

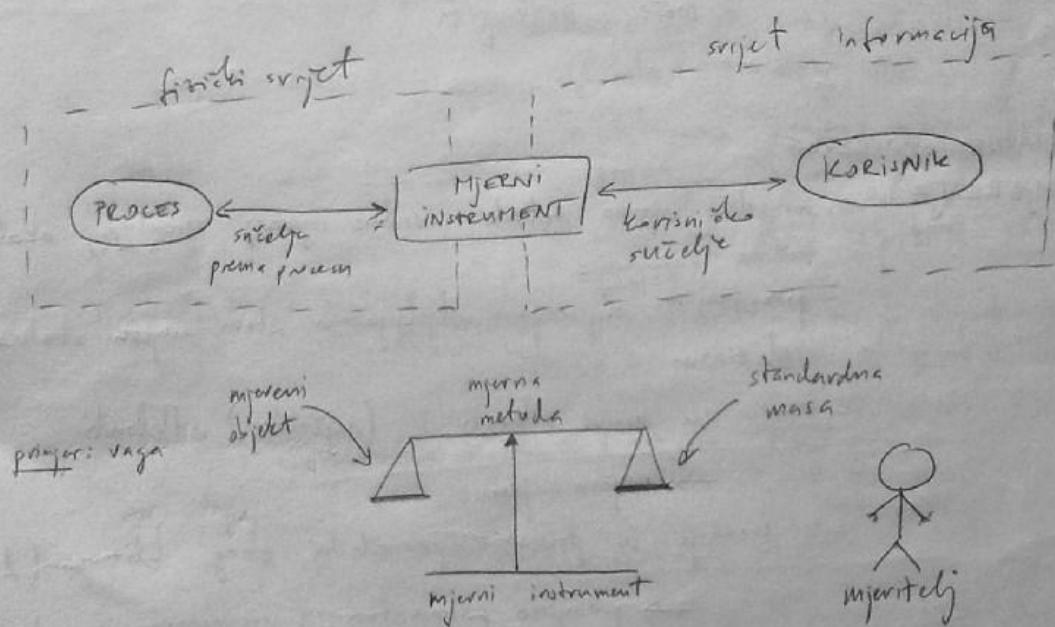
PAA - Uvod u elektroničku instrumentaciju

• mjerjenje u EIT

- E → osnovni fenomeni
 - razumijevanje fizikalne stike i interakcije s procesima i sustavima
- IT - računski, rač.-mrežni i kom. sustavi
 - tehnologije za osjet, obradku, prijenos, pohranu i prikaz informacija

• mjerjenje → osnova interakcije čovjeka : fizički snijet, mjeriti - primijeniti inf.

mjeriti = usporediti mjerenu veličinu s poznatom (referentnom) vrijednošću
→ pritom je osn. zahtjev ne smetati proces u kojem se vrši mjerjenje
→ usporodben provodimo prema mjeriši metodi (postupka/tehnici) mjernim instrumentom (uređajem/sustavom)



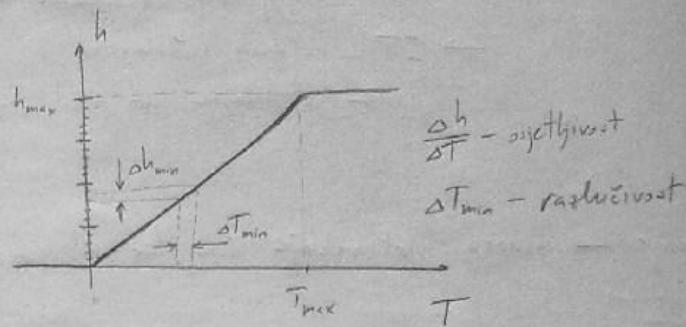
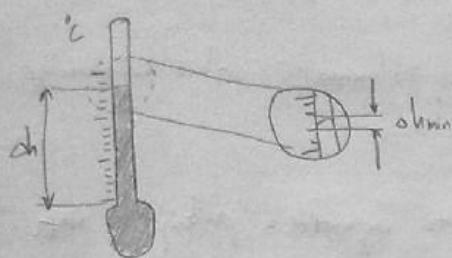
↳ indirektno mjerjenje (masa preko pomaka)

↳ usporodjuju se standardna masa i mjerena masa (metoda)

- netra ograničenja:
 - ograničenje višestolasti mjerjenja (potrebno mijenjati te smirivanje → konzistentne vrijeme odziva)
 - ograničenje merno područje (ne možemo razbiti pretrede strani)
 - ograničenje mjerjenje vrlo mali masi (zbog postojanje sluz. fluktuacija → sum, bez obzira na kvalitetu mrade)

Temeljni pojmovi

- osjetljivost \rightarrow omjer izlazne veličine i mjerene veličine (sensitivity)
- razlučivost \rightarrow najmanja promjena mjerene veličine koja se detektira na izlazu (resolution)



- u stvarnim fizikalnim procesima \rightarrow efekti koji ograničavaju količinu inf. koja se može prikupiti

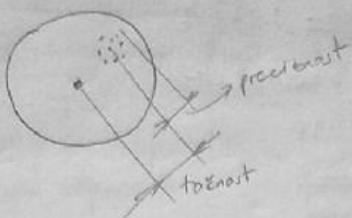
1° SUSTAVNE POGREŠKE

- MJERENJA \rightarrow
- postojice mjerne metode, uređajevi mjeruju, okoline i načina rukovanja
 - ponavljajući mjerenu djeluju u istom smjeru stalnom veličinom
 - utroci se mogu otkriti : (najčešće) otkloniti \rightarrow umjeravanjem
 - umjeravanje se ponavlja periodički zbog klinanja (drift)
 - \rightarrow promjene parametara s vremenom i drugim veličinama

2° SLUČAJNE POGREŠKE

- MJERENJA \rightarrow
- postojice slučajnih pojava (sluč. smetnje, čum)
 - ponavljajući mjerenu slučajno se rasipaju
 - otklanjanje \rightarrow usrednjavanjem rezultata većeg broja mjerjenja (sto usporava mjeranje)
 - one pogreške se ispituju nakon otklanjanja potnatih sustavnih pogrešaka, mjereni uređaj treba visoku razlučivost

- točnost (accuracy) - koliko je izmerna vrijednost u odnosu do definirane vrijednosti
- preciznost (precision) - objektivnost mernog sustava na slatine utjecajne veličine



- po definiciji, stvarna vrijednost mjerene veličine nije poznata, nego se u rezultatu mjerjenja iskazuje izmjerena vrijednost dobivena nakon otklanjanja poznatih sustavnih pogrešaka, te merna nesigurnost (sadrži neotklanjene sustavne pogreške i slučajne pogreške)

primjer sustavne pogreške: → definirana točna vrijednost otpornika 100Ω
 → digitalni multimeter pokazuje 109.3Ω
 → sustavna greška → kabel između multimetra i
 otpornika ima otpor 10Ω

↳ uklanjamo promjenom mernog postava ih metale, te
 korekcijom mjerjenja, pa je

$$R = R_m - R_k = 109.3\Omega - 10.0\Omega = 99.3\Omega$$

preciznost i iskazivanje rezultata: → multimeter pokazuje vrijednosti između 109.27Ω :
 $109.33\Omega \rightarrow$ različitost 0.01Ω

$$\text{stodjna vrijednost: } \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i R_i}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

std. devijacija:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n N_i (R_i - \bar{R})^2}$$

• interval pouzdanosti - interval unutar kojeg s nekim razinom pouzdanosti (vjerojatnošću) možemo očekivati izmjerenu vrijednost

- to je norm. razdoblje:

$$\pm \sigma_R \rightarrow 68.3\%$$

$$\pm 2\sigma_R \rightarrow 95\%$$

$$\pm 3\sigma_R \rightarrow 99.7\%$$

→ merni rezultat uvek izračunamo koristeći interval pouzdanosti i njegovu pridruženu vjerovatnošću pouzdanosti

primer - mjerak preciznost

pouzdanost	rezultat	
68.3%	$(99.3 \pm 0.01) \Omega$	
95%	$(99.3 \pm 0.02) \Omega$	
99.7%	$(99.3 \pm 0.03) \Omega$	

→ precizne su samo prve 3
znamenke (ostale znamenke)

- multimeter pokazuje $99.3 \Omega \rightarrow R$

- prema specifikacijama pouzdanost je

opis	realnost	točnost
200Ω	0.1Ω	$\pm (0.8\% + 3 \text{ digit})$

$$\downarrow \quad \quad \quad \downarrow \quad \quad \quad \rightarrow y$$

- točnost definisana kao interval oko mjerene (izmjerene) vrijednosti a kojem moramo ukloniti točnu vrijednost mjerene veličine s potpisom vrijednosti

- interval pouzdanosti a : ($x\%$ očitane vrijednosti + y najmanje značajnih znamenki)

$$a = \frac{x}{100} \cdot R + y \cdot r = \frac{0.8}{100} \cdot 99.3 \Omega + 3 \cdot 0.1 \Omega = 1.1 \Omega$$

- stvarna vrijednost otpornika \rightarrow mjerar $(99.3 \pm 1.1) \Omega$

\rightarrow interval $\pm 1.1 \Omega$ određuje mjeru rezervnost, a uključuju nepoznate sustavne pogreške i slučajne pogreške

- relativna pogreška mjeranja

$$p = \frac{\text{izmjerena vrijednost} - \text{stvarna vrijednost}}{\text{stvarna vrijednost}} =$$

$$= \frac{99.3 \Omega - 100 \Omega}{100 \Omega} = -0.7\%$$

• stogačna mjerena nesigurnost - primjer

- mjeruje snage na otporniku - mjeri se struja + pad napona

1' način \rightarrow struja mjerena jednim, a napon drugim multimetrom
2' način \rightarrow obje veličine mjerene istim uređajem

$$\text{nesigurnost mjerjenja struje } 0.01A = \delta I$$

$$\text{nesigurnost mjerjenja napona } 0.2V = \delta U$$

$$\text{pad napona na otporniku } 100.0V = U$$

$$\text{struja kroz otpornik } 2.00A = I$$

\rightarrow koji način ima manju mjerenu nesigurnost?

• neizrazena mjerena veličina $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ koja je modelom vezana za veličine koje se mogu mjeriti

• mjerena nesigurnost neizrazena mjerene veličine

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) \sigma_i \sigma_j}$$

$$r(x_i, x_j) = \frac{\text{cov}(x_i, x_j)}{\sigma_i \cdot \sigma_j}$$

\hookrightarrow faktor korelacije između dve mjerene varijable
(tj. mjerene veličine)

1' upotreba oba multimetra \rightarrow potaknivanja nekorelirana $\rightarrow r=0$

$$\sigma_{P_2} = \sqrt{I^2 \sigma_U^2 + U^2 \sigma_I^2 + UI r_{U,I} \sigma_U \sigma_I} \approx 1.1W$$

2' upotreba jednog multimetra \rightarrow potaknivanja korelirana $\rightarrow r=1$

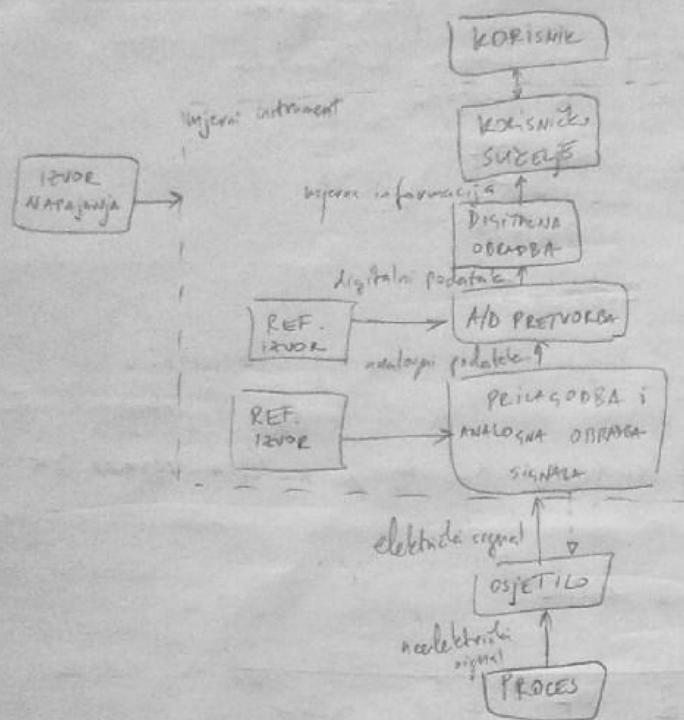
$$\sigma_{P_1} = 1.4W$$

$$\Rightarrow 1' P_{2,m} = (200.0 \pm 1.1)W$$

$$2' P_{1,m} = (200.0 \pm 1.4)W$$

\rightarrow u $RL=U$ je $r < 0,17$

PIB - ELEKTRONIČKI MIJERNI SUSTAVI

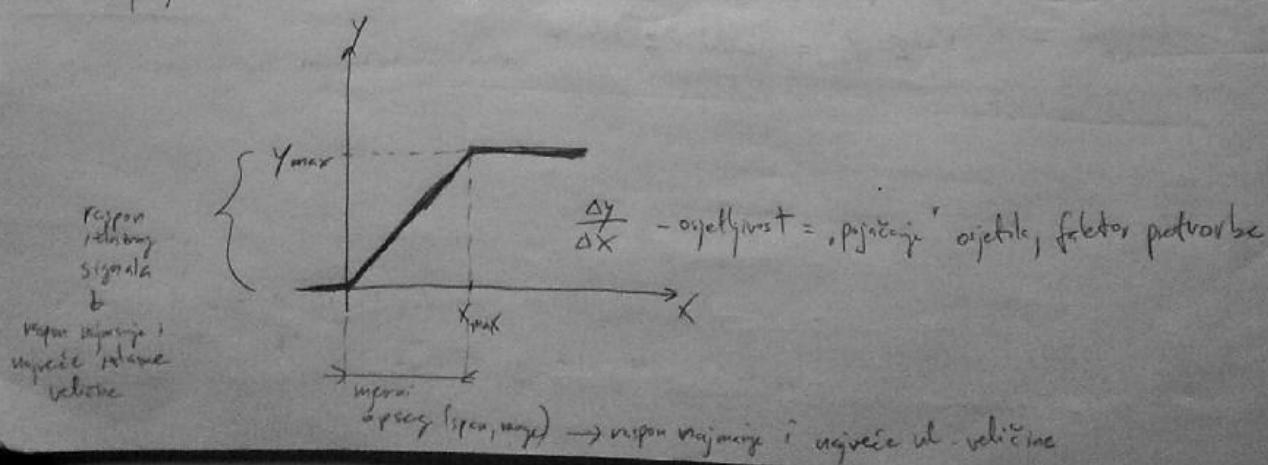


1 OSJETILA (senzor, mjeri pričvršćak, sensor, transducer)

- u kontaktu s mjeranim procesom
- konkretne signale osjetila određuju konkretni ciljovi sistema
- pretvarba energije u električnu u blizini
- PRIMJENJENA KARAKTERISTIKA - opisuje kako se ulazne/mjerene veličine pretvaraju u izlazni/električni signal



