
9. Objasnite rad auto-zero pojačala.
10. Što su izolacijska pojačala i za što se koriste?
11. Objasnite optičku spregu kod izolacijskih pojačala te pojASNITE linearizaciju.
12. Kako radi elektromagnetski spregnuto pojačalo?
13. Kako rade kapacitivno spregnuta pojačala?
14. Objasnite izvedbe izolacijskih sklopova u digitalnoj tehnologiji.
15. Što su mjerni izvori, kako ih dijelimo i koja im svojstva definiramo?
16. Objasnite što je unutrašnji otpor mjernih izvora?
17. Objasnite pojam valovitost kod izvora istosmjernog napona i struje.
18. Objasnite pojam stabilizacije kod izvora istosmjernog napona i struje.
19. Opisite stabilizator referentnog napona izведен sa Zener diodom.
20. Opisite „bandgap“ izvore.
21. Objasnite pojam faktora izobličenja ili distorzije mjernih izvora sinusnog valnog oblika.
22. Nabrojati i opisati izvedbe izlaznih stupnjeva mjernih izvora.
23. Objasniti temeljni princip rada oscilatora.
24. Objasniti izvedbu mjernog izvora za niske frekvencije realiziranog kako RC oscilator s Wienovim mostom.
25. Objasniti izvedbu mjernog izvora za visoke frekvencije realiziranog s LC oscilatorom, te Hartley-ovim oscilatorom.
26. Kako se realizira mjerni izvor visoke frekvencije s kremenom kristala te koje su mu prednosti.
27. Što su to vobleri i kako rade?
28. Objasniti rad generatora funkcija i dati njegovu blok shemu.

**Zadaci:**

- Analogni digitalni pretvornik integrirajućeg tipa s dvostrukim pilastim naponom, 14-bitne razlučivosti, projektiran je da potiskuje smetnju gradske mreže frekvencije 60 Hz i njegove više harmonike.
  - Koliko treba iznositi frekvencija takta  $f_0$  takvog pretvornika? Koliko je vremena  $T$  potrebno za analogno-digitalnu pretvorbu ulaznog signala ako se na ulaz dovodi signal pune skale?
  - Koliko iznosi vrijednost RC konstante, ako je  $U_{REF} = 2.5 \text{ V}$ , a vršna vrijednost ulaznog signala iznosi  $5 \text{ V}$ ?  $U_{IN} = 5 \text{ V}$
  - Ako starenje komponenti izaziva promjenu otpora R za +5 %, a kapaciteta C za -2 %, kako će se to odraziti: na izlazni napon integratora, a kako na točnost pretvorbe?

Rješenje:

- a) brojilo mora za  $1/60\text{Hz}=16.7\text{ms}$  izbrojati svih  $2^{14}$  impulsa

$$f_0 = \frac{2^{14}}{1/60} = 983.040 \text{ kHz}$$

potrebito vrijeme:

$$T = 2 \cdot T_0 = 33.3 \text{ ms}$$

$$a) f_0 = ? , T = ? , n = 14 , f_{grad} = 60$$

$$f_0 = f_{grad} \cdot 2^n = 2^n \cdot \frac{1}{T}$$

$$T = 2 \cdot T_0 = 2 \cdot \frac{2^n}{f_0} = \frac{2^{15}}{f_0}$$

$$b) U = \frac{1}{RC} \cdot U_{REF} \cdot T_x$$

$$T_x = T_0 = 16.7 \text{ ms} \text{ za max}$$

$$RC = 8.3 \text{ ms}$$

$$b) RC = ? , U_{REF} = 2.5 \text{ V} , U_{IN} = 5 \text{ V}$$

$$RC = \frac{U_{REF}}{U_{IN}} \cdot 2^n \cdot \frac{1}{f_0}$$

- c)  $\Delta U_{INT} = 4.859 \text{ V}$ , točnost neće biti promijenjena jer je to posljedica korištenja dvostrukе pile, te mjerjenje je neosjetljivo na „spore“ promjene vremenske konstante.

$$T_{stari} = RC$$

$$T_{novi} = R(1+0.05) \cdot C(1-0.02)$$

$$\Delta U_{INT} = \frac{U_{IN}}{\frac{T_{novi}}{T_{stari}}}$$

2. Analogno-digitalni pretvornik integrirajućeg tipa s dvostrukim pilastim naponom, realiziran je operacijskim pojačalom pojačanja  $A=10^3$ .