• primjenjena karakteristika



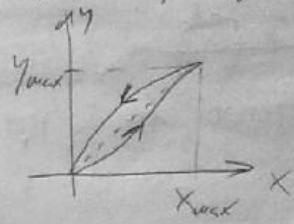
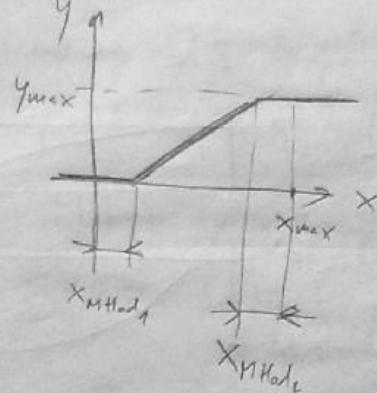
→ linearnost = oblik prijenosne karakteristike između ulazne i izlazne veličine

- veličinom potencijalno može se oblikujati signal \rightarrow potrebno je da je kompenzacije

→ nelinearnost = nejednina i nejednakost među ulazne i izlazne veličine te koja objektu deje konstan rezultat
 \rightarrow npr. objektu s mehaničkom pretvorbom (pomic, rotacija)

→ pouzdanje

→ histeriza = ovisi li izlaz u stazu stavlja o prethodnim ulaznim veličinama
upr. objektu s em pretvorbom uz koristeći ferromagnetski materijale



→ šum = izlomi signal posljedice slučajnih process

→ točnost = odstupanje izlazne veličine od točne (definirane)

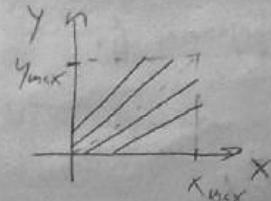
→ varijacijskost = nejednina primjena vrijedne veličine koja se može detektirati na izlazu

→ preciznost = koliko se vrijednosti rasipaju te ponovljeno upoređuju iste ulazne veličine

→ selektivnost = kolika je utjecaj drugih veličina na izlazni signal

- temperature

- primjer: MEMS za uparenje konca plina



→ stabilnost (stability) - kako se promjene mijenjaju u duljem vrem. nedobrij, dobiti

→ robustnost (survivability) - to definisane radne uvjeti

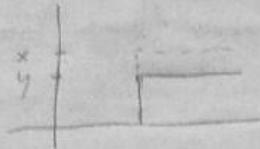
→ sigurnost (safety) - to okolina u kojoj radi (npr. medicinski sustavi, pacemaker, automobilski sustavi)

DINAMIČKE KARAKTERISTIKE

- odriv u ovisnosti o brzini primjene/frekvenciji vrijedne veličine
- potrebno ponavljati vrem. konst. odriv i moguće je pojaviti oscilacije
- kod osjetila, ovisi o fitokratnom principu rada i konstrukciji

0 sustav nultog reda

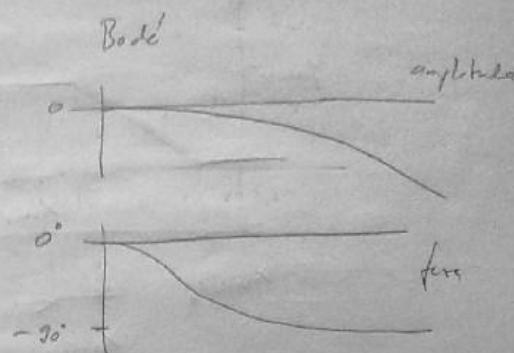
- pojednost. fja $H_0(s) = K$
- istovrem. veličine neponudaju objekti ulaznu
- n. dešći



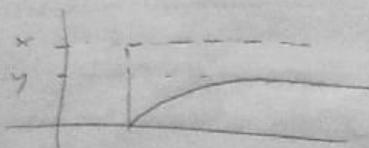
- neutralno u RL

1 sustav prvi reda

- pojednost. fja $H_1(s) = \frac{K}{1 + \frac{s}{\omega_n}}$



veličinu u skaku:

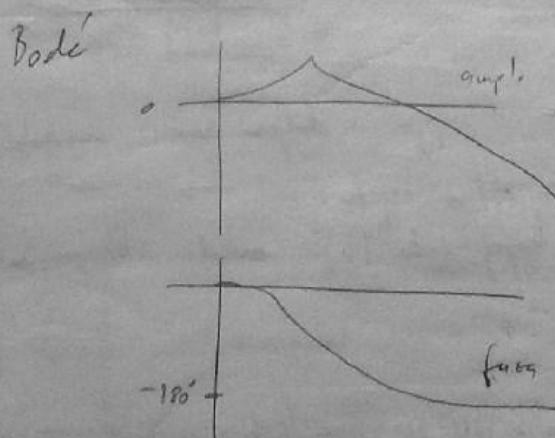


→ kategorije

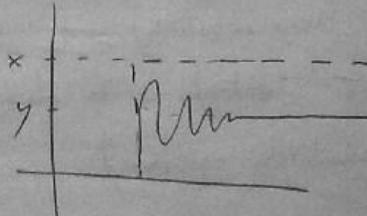
→ primjer: platinisti otvaranjem se mjereno temp. u
teh. meteljanju brzina

2 sustav drugog reda

- pojednost. fja $H_2(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + s \frac{\omega_n}{\alpha} + \omega_n^2}$



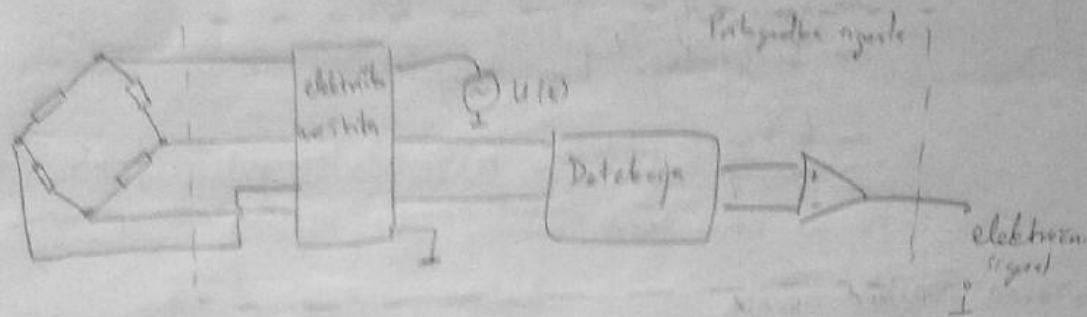
ns skaku:



- kategorije i oscilacije

- npr. inercijsko osjećilo za mjeranje ubrzanja (akcelerometer)

2. sklopovje za primjerice - detektore koji snimaju električnu signal u obliku signala

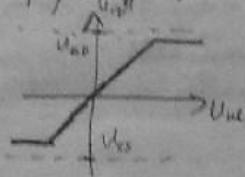


- FUNKCIJE:
- pojavljuje se ojetile (primjer spojaju otpornički trake u ujemu mreži)
 - periodično izmjenjuju se ojetile (primjer upisuje primjereno preodobrenih signala)
 - detektorske signale (primjer demodulacija signala smanjivajući učinkovitost ojetile)
 - električne vestile = neperiodično mijenjan, ali često ako ul. kruži može koristiti karakt. ojetile

3. sklopovje za ANALOGNU OBRAĐIBU SIGNALA

→ FUNKCIJE:

- * pojavljuje se signale
 - u praksi je signal s ojetile male energije: amplituda
 - npr. signal s otporničkom mrežom
- * linearizacija prijenosne karakteristike
 - primjer - lin. karakteristika NTC otpornika se mijenja s temp.
- * potiskivanje šuma i sunčeve
 - primjeri električnih filteri za oblikovanje spektra signala, sunčeve i slune
- * ako se koristi analogni mrez, usporedite s ref. vrijednostima
- tipične prijenosne karakterist. bloka za pojavljivanje signala (statisch) → pojavljuje se besrečenje

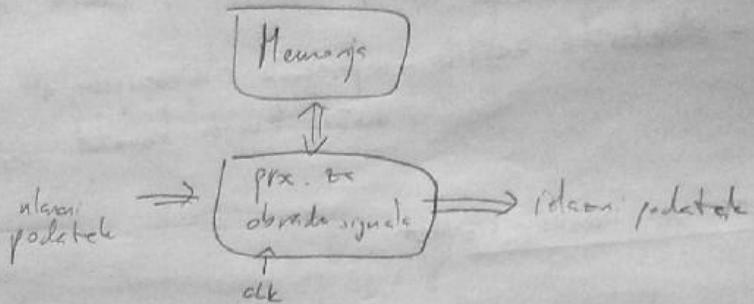


- analogne obradbe + jedinstvenost
 - pokazat mrez, taj. klisanje, sum, problem izvješća memorije, nestabilnost
- tipična su din. kar. f. 1.2 reda, vremena je linearni funkcionalni

4. A/D PRETVORBA = pretvorba analognog signala u digitalni oblik
- jednostavniji obradak
 - manje utjecaja šuma
 - kvalitetnije komunikacije
 - kontinuirani odabir : razlučivost, linearitet, dug kvalitet, visoku ref.
visokog, krozne ulaznog signala, nizko površnjaju s početkom

5. DIGITALNA ODRABA SIGNALA

- linearizacija, korakaj utjecajnih veličina, račun ujerenih veličina (mjeravajući)
- analize signala i ekstrakcija snosnji, sintetički signali, kompresija, upravljanje
- prednosti: programirljivost, promjenljivost, ponavljivost, stalnost parametara, manji dimenzije
i potrošnje, pouzdanost, pristupačnost



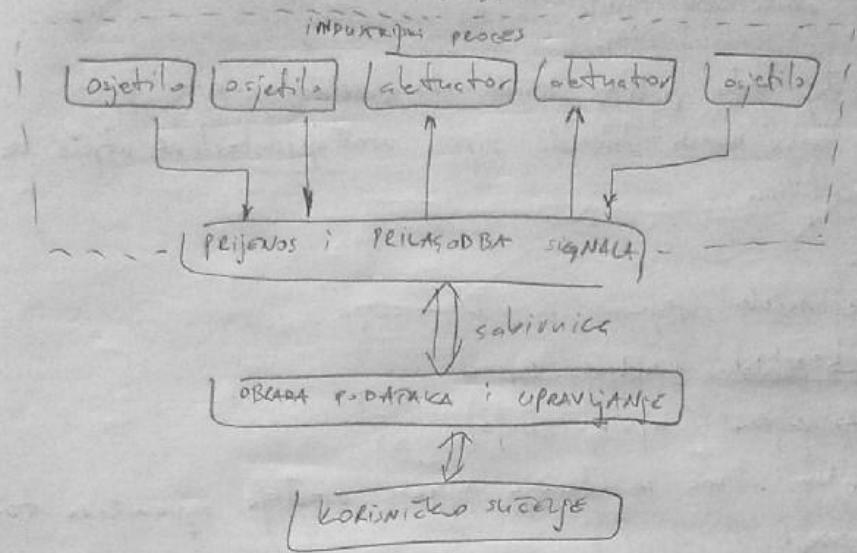
6. KORISNIČKA SUČAJA

- prikaz rez. mjerave (instrumenti: bazalikam, osciloskop, multimeter, numerički polječenje, rasterski)
- ispis rezultata mjerave (pisac)
- prikaz rezultata mjerave (magnetski i optički medij)

ELEKTRONIČKI MIJERNI UREDAJI

- samostalni uređaj
- kompaktan dizajn
- vrlo dobre mjerene

- INDUSTRIJSKI MJEKNI SUSTAV - primjenjuje se upravljanju industrijskim sustavima i procesima
- ugradjen u proces
 - distribuiran



P2 - UVOD U MJERENJE ELEKTRIČKIH VELIČINA

Mjeranje el. veličine: - pod tim nazivom podrazumijevamo mjeranje nepone istovje, te određivanje valnog oblike el. signala

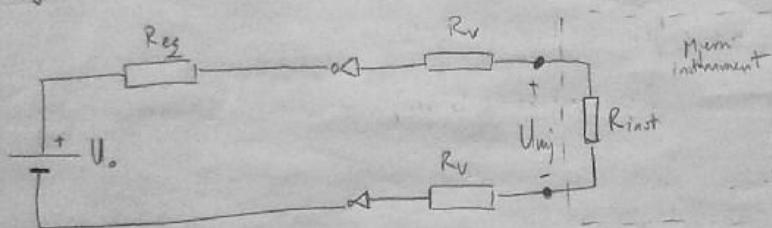
- mjeriti uređaj treba spojiti s izvorom el. signala
- mjeriti treba zavest tako da mjeriti uređaj (sustav) ne utječe na mjerenu veličinu

Spajanje mernog uređaja - u osnovi spajamo u 2 načina

- paralelno (mjeranje naponja)
- serijski (mjeranje struje)

- pritom ulazna impedancija mernog uređaja ograničava točnost mjerjenja

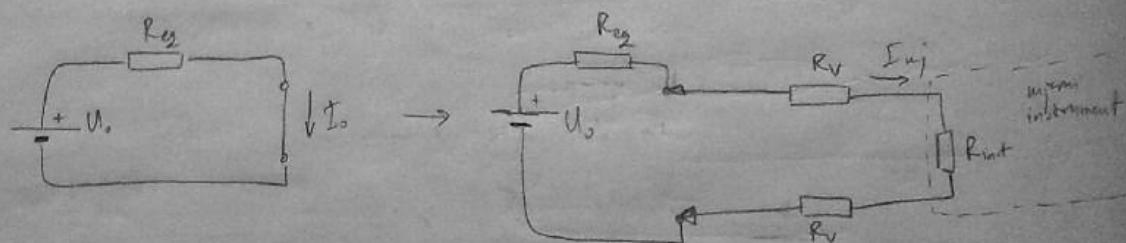
• Paralelni spoj



$$U_{mj} = U_o \cdot \frac{R_{inst}}{R_{gz} + R_{inst} + 2R_v} \rightarrow U_{mj} < U_o \rightarrow \text{sustavna pogreška}$$

- kod paralelnog spoja mernog instrumenta $R_{inst} \gg R_{gz}$, R_{inst} tipično $1-10 M\Omega$

• Serijski spoj



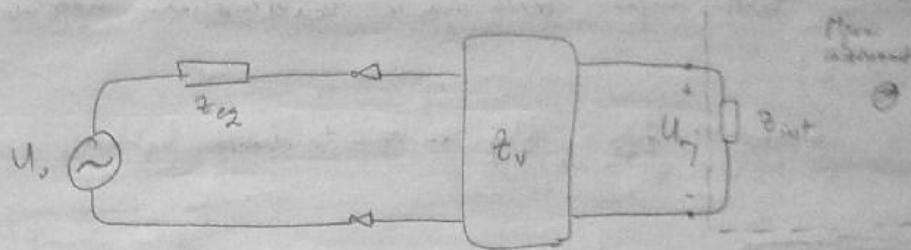
$$I_o = \frac{U_o}{R_{gz}}, \quad I_{mj} = \frac{U_o}{R_{gz} + R_{inst} + R_v} \rightarrow I_{mj} < I_o \rightarrow \text{sustavna pogreška}$$

$$R_v < R_{inst}$$

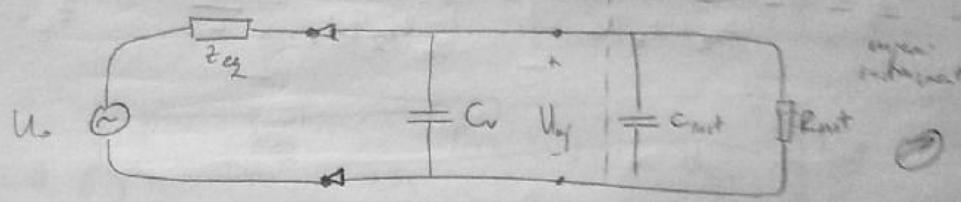
- kod serijskog spoja, $R_{inst} \ll R_{gz}$; R_{inst} ovisi o mernom području ($0.1 \Omega - 10 \Omega$)

Mnogi razpoloživi veličina

- * na visokim frekvencijama \rightarrow impedancija kabala tv. se množi konstantom C_V , dok je R_V zanemariv



\rightarrow učinkna impedancija instrumenta — paralelni spoj ulaznog kabl. i otpornika

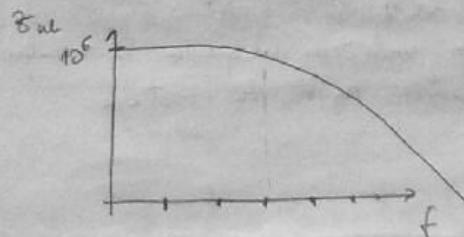


tipično: R_{int} reda $1 \text{ M}\Omega$

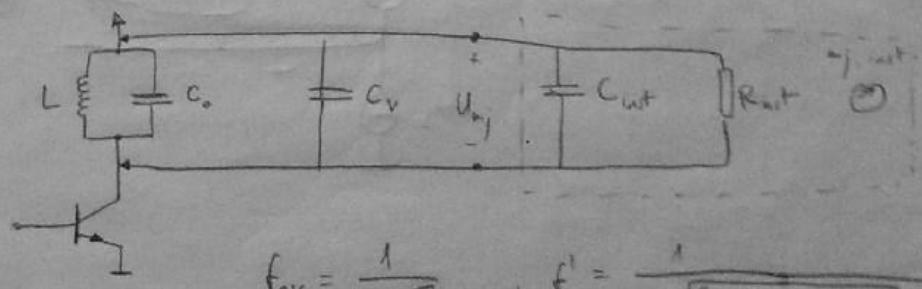
C_{int} reda 30 pF

$C_V \rightarrow$ za deklopljeni kabel 50 pF/m

\rightarrow za neoklopljeni kabel 5 pF/m



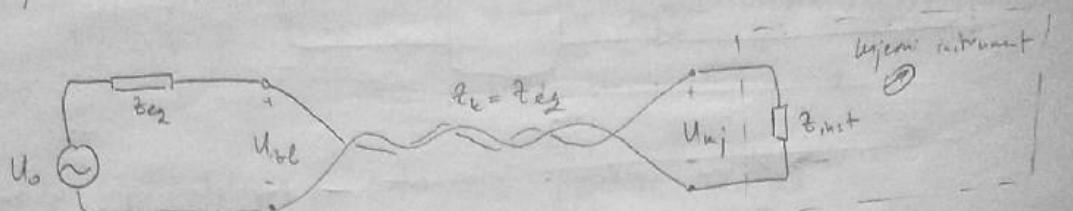
- * na visokim frekvencijama - frekvencije veće 10 MHz
 - u praksi uvećava se mogućnost utjecaja na apstraktnu veličinu
 - npr. $C = 100 \text{ pF}$ na 10 MHz ima $X_C = 16 \Omega$
 - te uverenje potrebne ekstreme sredine bez smjera utjecaja na impedanciju u ulaznoj frekvenci



$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad , \quad f' = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_0 + C_V + C_{int})L}}$$

- problem je i sumirajući valne duljine signala i duljine pretegnih volvora \rightarrow refleksija u liniji, stoga se val \rightarrow teži linije opisuje raspodjeljenim parametrima
- u praksi \rightarrow koristimo valove krene od $X/10$
- problem rješavamo zabilježivanjem izvora signala karakterističnom impedancijom kabla (75 ili 50 Ω)

- kod linije bez gubitaka Z_k : U_{nj} ne ovisi o duljini kabla



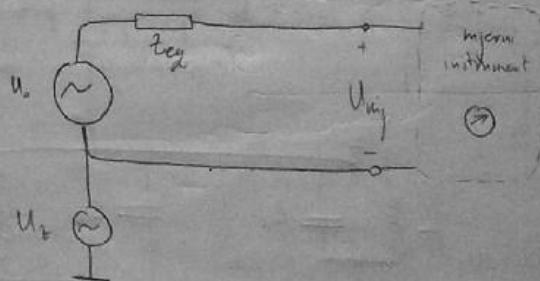
$$U_{nj} - U_o \frac{Z_k \| Z_{inst}}{Z_{eg} + Z_k \| Z_{inst}} \approx U_o \frac{Z_k}{Z_{eg} + Z_k} = \frac{U_o}{2} \quad Z_k = \sqrt{\frac{L_v}{C_v}}$$

Spajanje instrumenta i izvora signala \rightleftharpoons
 plivajući spoj
 simetrični spoj
 diferencijalni spoj

- potencijal mase = referentni potencijal elektroničkog uređaja
- uzemljenje = fiksno spajanje s metalnim vodičem uključenim u režinu \rightarrow težiti se pojave visokog napona dodira na kućištu uređaja

plivajući spoj

- obje ulatne stranice mjeriog instrumenta su na određenom potencijalu prema zajedničkom potencijalu okoline
- primjenjuju na niskim frekvencijama (gradski mreže)
- mjeri u rednjem nizu spoj na zajednički potencijal (upaja se u izolirani odvojenog transformatora)



realna struje: - napajanje U_0

- $U_H = \text{za jedinicu potencijal } (100V \rightarrow 1kV)$

- idealno, tko bi $U_{Hj} = U_0$

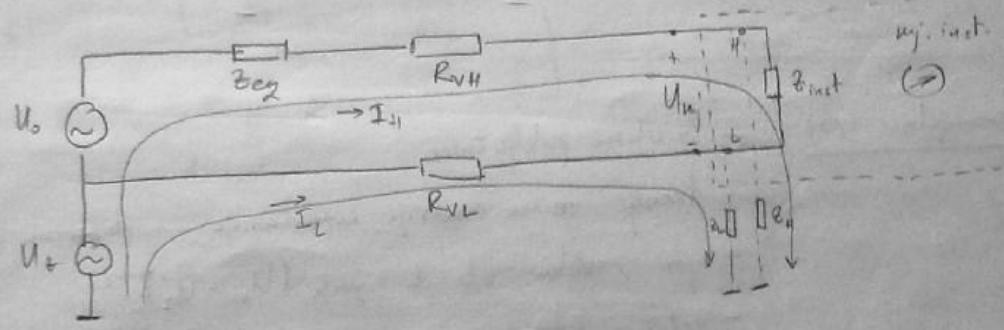
- realno:

$$U_{Hj} = H_{Hj0}(j\omega)U_0 + H_{HjT}(j\omega)U_T$$

- definisano faktor potiskivanja za jedinicu napona \rightarrow Common Mode Rejection Ratio

$$F = \left| \frac{H_{Hj0}(j\omega)}{H_{HjT}(j\omega)} \right|$$

\rightarrow čemu ovisi F?



$$\text{vrijedi } R_{Hj}, R_{Lj}, |Z_{Lj}| \ll |Z_{Hj}| \ll |Z_L|, |Z_H|$$

\rightarrow u savršenom skloju Z_L i $Z_H \rightarrow \infty$: za jedinicu napon ne utječe na ujednjenje

- zatravljaju struje kroz Z_L i Z_H (u većim nesimetričnostima impedancija u granama) stvara na celim instrumentu napon greške U_g

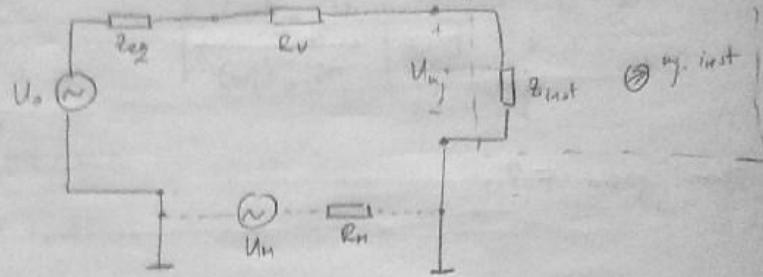
- zbog visokih iznosa $|Z_L|$ i $|Z_H|$ smanjuju se efekti na simetričnost ostalih kompo-

- F je tipično 80 - 120 dB i pada s frekvencijom (sustav prvi reda)

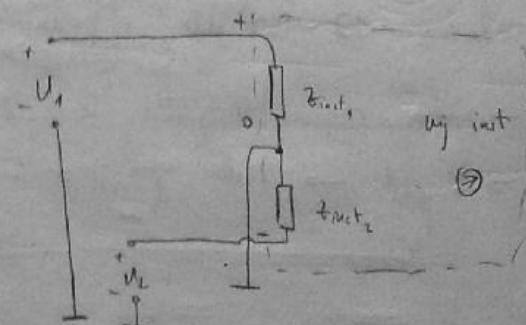
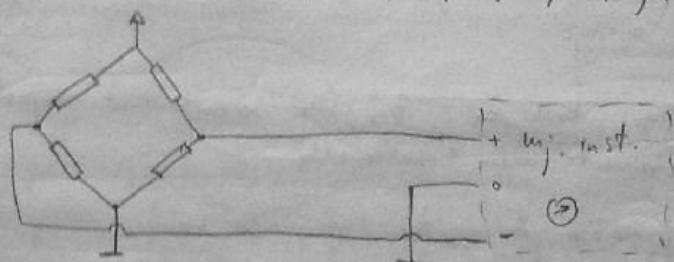
\rightarrow $U_g \propto F$ \rightarrow postoji resursi kapaciteta koji suvremeni Z_L , $Z_H \rightarrow I_L$, I_H su veće \rightarrow

\rightarrow F pada \rightarrow raste napon pogreške U_g

- asimetrični spoj
 - uspon se ugori prema zajedničkom potencijalu (masa uvećaja)
 - ↳ jedna priključnica uvećaja je spojena na masu
 - uvećaj se tako konstruiru (ugoraj se na gredice mreže)
 - definisana impedanca koja je ujerna karakteristika opterećenja
 - neće ugoriti izravno ujereni vanjski potencijali
 - postoji razlika potencijala između uvezivanja izvora signala i ujemnoj ujerenog instrumenta $\rightarrow U_m$ uspon pogreške u ujerenju