- a.) Uz pretpostavku da je izlazni napon pojačala  $u_{izl}(t)$  inicijalno nula, potrebno je pronaći  $u_{izl}(t \geq 0)$ , ako je na ulazu prisutan napon  $u_{ul}(t) = 1 \text{ V}$ .  $U_{izl}(t \geq 0) = ?$
- b.) Pronaći minimalnu vrijednost RC produkta, tako da je pogreška izlaznog napona pojačala  $u_{izl}(t=100ms)$  manja od  $1 \text{ mV}$ .

Rješenje:

$$a) u_{izl} \approx 10^3 \left( e^{-t/(10^3 RC)} - 1 \right)$$

$$b) RC \geq \frac{1}{14.14 \text{ s}}$$

$$a) U_{izl}(0) = 0 \quad , A = 10^3 \quad , u_{ul} = 1 \text{ V}$$

$$U_{izl}(\infty) = -A \cdot u_{ul} = -10^3$$

$$[ t = (1+A) RC ] = 10^3 RC$$

$$\boxed{U_{izl}(t) = U_{izl}(\infty) + [U_{izl}(0) - U_{izl}(\infty)] \cdot e^{-t/\tau}}$$

$$= -10^3 + (0 + 10^3) \cdot e^{-t/10^3 RC} = 10^3 (e^{-t/10^3 RC} - 1)$$

$$b) \boxed{U_{izl, (\text{idealno})}(t) = U_{izl}(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t u_{ul} \cdot dt} \approx -\frac{u_{ul}}{RC} \cdot t = -\frac{1}{RC} \cdot t$$

$$\boxed{U_{izl}(t) - U_{izl, (\text{idealno})}(t) \leq \text{iznos pogreške}}$$

$$U_{izl}(100 \mu\text{s}) - U_{izl, (\text{idealno})}(100 \mu\text{s}) \leq 1 \text{ mV}$$

$$10^3 (e^{-0.1/10^3 RC} - 1) + \frac{1}{RC} \cdot 0.1 \leq 10^{-3}$$

$$10^3 \left( 1 - \frac{1}{10^4 RC} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{10^4 RC} \right)^2 + \dots - 1 \right) + \frac{1}{10 RC} \leq 10^{-3}$$

$$\frac{10^2}{2} \left( \frac{1}{10^4 RC} \right)^2 \leq 10^{-3}$$

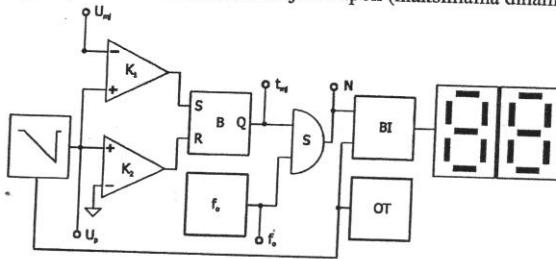
$$\frac{1}{10^4 RC} \leq \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot 2}{10^2}}, \frac{1}{10^4 RC} \leq \frac{1}{10^2}, RC \geq \frac{1}{10^4} \cdot \frac{10^3}{10^2} = \frac{1}{10^2}, RC \geq \frac{1}{14.14} \text{ s}$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

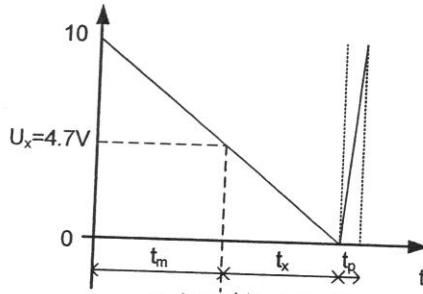
3. U digitalnom voltmetru s pretvorbom napona u vrijeme, prikazanog slikom, kao generator pilastog napona koristi se Millerov integrator vremenske konstante  $10\text{ms}$ . Na ulaz Millerovog integratora spojen je napon  $10\text{V}$ . Izlaznom naponu Millerovog integratora pribrojen je istosmjerni napon  $10\text{V}$ , tako da je hod napona koji se dovodi na komparator od  $10\text{V}$  do  $0\text{V}$ . Vrijeme povrata pilastog napona je  $20\mu\text{s}$ . Na ulaz digitalnog voltmetra spojen je napon  $4.7\text{V}$ .