- diferencijalni spoj
 - 3 ulazne priključnice
 - temelji se na simetriji impedancija i diferencijalnom pojačalu
 - ujavi razlike ulaznih signala ($U_1 - U_2$)
 - Veličine ulaznih uspona su ograničene rezistorom instruments (njem. Impedanca dif. pojedinca)
 - ima manju ul. impedanciju od plivajućeg spoja



$$U_0 = U_1 - U_2$$

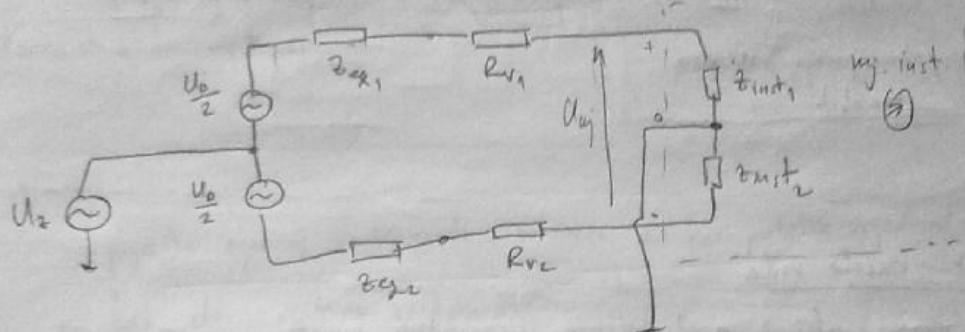
$$U_{\text{av}} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

idealno: $U_{\text{av}} = U_0$

realno: $U_{\text{av}} = H_{u_{\text{av}0}}(j\omega) U_0 + H_{u_{\text{av}2}}(j\omega) U_2$

$$F = \left| \frac{H_{u_{\text{av}0}}(j\omega)}{H_{u_{\text{av}2}}(j\omega)} \right|$$

CMRR — polaznje kvaliteta dif. spoja, tipično 80-100 dB, pada s frekvencijom
(sustav 1. reda, $f_0 \approx 1 \text{ kHz}$)



P4 - ELEKTRONIČKI MULTIMETAR

- višefunkcijski uređaj za mjeranje električnih veličina (U, I, R, f, \dots)
- najčešće konstruiran u m. protasi, različite kvalitete i mogućnosti (ručni, stolni, vrhunski)

analogni

- lakoje praćenje promjenjivih veličina i trendova
- pogodno mjerjenje, telekomunikacije, automobile

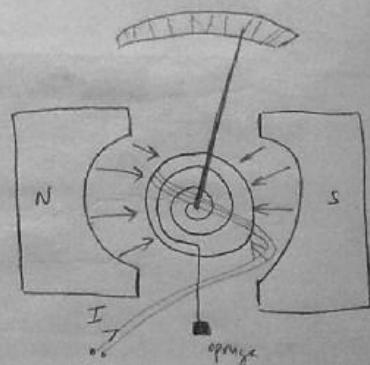
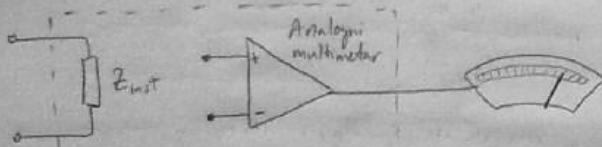
vs.

digitalni

- visoka točnost mjeranja i čitanja
- mogućnost na mali smjer

analogni prikaz - naciela reda

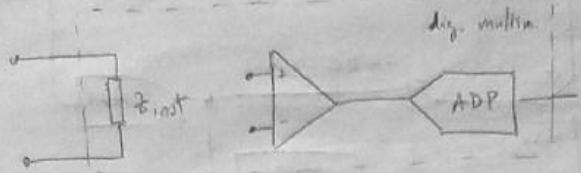
- prikaz mjerene veličine \rightarrow mehaničko gibanje permanentnog magnetsa i pomičnog svitka kroz koj prolazi istovremena struja i na koji je utvrđena katadijka
- struja kroz svitak je računarna mjerenoj veličini
- otokom katadijke je računjeran srednjoj vrijednosti struje svitka
- mehanički sustav drugog reda
- tipično: za puni otok (full scale deflection) potrebno 100 μA u svitku 100Ω



- pogreška analognih instrumenata tipično 1%
- razlučivost skale tipično 1:50, 1:100
- paralelno \rightarrow pogreška čitanja (realizirat položaj katadijke ovima o kutu gledanja) \Rightarrow ugraditi se ogledala na skali

• digitalni prikaz

- dig. instrumenti su u pravilu tačniji od analognih
- razlučivost prikaza tipično $1:1000, 1:10000 \rightarrow$ ne mora biti ukladljiva s tačnošću mernog instrumenta
- broj znamenki digitalnog voltmatra = maksimalan broj cifri koji se može prikazati
 \rightarrow prikaz s "polo" znamenkom = $1:b$ mesta



• preporuke za mjeranje:

- pogreške mernog instrumenta izražava se kao postotna vrijednost punih skala i/ili kao dio očitane vrijednosti
- treba odabrati odgovarajuće mjerne područje t.d. se mjerena veličina nalazi štu blizu punoj skali
- preporučljivo je mjeriti omjeru umjesto apsolutnih vrijednosti mjerene veličine

• značajke digitalnih multimetara

→ merno područje (tipično: $10\text{ pV} \rightarrow 1000\text{ V}, 10\text{nA} - 10\text{A}, 10\text{m}\Omega - 50\text{M}\Omega, 20\text{Hz} - 20\text{kHz}$)

→ frekvencijsko područje (tipično: AC napon do $\approx 100\text{Hz}$)

→ broj očitanja u sekundi (tipično: 2-3)

→ točnost (tipično: 0,1%)

→ broj znamenki (tipično: 3,5 - 4,5)

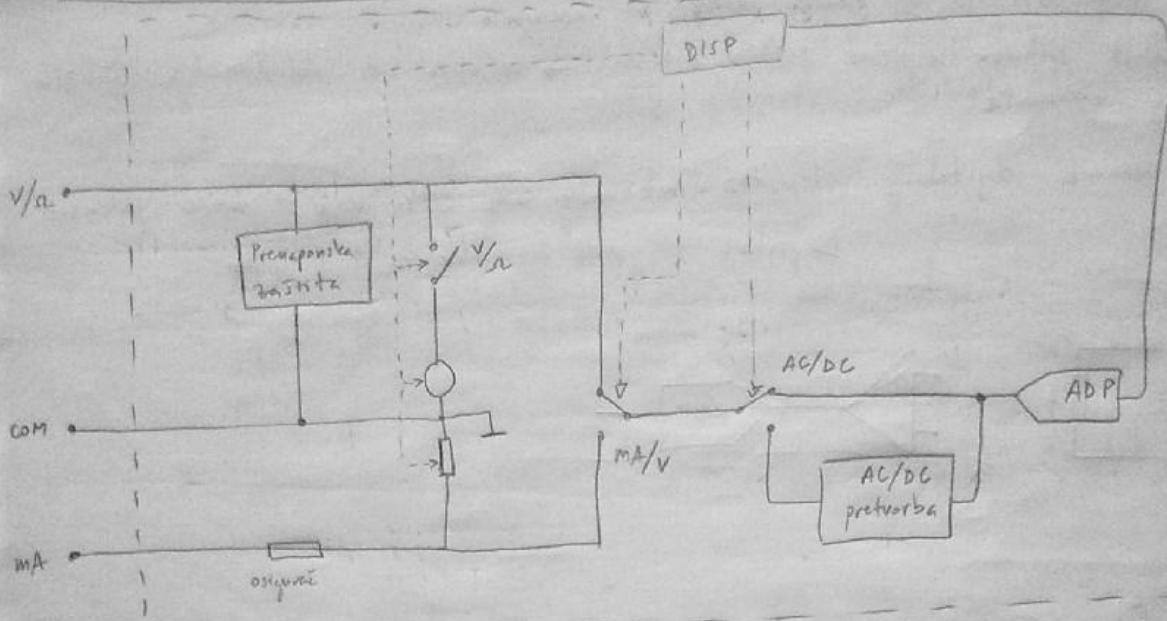
→ cijena

notice

1k 2

vastaju

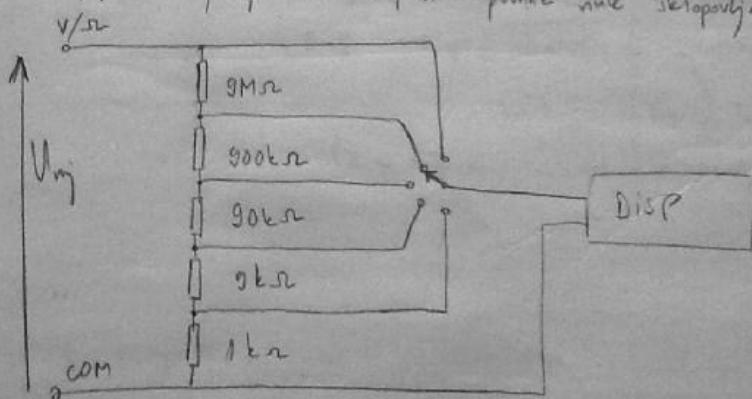
GRADA DIGITALNOG MULTIMETRA



- odabir mjerene veličine i mernog područja
- prilagođak, attenuacija ili pojačanje signala
- AC/DC pretvorba
- A/D pretvorba
- prikaz

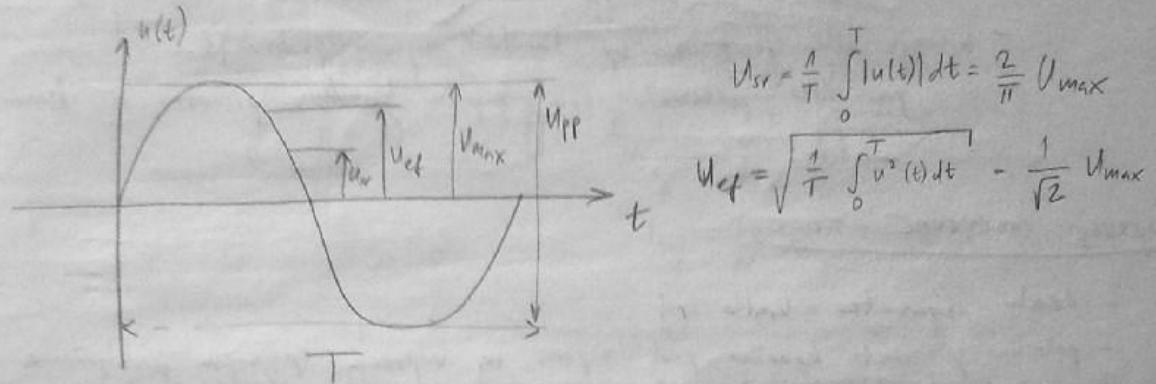
MJERENJE ISTOSMJERNOG NAPONA

- visoki ulazni otpor (tipično $10M\Omega$)
- prenje mernog područja - dovođenje napona u radni nizak A/D pretvornika
- precizno otporno objektivo
- izvor pogreške mjeranja DC napona - posnik male sklopovlja

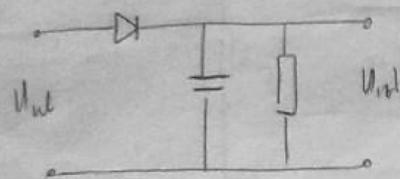


Mjerenje izmjenične napona

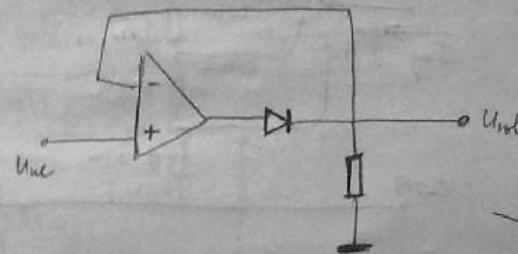
- alternacija i pojačanje - AC napon
- napon je potrebno pretvoriti u istosmjerni da bismo ga digitalizirati
- ispravljajući dijelimo prema odnosu na \rightarrow srednju (mean/avg value)
 \rightarrow vršnu (peak value)
 \rightarrow efektivnu vrijednost ($RMS = \sqrt{V_{avg}^2 + V_{peak}^2}$)
- detekcija i umjeravanje novi izmerni signal



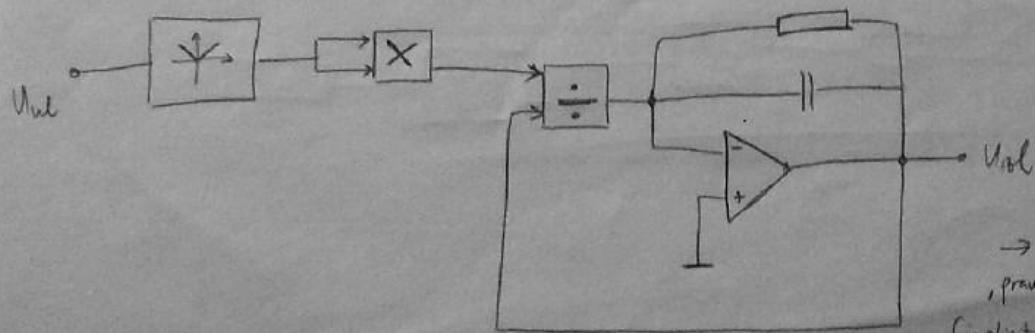
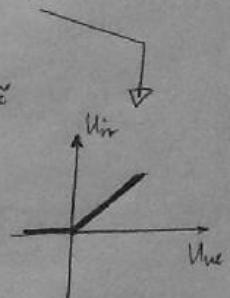
- ispravljanje: - koriste neelinearne elemente (diode) i pojačala
- napon kroz ispravljajuće diode = ograničenje za male napone (neelinearnost)
- ispravljajući s pojačalom = ograničenje za frekvencijsko područje signala



detektor vršne
vrijednosti



aktivni poluvratni ispravljач



\rightarrow stepoz za detekciju
, prave RMS vrijednosti
(implicit RMS value)

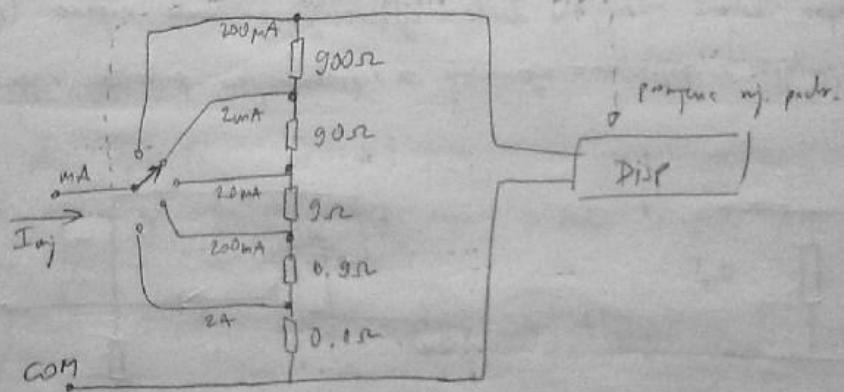
- mjeruje strujni napon - pogreške
→ potrebno je postaviti tip AC/DC pretvarač, nato interpretirati rezultate; frekvencijsku karakteristiku spravljajući

tjener faktor = $\frac{\text{vrana vrijednost}}{\text{efektivna vrijednost}} \cdot \text{velina oblike}$

- tipični frekv. područje digitalnih multimetrova do 400Hz (1kHz) u + gradij.
- karakteristični do 100 kHz, te više → selektivni voltmetri
- mjeruje RMS specificirano do 1-120% mjerog područja
- i "pravi RMS" pretvorite unosi pogodno kad su prisutni visi harmonici

Mjereni instrumentne struje

- idealni ampermeter = kratki spoj
- potrebno je imati konacen pad napona za mjeranje specijalnim priključnicama strujni kruž (burden voltage)
- otpornički shunt, velicina ovise o osjetljivosti mjerena naponu
- serijski spojen osigurat da mjerivo podnosi 1A



MJERENJE IZMJEŠANE STRUJE

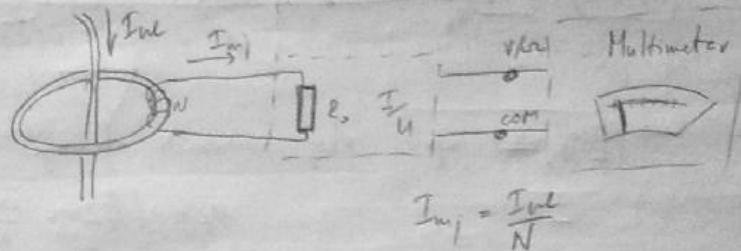
- spojnice u strujni kugli je DC, mjeri se izmjenjene komponente napon

- impedanija izmata omis o frekvenciji signala, moguće tražeće pogreške u mjeranju na različitim frekvencijama

→ te veće jakosti struje - koriste se strujne objekte (strujni transformator ili Hallova sonda)

↳ AC

↳ AC, DC



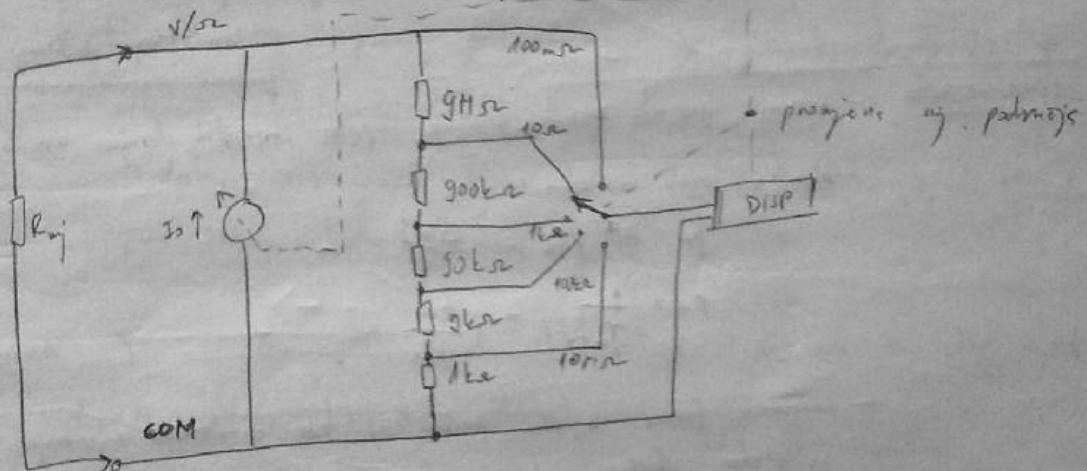
MJERENJE OTPORA

- prava je potrebna istosmjerna struja, mjeri se neprekidi istosmjerni napon

- promjene mernog područja se radi promjena struje izvare

- kod mjeranja s devjije priključnice, provodimo kompenzaciju otpora vodova

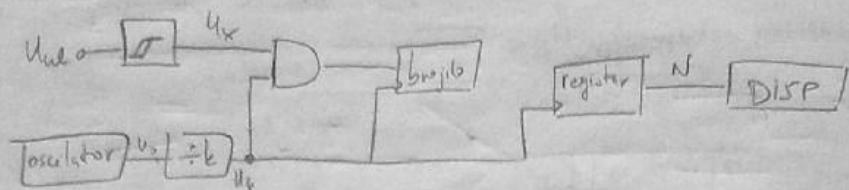
- bolji rezultati → mjerenje s 4 priključnice



Mjerenje frekvencije - brojanje uc brojaju impulsa ulaznog signala u vremenskom periodu
 definira precizni oscilator)

$$N = f_m T_0 = f_m k / f_0$$

$$f_m = N f_0 / k$$



opozorek: → postoji ±1 impuls zbog asinkronosti otvaranje „praznog“ i impulsa ulaznog signala

$$P_f = \Delta f / f_m = \frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{T_0 f_m}$$

→ snižavanje frekvencije → pada rezoluirnost mjerjenja

→ za niske frekvencije → menjaju se koncepte mjerjenja

→ pogreške vrem. baze (stabilnost oscilatora)

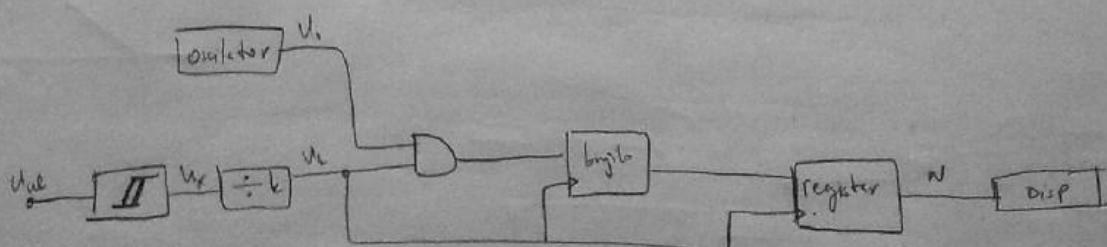
→ pogreške obiduju ulaznog sklopovlja (zbog živine superponiranih obidnih varijacija Schmittovog obidnog sklopa)

Mjerenje vremena - mjerjenje perioda signala, brojuje impulse između dvaju ulaskovih perioda
 - pogreška radi asinkronosti:

$$P_T = \Delta T / T_m = \frac{\Delta N}{N}$$

$$P_T = \frac{1}{T_m f_0} = \frac{f_m}{k f_0}$$

- suravnenje frekv. mjerila (procesorska) koriste metodu mjerjenje vremena i frekvencije te ciklu frekv. podmije (Universal counter)



P5: OSCILOSKOP

- prikazuje informacije: vizualne i punjene amplitudne signale u vremenu
- bori X-Y piseč (elektronika vrake katodne cijevi)
- osciloskop obično u istom mjestu raste $8 \times 10 \rightarrow$ horizontalno
vertikalno

→ analogni i digitalni osciloskopi

- analogni:
- + funkcionalnost koncepta, izredbe i razvijajuće se oblike
 - primjenjuje i mogućnost signala, ispis, tipično greske 2-3%, frekv podnosi do 100 MHz (16 Hz)

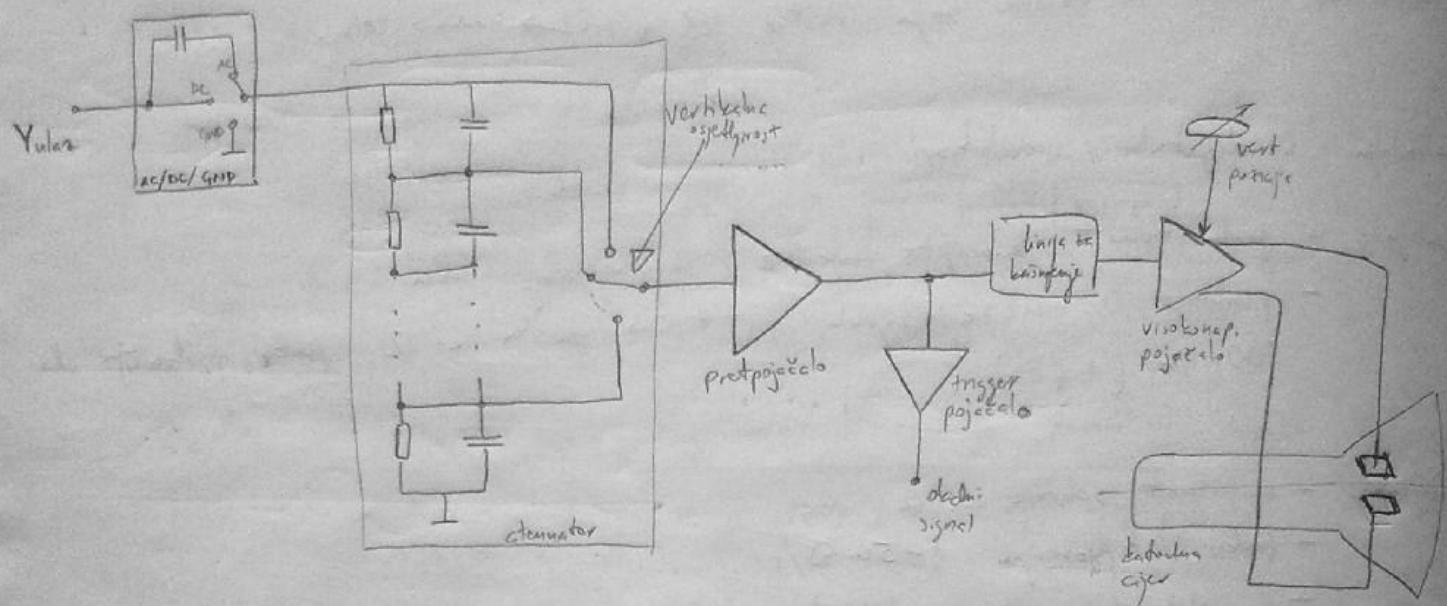
- digitalni:
- + mogućnost pohvate, snaklje, upisa
 - + frekv. otvještanja 1-50 SS/s
 - kompleksniji, podložni problem preklapanja spektara (aliasing)

ANALOGNI / KATODNI osciloskop:

- elektromski snopovi, katodne cijevi (vakuumne cijevi) upravlja se preko napona na okljušenim pločicama \rightarrow 2 para, jedan za X-povratak, drugi za Y-povratak
- provadzani signal - otlanja elektronski sllop gore-dolje
 - istodobno, otlanjanjem lijevo-desno signalom oblike $X=t+k$ dobija ispis valova oblika mjerenoj signala
- treba sinkronizirati Y i X signal t. d. slike počinje i završava na istom mjestu
- signal X moraju dovesti izvan (bitkoj oblik)

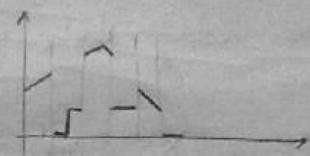
FUNKCIJSKI BLOKOVI: vertikalni kanal
horizontalni kanal
generator vrem. base
sllop za sinkronizaciju
katodna cijev
(izvor napajanja)

I - vertikalni kanal



- prikazdba (atenuacija/pojačanje), faktor otklona V/djelova skale
- pojačani signal dolazi u horizontalne otklonske pločice
- moguće ga spojiti AC ili DC načinom, kao i promijeniti polaritet signala
- VERT position \rightarrow dodajemo DC napon
- često moguć prikaz 2 ili 4 kanala

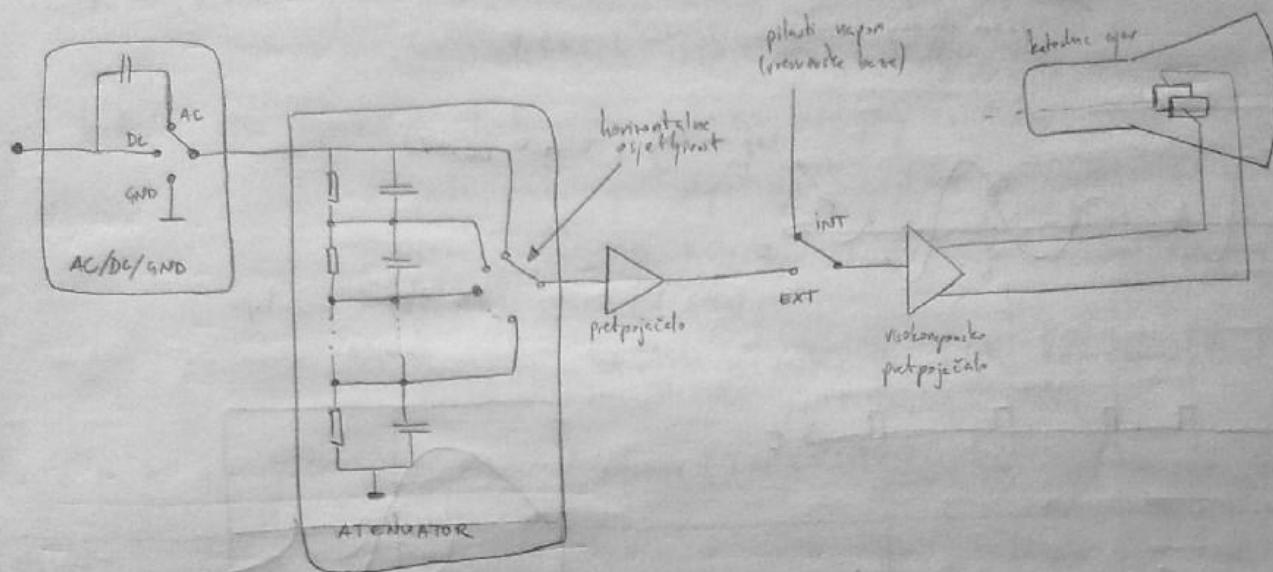
\rightarrow 2 načina prikaza: CHOPPER \rightarrow kavaci x međusobno preklapaju, te niti fekv, ali očuvan je fizički punkt