- a.) Izračunajte vrijeme trajanja impulsa na izlazu bistabila,  $t_x = ?$   
 b.) broj izbrojenih impulsa uz frekvenciju  $f_0$  osnovnog taka  $10\text{kHz}$ ,  $N = ?$   $f_0 = 10\text{kHz}$   
 c.) te najveću brzinu ponavljanja mjerena ovim voltmetrom, uz pretpostavku da je na ulaz priključen maksimalni dozvoljeni napon (maksimalna dinamika).

$$\begin{aligned} \tau &= 10\text{ms} \\ U_{ul} &= 10\text{V} \\ U_{ul} - U_x &= 10\text{V} \\ 10\text{V} - 4.7\text{V} &= 5.3\text{V} \\ 20\mu\text{s} &= 20\text{ms} \\ U_{ul} - U_x &= 5.3\text{V} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \tau &= RC = 10\text{ms} \\ t_p &= 20\mu\text{s} \\ U_{ul} &= 4.7\text{V} \\ f_0 &= 10\text{kHz} \end{aligned}$$



Rješenje:

a)

$$U_{ul} = 10 - \frac{I \cdot t}{C} = 10 - \frac{10 \cdot t}{RC} = 10 \left( 1 - \frac{t}{\tau} \right)$$

za  $t = \tau \Rightarrow U_{ul} = 0$

$$\frac{t_x}{\tau} = \frac{4.7}{10} \Rightarrow$$

$$t_x = 4.7 \text{ ms}$$

$$\text{a) } t_x = ? \quad \frac{U_{ul}}{t_x} = \frac{U_{ul} - U_{x_{max}}}{\tau} \Rightarrow \frac{4.7}{t_x} = \frac{5.3}{0.01} \Rightarrow t_x = 4.7 \text{ ms}$$

$$\text{b) } N = t_x \cdot f_0 = 47$$

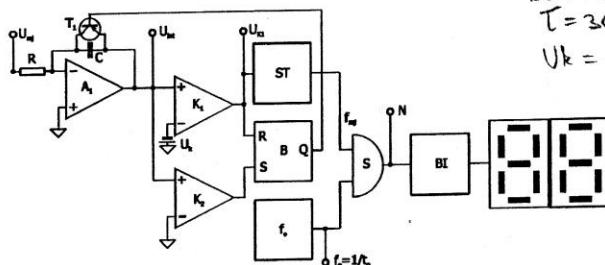
$$\text{b) } N = t_x \cdot f_0 = \frac{t_x}{T_0} = 4.7 \cdot 10^2 \cdot 10^4 = 47,$$

$$\text{c) } n = \frac{1}{t_m + t_p} = 99.8 \text{ mj./s}$$

$$\text{c) } N = \frac{1 \text{ mjeranje}}{\tau + t_p} = \frac{1 \text{ mjeranje}}{10\mu\text{s} + 20\mu\text{s}} = \frac{1 \text{ mjeranje}}{30\mu\text{s}} = 33.3 \text{ mjeranja}$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

4. Digitalnim voltmetrom s pretvorbom napon u frekvenciju, prikazan slikom, mjeri se istosmjerni napon 2,8V. Millerov integrator ima ulazni otpor  $22\text{k}\Omega$  i vremensku konstantu  $300\mu\text{s}$ . Napon komparacije  $U_k = -3\text{V}$ , a za izbijanje kondenzatora se koristi tranzistorska sklopka zanemarivog otpora u vođenju.
- Izračunajte trajanje nabijanja kondenzatora u Millerovom integratoru.  $t = ?$
  - Izračunajte broj impulsa koje brojilo izbroji u toku jednog mjernog ciklusa koji traje  $250\text{ms}$ .  $T = 250\text{ ms}$ ,  $N = ?$
  - Kolika je pogreška mjerena, ako je otpor tranzistorske sklopke u vođenju  $35\Omega$ ?



$$U_{ul} = 2.8\text{ V}$$

$$R_{ul} = 22\text{k}\Omega$$

$$T = 300\mu\text{s}$$

$$U_k = -3\text{ V}$$

$$U_{ul} = 2.8\text{ V}$$

$$R_{ul} = 22\text{k}\Omega$$

$$\tau = 300\mu\text{s}$$

$$U_k = -3\text{ V}$$

$$t_p = 0$$

$$T_o = 250\text{ ms}$$

a)

$$U_{izl} = U_{izl} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{ul} \cdot dt = -\frac{1}{RC} \cdot U_{ul} \cdot t$$

$$-3\text{ V} = \frac{-1}{300 \cdot 10^{-6}} \cdot 2.8 \cdot t$$

$$t = 321.429\mu\text{s}$$

Rješenje:

$$a) U_{izl} = -\frac{t}{RC} U_{ul}$$

$$U_{izl} = U_k \Rightarrow t = -\frac{U_k}{U_{ul}} \cdot \tau$$

$$t = 321.429\mu\text{s}$$

b)

$$N = f_{mu} \cdot T_o = \frac{1}{f_{mu}} \cdot T_o = \frac{250\text{ ms}}{321.429\mu\text{s}} = 777$$

$$b) N = \text{int}\left(\frac{T_o}{t}\right) = 777$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

c)  
konačna brzina porasta zbog otpora tr. sklopke

$$C = \frac{\tau}{R_{ul}}$$

$$\tau_2 = R_2 \cdot C$$

$$0 = -U_k - \frac{U_{ul}}{\tau_2} t_2 \Rightarrow t_2 = -\frac{U_k \cdot \tau_2}{U_{ul}}$$

$$N_{real} = \frac{T_{mj}}{t_x + t_2}$$

$$p = \frac{N_{real} - N_{ideal}}{N_{ideal}} \approx 0.16\%$$

$$\tau = \frac{1}{RC} \rightarrow C = \frac{1}{R \cdot \tau} = 0.15935 F$$

$$\bar{T}_{movi} = \frac{1}{(R + R_{sklopka}) \cdot C} = 299.523$$

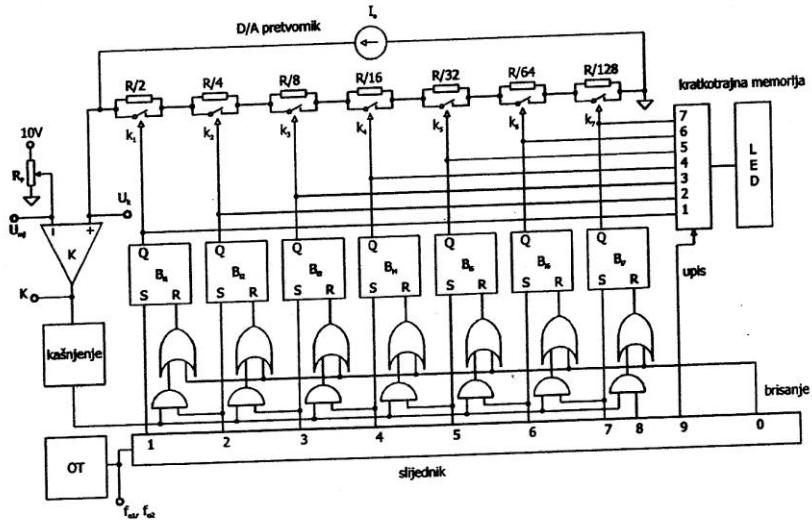
$$p = greska = \frac{\bar{T}_{stani}}{\bar{T}_{movi}} = \frac{300}{299.523} = 1.00159 \approx 0.16\%$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

5. Digitalni voltmeter sa sukcesivnom aproksimacijom ima mjereno područje 10V. U digitalno/analognom pretvorniku voltmetra koristi se težinska otpornička mreža od sedam otpornika i izvor konstantne struje 1mA.