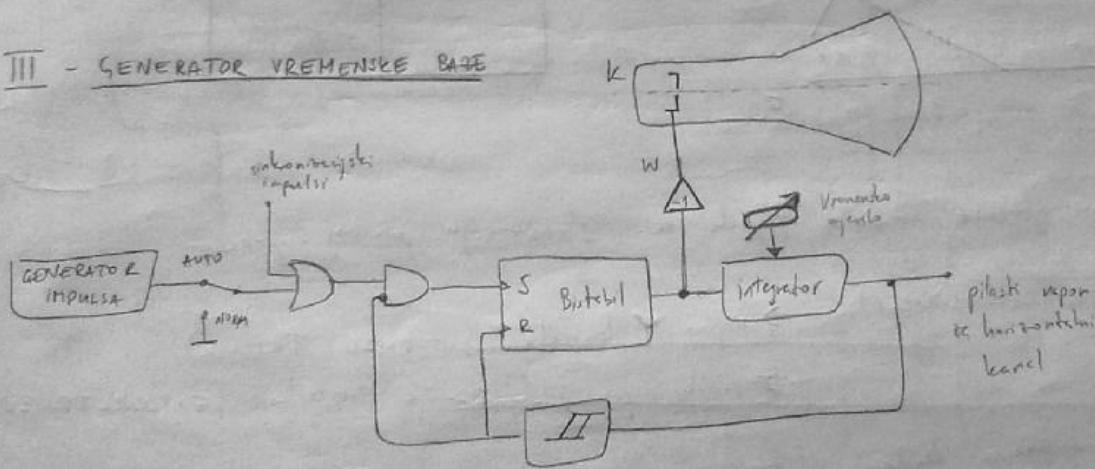
ALTERNATING \rightarrow kavaci se prikazuju redom jedan po drugi

II - HORIZONTALNI KANAL

- signal koji se akcen pojačava dovoljno vertikalne oteljene ploče katodne cijevi
⇒ pomiču zrake horizontalno (po X osi)
- signal ima plasti vlasti oblik (dokaz je generator vremenske base) koji se koristi za prikaz mijenjanja signala u vremenu
↳ nadišem dovesti i mli drugi rezultat

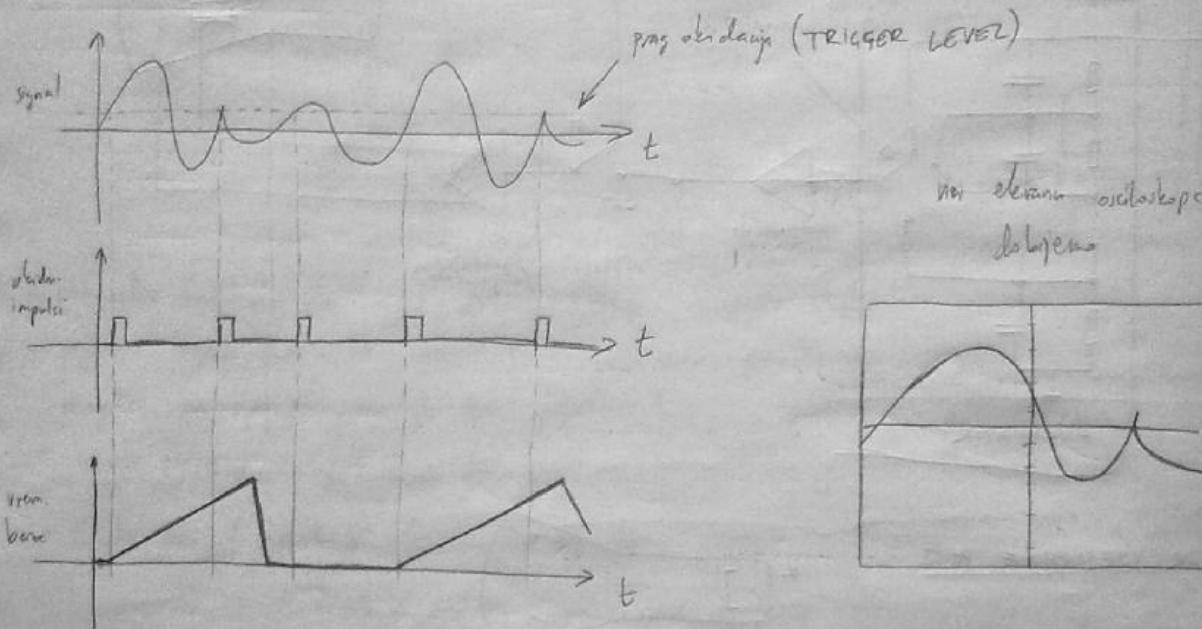
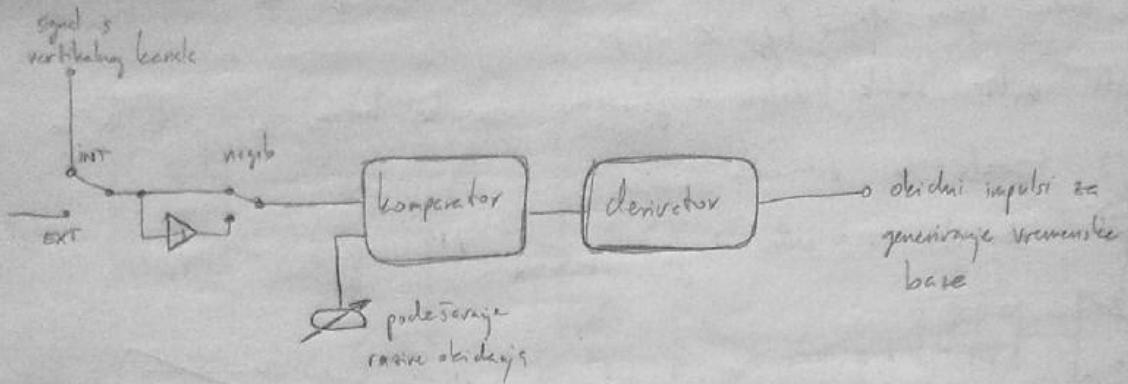


III - GENERATOR VREMENJSKE BASE



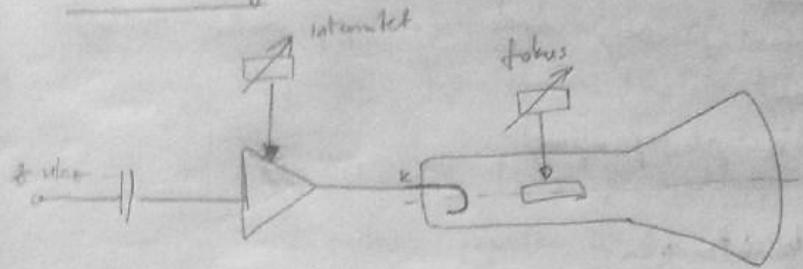
- gen vremenske base je sklopovje kojim se generira pilasti napon za X oteljen
- također, generira i impuls kojim se na katodnu cijevi onemogućuje elektronski snop te vrijeme povratnog pilastog napona → WHENELTOV CIKLINDAR
- nagibom pilastog napona definisimo brzinu kojom elektronski sklop prelazi preko zatvorenih katodnih cijevi → VREMENJSKA MJERILA OSKLOSKOPA (TIMEBASE), u s/diskete
- amplitudu pilastog napona = napon potreban za puni oteljen zrake (do kraja zaslona)
- odnosom perioda signala i brzine vrem. base određujemo da signali koji se prikazuju moguće je dodavati napon za horizontalni pomak zrake (HORIZONTAL POSITION)

IV - SKLOP ET SINKRONIZACIJA



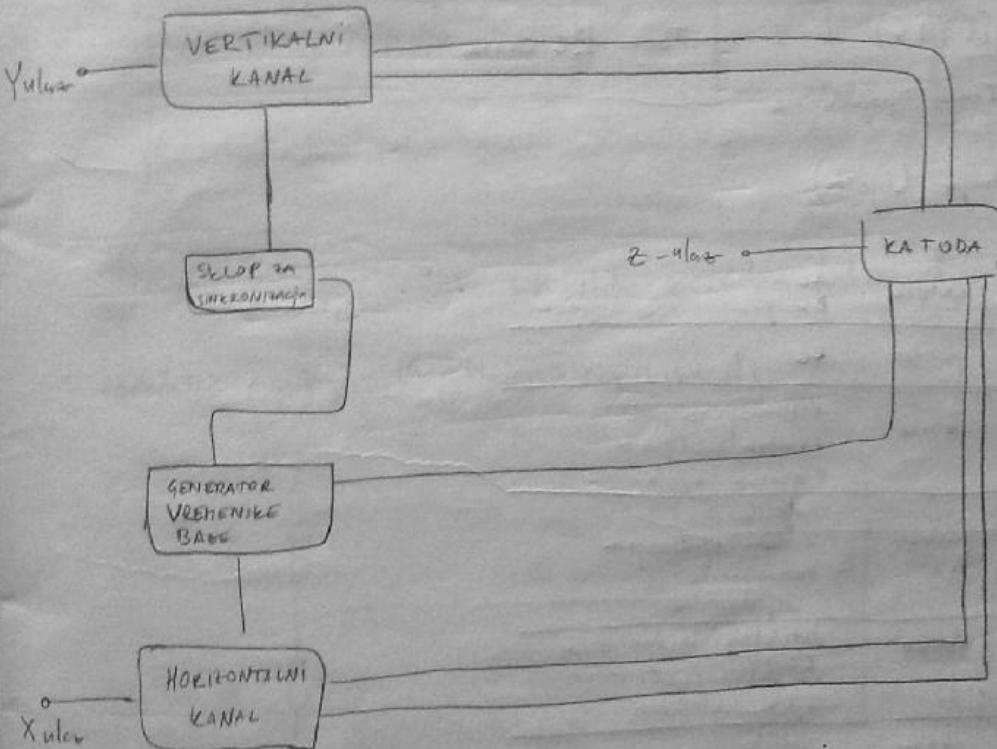
- deloj za sinkronizaciju generira vremenske signale za sinkronizaciju prikazog napona
- izvor okidanja signala (TRIGGER SOURCE)
 - napon γ kanala (INTERNAL TRIGGER)
 - vanjski napon povezivan na osciloskop (EXTERNAL TRIGGER)
- moguće podešavati
 - ravnu okidanje (TRIGGER LEVEL)
 - negativno okidanje napon (TRIGGER SLOPE) → slike li ne + ili - derivačija
- način okidanja:
 - AUTO - osciloskop okreće na signal, isti relativistički (veliki odstojanje vremena t) ukoliko je ravna okidanje ravan raspone signala
 - NORM - te ovaj način radi, ravna okidanje treba biti unutar raspona signala
 - SINGLE SHOT - omogućuje generiranje jednog prikaznog napona

V - KATODNA CIJEV



- indikator 3 informuje \rightarrow položaj strele x, y , i intenzitet mafe z
- zadani katodne cijevi \rightarrow s unutarnje strane prenijen materijalom na kojem elektronski snop ostavlja vidljivi trag
- katodne cijevi ograničuju frekvenciju podnjeće analognog osciloskops
 \rightarrow najviša frekvencija repeticije određena je svjetljenjem zadana
 \rightarrow najviša frekvencija osciloskops određena je brzinom raspisivanja katodne cijevi (1 GHz)
 \hookrightarrow oteljenu sustav je veliki kapacitivni teret
izazvan pojedalima
- može se upravljati energijom elektrona (INTENSITY), kao i fokusom strele (FOCUS)

UKUPNO:



NAPREDNE FUNKCIJE ANALOGNIH OSKLOSKOPA

- mogu se koristiti analogni signali (mogućnost promatravanja djele signala preko dviju točaka)
- promatravanje više kanala (multi-beam)
- HOLD-OFF funkcija (kaišenje pozicije pilota u vremenu)
- primjene dvoju vremenskih baza
- poboljšana amplitudno-frekvenčna karakteristika
- učinkodan učvršćuje elektronskog snopa, povećaje osjetljivosti prikaza (promatrava briži s niskom repeticijom → impulsi)

MJERENJE OSKLOSKOPOM

- mjerim amplitudu signala i vremenske odnose

- signal se spaja mjernim sondama

→ asimetrični spj (ulaz osciloskopa je ustanjen, $1M \parallel 30\text{pF}$)

→ prisutno ograničenje s obzirom na impedanciju mjerne sonde i sumjerljivost duljine sonde i valne duljine signala

• sonde → pasivne

→ aktive

- "pasivne" = koaksijalni kabel ($1X$) ili s ugradenim RC člankom

- "aktive" = sonde s ugradenim pojačalima

+ sonde se mjeruju struje (strujne kljucite)

TIPOVI MJERENIH SONDEI

	aktivne	Ac Dc
strujne sonde	pasivne	AC
reponske sonde	aktivne	diferencijalne s visokom osjetljivosti s visokom impedancijom
	pasivne	duljinske s visokom impedancijom visokom diferencijalne
sonde se digitalne signale	aktivne	dijelotoni logički razini dijelotoni frekv logički analizator
ostale (specijalne) sonde	aktivne	optičke
	pasivne	temperaturne akustičke sonde za vibracije