- a.) Izračunajte vrijednosti otpornika za težinsku mrežu.  
 b.) Koji se digitalni podatak dobiva na izlazu digitalnog voltmetra ako je mjereni napon 7,2V?

$$U_X = 7.2 \text{ V}$$



$$U_0 = 10 \text{ V}$$

$$I_0 = 1 \text{ mA}$$

$$U_x = 7.2 \text{ V}$$

Rješenje:

a)  $U = I \cdot R = I \cdot (R_{1/2} + R_{1/4} + \dots + R_{1/128})$

$$U = I \cdot \left( \frac{64R + 32R + \dots + R}{128} \right) = I \cdot \frac{127R}{128}$$

$$R = \frac{U}{I} \cdot \frac{128}{127} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ mA}} \cdot \frac{128}{127} \approx 10099 \Omega$$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

a)

$$U_0 = I_0 \cdot R \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} + \frac{1}{128} \right)$$

$$R = \frac{U_0}{I_0 \cdot \frac{127}{128}}$$

$$R = 10079 \Omega$$

$$\boxed{\frac{R}{2} = 5039 \Omega}$$

$$\boxed{\frac{R}{4} = 2520 \Omega}$$

$$\boxed{\frac{R}{8} = 1260 \Omega}$$

$$\boxed{\frac{R}{16} = 629.9 \Omega}$$

$$\boxed{\frac{R}{32} = 315 \Omega}$$

$$\boxed{\frac{R}{64} = 157.5 \Omega}$$

$$\boxed{\frac{R}{128} = 78.74 \Omega}$$

b) 1011011 (7.16514 V)

$$b) U_X = 7.2 \text{ V}$$

$$U_{\text{ref}} = 10 \text{ V}$$

$$U_{k1} = \frac{U_{\text{ref}} \cdot 1}{2} = 5 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \geq U_{k1} = 5 \Rightarrow a_0 = 1$$

$$U_{k2} = \frac{U_{\text{ref}} \cdot 3}{4} = 7.5 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \leq U_{k2} = 7.5 \Rightarrow a_1 = 0$$

$$U_{k3} = \frac{U_{\text{ref}} \cdot 5}{8} = 6.25 \text{ V} \quad U_X = 7.2 \geq U_{k3} = 6.25 \text{ V} \Rightarrow a_2 = 1$$

$$U_{k4} = \frac{U_{\text{ref}} \cdot 9}{16} = 6.875 \text{ V}, \quad U_X = 7.2 \geq U_{k4} = 6.875 \text{ V} \Rightarrow a_3 = 1$$

$$U_{k5} = \frac{U_{\text{ref}} \cdot 23}{32} = 7.1875 \text{ V}, \quad U_X = 7.2 \geq U_{k5} = 7.1875 \Rightarrow a_4 = 1$$

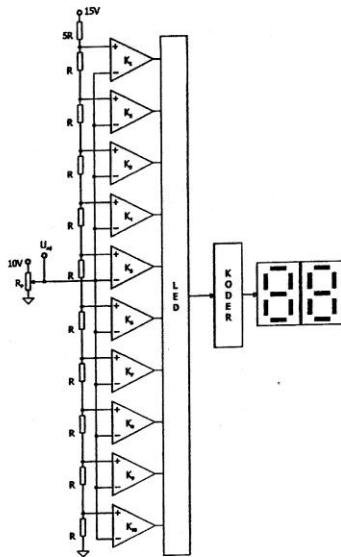
$$U_{k6} = \frac{U_{\text{ref}} \cdot 47}{64} = 7.34375 \text{ V}, \quad U_X = 7.2 \geq U_{k6} = 7.34375 \text{ V} \Rightarrow a_5 = 1$$

$$U_{k7} = \frac{U_{\text{ref}} \cdot 93}{128} = 7.7656 \text{ V}, \quad U_X = 7.2 \geq U_{k7} = 7.7656 \text{ V} \Rightarrow a_6 = 0$$

$$(1011011) = 7.16514 \text{ V}$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

6. Odredite broj komparatora potreban da se paralelnim analogno / digitalnim pretvornikom izvede 8-bitno razlučivanje. Ako je precizno otporničko dijelilo spojeno između napona  $10V$  i  $0V$ , odredite u kojim će stanjima biti izlazi komparatora kada se na ulaz priključi napon  $3.8V$ .



$$M = 8$$

$$U_0 = 10V$$

$$U_{ul} = 3.8V$$

Rješenje:  
 $n = 2^8 - 1 = 255 \Rightarrow 1$  za preljev  $\rightarrow 256$

$$N = \text{int}\left(\frac{\frac{U_{mj}}{U_0}}{n+1}\right) = \text{int}\left(\frac{256 \cdot 3.8V}{10}\right) = 97 \text{ u stanju "1"} \\ N = 97 \text{ (za } 3.8 V)$$

$2^M - 1 = 255$

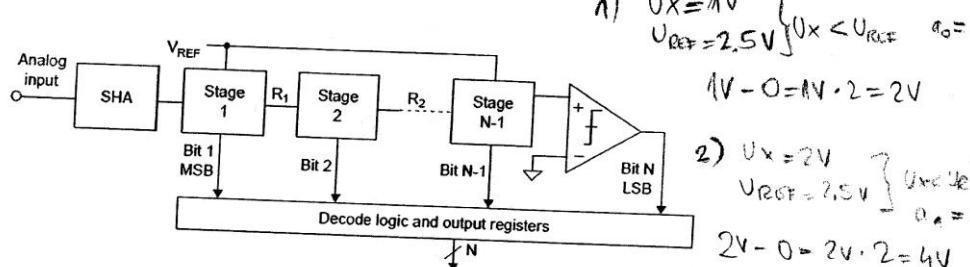
Broj komparatora potreban za 8-bitno razlučivanje  
 $N = \frac{U_{ul}}{U_0} \cdot (2^M - 1) \approx 97$

Zavod za električne sustave i obradbu signala

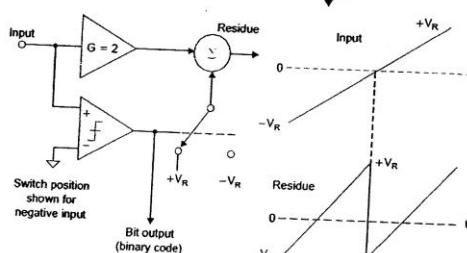
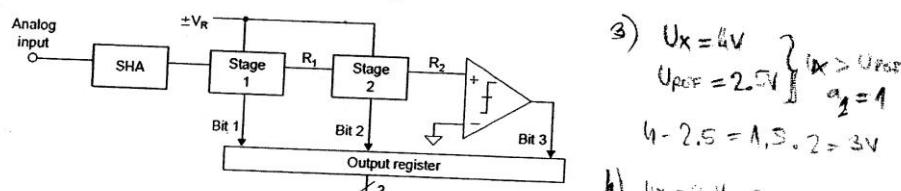
7. Analogno digitalni pretvornik sa slijednim ~~oduzimanjem~~ (ripple through ADC) karakterizira amplitudna razlučivosti 12 bita i brzine uzorkovanja 20 MS/s.

- a.) Koliko je minimalno komparatora potrebno za realizaciju ovog pretvornika? (12 komparatora)
- b.) Ako referentni napon pretvornika iznos  $U_{REF} = 2.5 \text{ V}$  i ako je na ulazu pretvornika doveden napon  $U_{ul} = 1.00 \text{ V}$ , koja se vrijednost može očitati na izlazu 1-bitnih stupnjeva od najznačajnijeg prema najmanje značajnom bitu?