PASIVNA MJEJICA SONDA

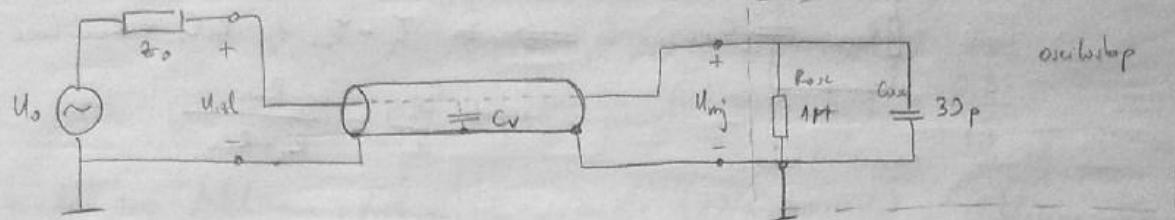
- se spajaju se konzistentni kabeli (sonda 1X)

↳ problemi: kapacitet $30-60 \text{ pF/m}$, ruši ulazu impedanciju

- mjeruje na visokim frekvencijama (gdje je impedanca kablela $100 \text{ pF} @ 100 \text{ MHz}, 160 \Omega$)

⇒ sustavna pogreške mjerjenja (manji napon i promjena spektra signala)

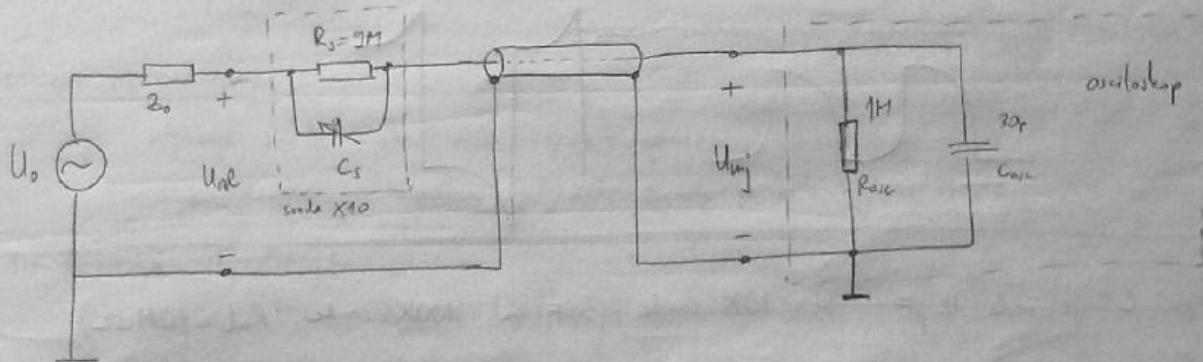
• potrebno je koristiti kraće (1m) kablele manjih kapaciteta



PASIVNA SONDA → NAPONSKO DJELILO

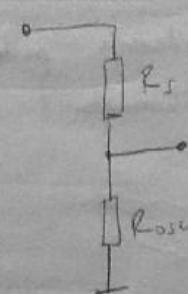
- povećavaju impedanciju spajanjem serijalnog otpornika (ulazne impedancije se ne ruši?)

- izvodi se atenuator, paralelni RC član u sondi i na ulazu osciloskopa ⇒ sonda 10X

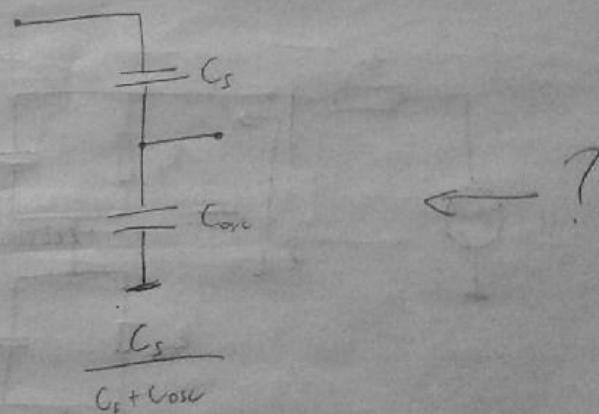


- omjer dijeljenja napona treba biti stalni u širokom frekvencijskom rasponu → kompenzacija

- nedostatak: gubi se 10 puta ⇒ nemogućnost mjerjenja malih napona

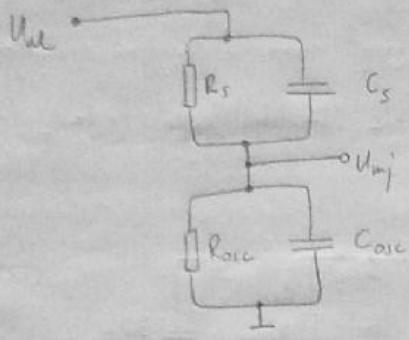


$$\frac{U_{inj}}{U_{inl}} = \frac{R_{osc}}{R_s + R_{osc}}$$



KOMPONENTA UZIJE PASIVNE SONDE → manjeće se vrijednost kondenzatora C_s u glavi njeni sonde (te sreću sonde ; kabel osciloskopa)

* reponsa djelež - omjer impedanija sonde : ulaza osciloskopa



$$\frac{U_mj}{U_{in}} = \frac{Z_{osc}}{Z_s + Z_{osc}} = \frac{R_{osc}(1+sT_s)}{R_s(1+sT_{osc}) + R_{osc}(1+sT_s)}$$

$$\Rightarrow \text{za } T_s = T_{osc}, \text{ tj. } R_s C_s = R_{osc} C_{osc}$$

$$\text{vrijedi } \frac{U_{in}}{U_mj} = \frac{R_{osc}}{R_s + R_{osc}}$$

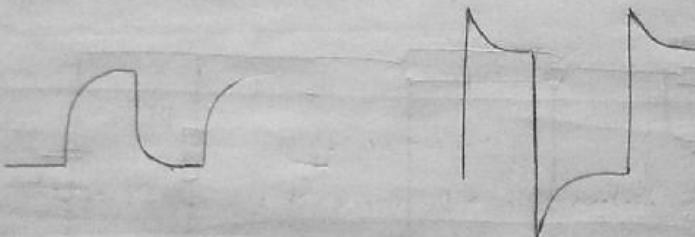
- kompenzacija se očituje (i prepozne) ne velikom oblikom preoblikovanog reponsa

$$\bullet \text{ za } T_s < T_{osc}$$

→ polikompenzirano

$$\bullet \text{ za } T_s > T_{osc}$$

→ nedekompenzirano

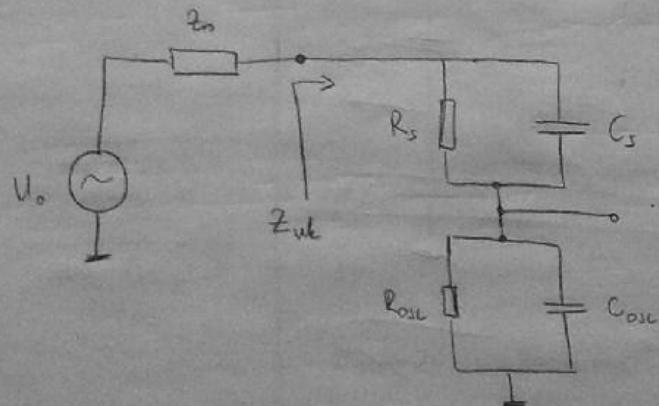


- ulazni C je reda 12 pF - za 10X sonde ; 3 pF za 100X sonde ($R_{in} = 10M\Omega$)

ULAZNA IMPEDANCIJA 10X SONDE

- impedanija se sastoji od serijalnog spoja paralelnih RC članova sonde i ulaza osciloskopa

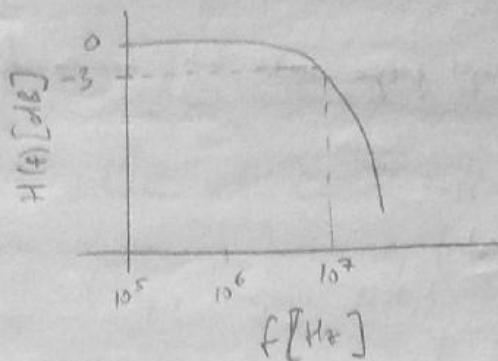
$$Z_{uk} = Z_s + Z_{osc} = \frac{R_s + R_{osc}}{1 + \omega^2 \tau^2} - j\omega \frac{(R_s + R_{osc})\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} = R_{uk}(\omega) - jX_{uk}(\omega)$$



⇒ impedanija pada s frekvencijom

Mjerna vremenski parametri

- merni sustav treba imati "glatke" AF-karakteristike, bez nadizvježa u odnosu na sklonitu polarizu



$$\text{Vreme vremenske porste i granične frekvencije: } t_r = \frac{0.35}{f_g}$$

- sonde imaju deklarirane frekvencijske područje ($10X, 400\text{MHz}$) i deklariran t_r
 - ukupno vrijeme porste t_r kod mjenjenja određenim vremenskim porstama izvora, sonda i osciloskopa
- $$t_r = \sqrt{t_{r,12}^2 + t_{r,15}^2 + t_{r,20}^2}$$
- (t_r je vrijeme potrebno da bilo daje od 10% do 90%)

AKTIVNA MJERNA SONDA

- smanjuje utjecaj sonda - stražnjaju spojnih vodova
 - snijetavanje pojedinih signala u vrhu mjerne sonde

- transformacija impedancije

$$Z_{ul} = 1M \parallel 12\text{ pF} \quad \longrightarrow ?$$

- karakteristike:
 - široko frekvencijsko područje
 - ograničen raspon injekcione napone
 - potrebno napajanje
 - problem prenapona tranzistora
 - visoka cijena (red osciloskopa)

- ne VF koriste se kabeli s ulaznim otpornom 50Ω \Rightarrow sonda i kabel postaju brige

SONDE za mjerjenje struje (struje sonda, strujne telejesta)

• strujni transformator

→ podnosi 100Hz - 10MHz

→ ne mjeri DC struju, materijal jezge može biti triven DC strujom kroz vod

• Hallova sonda

→ za DC i AC podnosi (100 kHz)

- često se u istoj sondi kombiniraju oba načina mjerjenja

DIGITALNI OSCILOSKOPI

1. osciloskop s digitalnim pamćenjem (Digital Storage Oscilloscope)

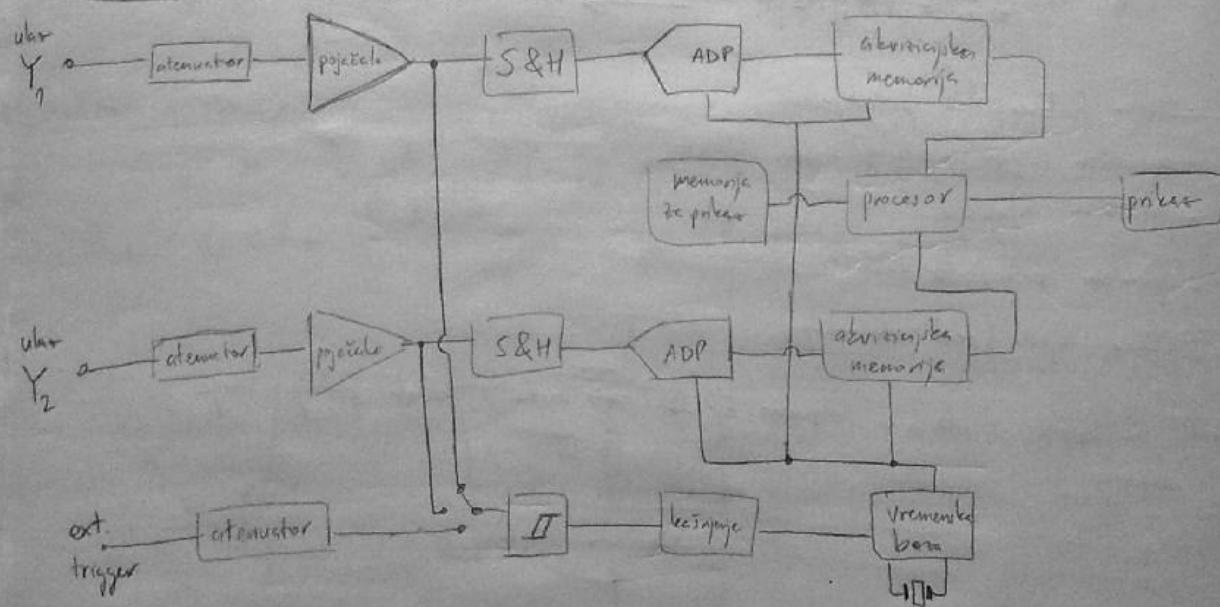
→ kontinuirano snimanje u stvarnom vremenu (Real-time sampling)

→ slučajno snimanje mjeraka (Random repetitive sampling)

2. "Sampling" osciloskop (Digital Sampling Oscilloscope)

→ sekvencijsko snimanje mjeraka (Sequential repetitive sampling)

OSCILOSKOP S DIGITALNIM PAMĆENJEM

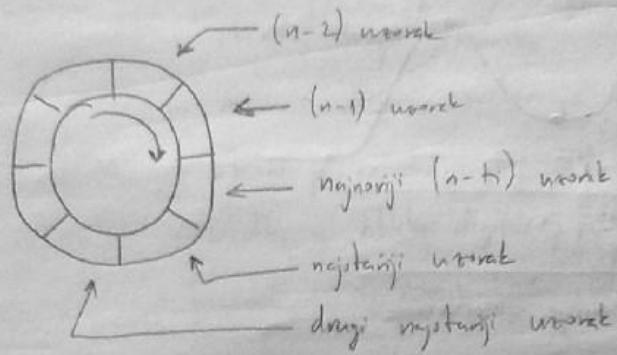


digitalizacija - vrstalost snimanja mjeraka (sampling rate), uniformna uskraćenje
- varljivost (8 bits tipično)