Uputa:



$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0 \\ \alpha_1 &= 0 \\ \alpha_2 &= 1 \\ \alpha_3 &= 1 \\ \alpha_4 &= 0 \\ \alpha_5 &= 0 \\ \alpha_6 &= 1 \\ \alpha_7 &= 1 \\ \alpha_8 &= 0 \\ \alpha_9 &= 0 \\ \alpha_{10} &= 1 \\ \alpha_{11} &= 1 \end{aligned}$$



$$3) UX = 4V \quad \left\{ \begin{array}{l} UX > U_{REF} \\ U_{REF} = 2.5V \end{array} \right. \quad \alpha_2 = 1$$

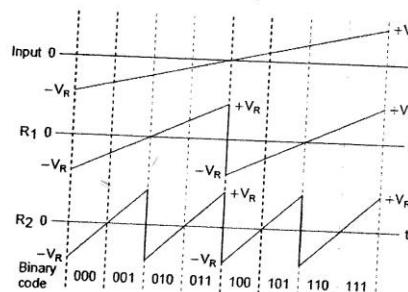
$$4 - 2.5 = 1.5 \cdot 2 = 3V$$

$$4) UX = 3V \quad \left\{ \begin{array}{l} UX > U_{REF} \\ U_{REF} = 2.5V \end{array} \right. \quad \alpha_3 = 1$$

$$3V - 2.5V = 0.5V \cdot 2 = 1V$$

$$5) UX = 1V \quad \left\{ \begin{array}{l} UX < U_{REF} \\ U_{REF} = 2.5V \end{array} \right. \quad \alpha_4 = 0$$

$$1V - 0 = 1V \cdot 2 = 2V$$



$$6.) UX = 2V \quad \left\{ \begin{array}{l} UX < U_{REF} \\ U_{REF} = 2.5V \end{array} \right. \quad \alpha_5 = 0$$

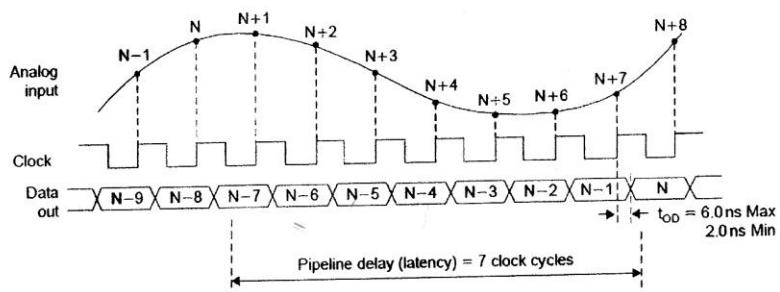
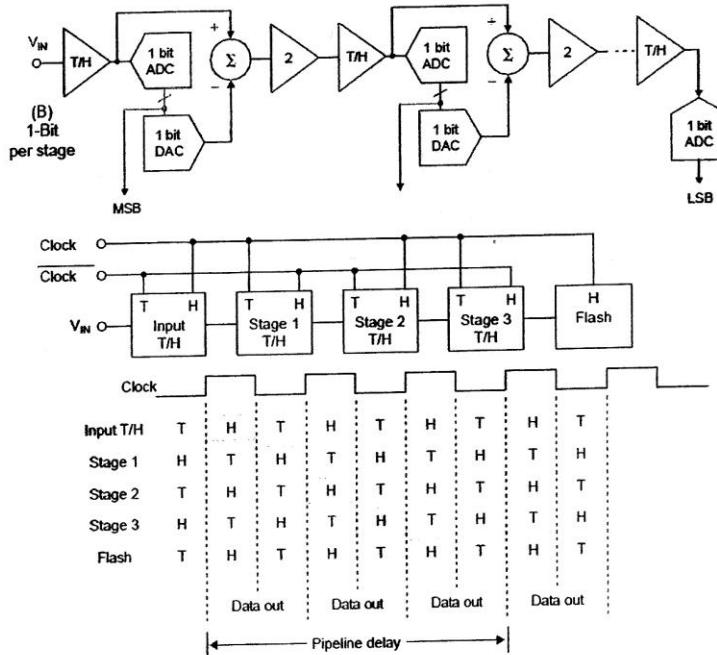
$$2V - 0 = 2V$$

$$2V \cdot 2 = 4V$$

8. Posmačni analogno digitalni pretvornik (*pipelined ADC*) karakterizira 12-bitna amplitudna razlučivost i brzina uzorkovanja 65 MS/s. Ulazna dinamika pretvornika iznosi  $1 V_{pp}$ . Kašnjenje posmačnih stupnjeva analogno digitalnog pretvornika iznosi 7 perioda takta.

Odrediti stanja 1-bitnih stupnjeva u trenutku  $t_1 = 1\text{ s}$  i  $t_2 = 2\text{ s}$ , od najznačajnijeg prema najmanje značajnom bitu ovog ADP ako je na ulaz doveden izmjenični napon amplitude 1.00 V i frekvencije 1 MHz.

Uputa:



9.  $\Sigma\Delta$  analogno digitalni pretvornik razlučivosti 12 bita koristi se za pretipkavanje audio signala gornje granične frekvencije 44.1 kHz.  
Kolika je potrebna frekvencija pretipkavanja kako bi se postigla 16 bitna razlučivost?

Rješenje:

$$kf_s = 11.29 \text{ MHz}$$

$$M = 12$$

$$M = 16$$

- Udvostručuje frekvencije stiptaranja povećat će razlučivost za 0.5 bita
- mi trebamo povećati razlučivost za 4 bita  
tako trebamo povećati frekv. stiptaranja  
 $2^4 = 256$  puta!

$$44.1 \text{ kHz} \cdot 256 = 11.289.6 \text{ kHz} = 11.2896 \text{ MHz} \approx 11.29 \text{ MHz}$$

Zavod za elektroničke sustave i obradbu signala

10. Analogno digitalni pretvornik razlučivosti 8 bita koristi se za pretvorbu signala gornje granične frekvencije 100 kHz metodom pretipkavanja kako bi se povećala razlučivost na 12 bita.

- a.) Kolika frekvencija uzorkovanja je potrebna, ako bi se signal otipkao običnim ADP 8-bitne razlučivosti, izravno metodom pretipkavanja?  
b.) Kolika frekvencija uzorkovanja je potrebna ako se ADP iz a) dijela zadatka smjesti u  $\Sigma - \Delta$  pretvornik?

Rješenje:

a)  $kf_s = 51.2 \text{ MHz}$

(uputa: udvostručenje frekvencije pretipkavanja poboljšat će razlučivost za 0.5 bita)

b)  $kf_s = 1.888 \text{ MHz}$

(uputa: maksimalni omjer signal-šum za obični ADP iznosi  $SNR_{\max} = 6.02 \cdot n + 1.76 \text{ dB}$ , a isti omjer za  $\Sigma - \Delta$  pretvornik iznosi  $SNR_{\max} = 6.02 \cdot (n + 1.5 \cdot m) - 3.41 \text{ dB}$  što ukazuje da svako udvostručenje frekvencije pretipkavanja poboljšava odnos za 1.5 bita)

a) -treba poboljšati razlučivost za 4 bita  $\Rightarrow$  frekvenciju  
treba povećati  $2^8 = 256$  puta

$$f_s \geq 2^8 f_g = 200 \text{ kHz} \quad 200 \text{ kHz} \cdot 256 = \underline{\underline{51.2 \text{ MHz}}}$$

b)  
za običan ADP  $\rightarrow SNR_{\max} = 6.02 \cdot \cancel{n} + 1.76 \text{ dB} = \underline{\underline{6.02 \cdot 12 + 1.76}}$

za  $\Sigma - \Delta$  pretvornik  $\rightarrow SNR_{\max} = 6.02 \cdot (\cancel{n} + 1.5 \cdot m) - 3.41 = 6.02 \cdot (8 + 1.5m) - 3.41$

$$6.02 \cdot 12 + 1.76 = 6.02 (8 + 1.5m) - 3.41$$

$$3.02m = 29.25 \quad \rightarrow m = \underline{\underline{3.2392}}$$

$$f_s = 2^m = 2^{3.2392} = \underline{\underline{9.4427}}$$

$$f_s \cdot f_g = 9.4427 \cdot 200 \text{ kHz} = \underline{\underline{1.888 \text{ MHz}}}$$