- X kant - detektuje usjetu okidanja
- sintronizira upravljanje usmjerena snimke i prikazom

Akvizicija memorija

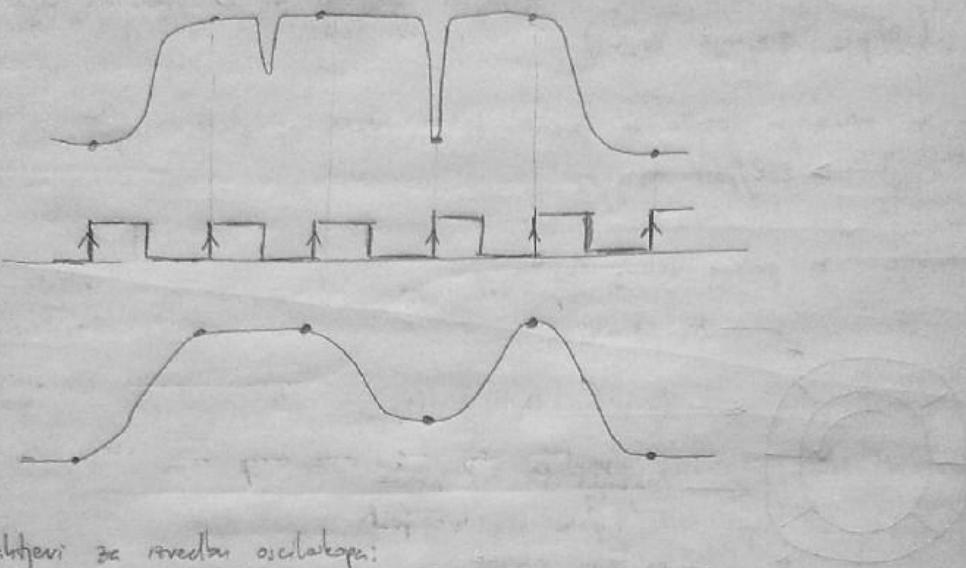
- organizirana kao cirkularna polje (Circular buffer)
- podaci se upisuju u memoriju kontinuirano, frekvencijom workovanih, do raspunjene usjete okidanja (ispis trajanje Nts.)
- prethodni upisivanja u memoriju može se pomenuti u odnosu na okidni usjet
 - pre/post trigger
- slijedi ispis iz memorije te prikaz veličine oblike



ITA JE SAD ONAJ VREMENI.
Dijagram? slajd 27

Dohmanje učvata u stvarnom vremenu

- svu učvare svih kanala se variraju ispunjenim ujetom okidanja
- valni oblici svih prikazanih kanala dobiveni su u istom ciklusu
- može se stabilizirati nerepetitivni transijent
- moguće je prematati signal pije ispunjenje okidnih ujetova



- najveći zahtjevi za ravnatelj osciloskopa:

- visoke frekvencije uzorkovanja
- velike brzine rada memorije
- veliki kapaciteti memorije

- odnos frekvencije uzorkovanja i širine spektra mjereneog signala:

$$\rightarrow \text{Nyquist}, f_s > 2f_m$$

\rightarrow ako sampliramo frekv. više od $2f_m$, dobivamo preklapanje spektrata (aliasing)

\rightarrow tipično je $f_s = 4-10$ puta više od f_m

- rekonstrukcija velnog oblika te iscrtanje \rightarrow neizvodljivo u real time

- širiši pojava signala ograničavanju pojedinačne Y kanala osciloskopa

- vrlo zahtjevan kompromis \rightarrow brzo pad prijenosne karakteristike za bolje grijanje i istraživanje „Gaussove“ karakteristike

- osciloskop s digitalnim pamćenjem ima istraživanje u odnosu na sklopovitu polaznicu

- aliasing u vrem. domenu
- atipčanje impulsa
- ovisi o velikom obliku impulsa
- rekonstrukcioni frekvenčni = cijelobrojni visokotoljne vremene uskoravanja
- kredupoznje rezultata više uskorava
- DSO - ograničenje frekvenčnog pojasa u $\frac{f_s}{4}$, može rekonstruirati vrijeme u transverzalnoj mjeri $\pm 0.15t_s$

- rekonstrukcija valnog oblika
 - težnje razine (2) najbližih uzoraka
 - dobivanje interpolacione vrijednosti u uniformnim polintervalima između dvojice uzoraka
 - ovisi o brzini uskoravanja, vremenskoj bazi i razlučinosti prikaza
 - obično je potrebno 20-50 interpolacijskih točaka
 - izvedbe u obliku digitalnih filtera
 - linearna interpolacija, $\frac{\sin x}{x}$ interpolacija

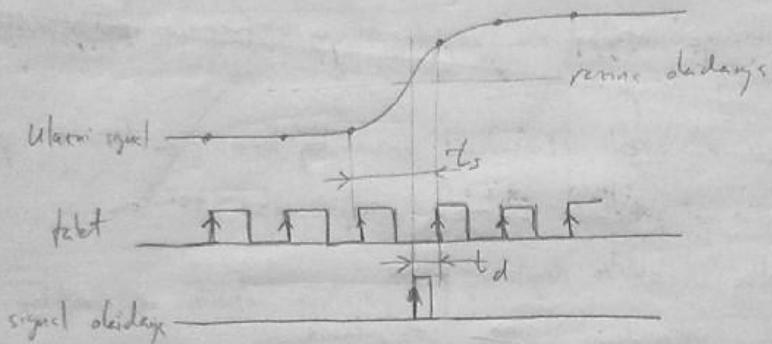
- vezba od pojave akcenata
 - sspore vremenske baze, niske frekvenčne uskoravanja
 - dulje uskoravanje signala s brzinom promjencama
 - spori signali frekvenčne bliske visokotoljnim frekvenčnim uskoravanjima

→ najprije izlagači akcenata - Peak detection

- ADP utvara uzorke visokom frekv. neovisno o vrem. bazi
- informacije se zapisuju u 2 registra, te najmanju, najveću vrijednost, nakon usporedbe s prethodnim zapisanim
- u memoriju se upisuju učinak (efektivnom) frekvenčnom uskoravanju (odnosno vrem. bazu) → zapisuju se 2 podatka te sukladni efektivni uzorci
- primenjuju se min i max te se svaki efektivni uzorak i poređuju se vertikalnim crtom

Trigger interpolator → ?

- DSO utvrđuje sintaksu i referentnim oscilatorom
- pojavljuju se uvjeti nije sintaks i generator takta
- trigger interpolator treba izmjeniti vijocene između obidog impulsa da utvrdi sljedeće uvorce u svakom ciklusu
- utvrđivanje prestaje se sljedećim uvorcem ili drugim ciklom bojačen uvorci koji se može usajevati (pretrigger)
- vrijeme se mijenja unutar nekoliko %, najkraće mn. bare osciloskopa



SLUČAJNO UZIMANJE UTOČAKA → ?

- glavna ograničenja uzorkovanja u strovnom vremenu je ograničenje spektra signala ne $\frac{f_s}{4}$
- preširovanje spektra moguće uz bilo ADP i memoriju (skup)

→ kako povećati f_m bez povećanja f_s ?

⇒ slučajno uzimanje utonaka (uz uvjet da su signali repetitivni i može se ostvariti vrlo stabilno generiranje obidog impulsa)

- ponavljaju se ciklusi uzorkovanja u strovnom vremenu
- u svakom ciklusu generira se slučajni vremenski pomak između obidog impulsa i generator takta te uzorkovanje
- utiče se jedan ili više uvorce po periodu signala
- uvori se pohranjuju u memoriji

- svaki uzorak se prekucanje leza fokusa na zadatu vrijesnu vremena od obidog impulsa, bez interpolacije
- efektivne brzine uzorkovanja ovise o frekvenci mjerjenja vremena trigger interpolatora (rastkorak $\approx 10\text{ ps}$)

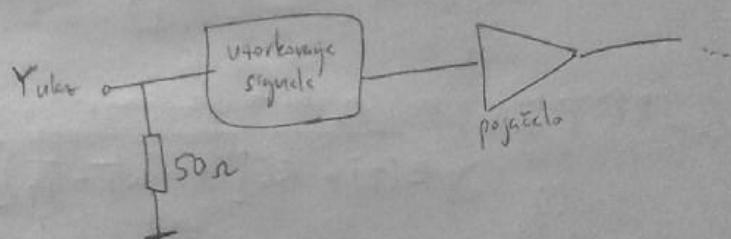
R?

SAMPLING osciloskopi

- sekvencijalno uzimaju uzorake
- uzimaju se jedan uzorak nakon ispunjenje obidog uvjeta s točno definiranim vremenskim pomakom (lakše generirati kratke intervale, nego ih mijenjati; rastkorak $\approx 10\text{ fs}$)
- u sljedećem ciklusu uzorkovanje vrijeme se produžuje za neli broj
- uzorkovanje se ponavlja do isurtavanja cijelog valnoga oblika

⇒ efektivno vrijeme uzorkovanja odgovara vremenskom intervalu između uzoraka
 — pomak mora biti pozitivan, nije moguće pretrigger

- najbrži osciloskopi: do 50 GHz
- sklop za uzimanje uzoraka na ulazu (magninasti pogonjalo)
- smanjeno dinamičko područje (tipično 1V)
- osjetljiv na prenapon



P6 - SENZORI

- djeluju ih:
 - prema mijenjajućoj veličini
 - prema fizikalnom načelu rada (premjenjujući veličini)
 - obliku energije mijenjajući signale
 - impedanciji
 - potrebi za uvođenjem izvorom energije

OTPORNIČKA OSJETILA

- = promjena otpora razmjerno mijenjajućoj veličini
- promjena otpora mijenja se početno uvisom u uč. otpornika

$$U_x = U_o \frac{R}{2R + \delta R} + U_o \frac{\delta R}{2R + \delta R}$$

1. OSJETILA ZA MJEĐUJE TEMPERATURE

↳ otpor metala ovisan o temperaturi (najčešće platinac \rightarrow Pt; $Pt100 = 100\Omega$ u $0^\circ C$)

ovisnost $R \propto T$ je uobičajno nekvadratna
(pojam je Pt100 nazacen u red)

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

• primjenjuje se pojednostavljeni rez.

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)], R_0 = 100\Omega, 0^\circ C$$

- prvi specijalni osjetili konstante se neće mijenjati da se spriječi smanjivanje vrijednosti

2. TEMPERATURNI OVISNI OTPORNIČKI = TERMISTORI

$$R(T) = A e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \rightarrow \text{konstante ovisne o materijalu}$$

$$R(T_2) = R(T_1) e^{B\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}$$

3° TENSOMETRI = otporoduc trake te mjeruje naprezanje ujednjeno prema promjeni duljine vodiča

$$\rightarrow \text{naprezanje (stress)} \sigma = \frac{F}{S} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$\rightarrow \text{deformacija (strain)} \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

- naprezanje je do granice elastičnosti prema razvoju relativnog prodluženja (preko Youngovog modula elastičnosti E)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r} = -\mu \varepsilon_e$$

proučenje otpora s naprezanjem - otpor ovisi o materijalu i dimenzijama otpornika

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{ds}{S}$$

$$S = r^2 \pi, \quad dS = 2r\pi dr, \quad \frac{ds}{S} = \frac{2}{r} dr$$

- faktor pretvorbe K vrne proučenu otpornu i deformaciju

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dl}{l}} = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dl}{l}} + 1 - 2 \cdot \frac{\frac{dr}{r}}{\frac{dl}{l}} = 0 + 1 + 2\mu$$

- naprezanje izračunavamo poznavajući modulu elastičnosti

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{K} \Rightarrow \sigma = \varepsilon E$$

$$\sigma = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{K} \cdot E$$

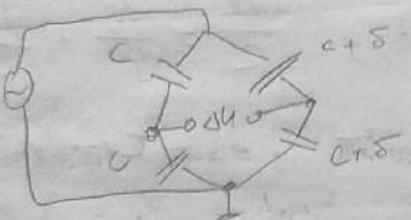
KAPACITIVNA OSJETILA - primjerice kapacitete se mijenjaju (nečistoće pomicaju elektr.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

- mogući pomeri plina: - promjena površine
- promjene razmaka
- promjene razlike diferencijalne
- promjene površine i razlike (upozn. tlak)
- pomeri dielektrika: - površine dielektrika
- promjene vršne stupnjeva

- MEMS - mikroelektronički sustavi (mjerenje pomerja preko promjene kapaciteta)

→ spajanje kapacitivnih osjetila: u polimerni, na primjeričko upečaju



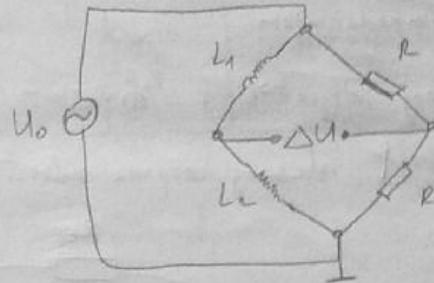
INDUKTIVNA OSJETILA - funkcije su: 1) promjene mag. struje (reluktancija) uzlijed
promjene dugine mrežnog rasporeda
2) promjene induktivitete uzlijed promjene
položaja kuteve

1) promjene reluktancije:

$$L_1 = \frac{L_0}{1 + 2\alpha(\delta + x)}$$

$$L_2 = \frac{L_0}{1 + 2\alpha(\delta - x)}$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{j\omega L_2}{j\omega L_1 + j\omega L_2} - \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{x}{\left(\frac{1}{2} + \delta\right)}$$



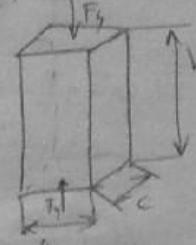
2) promjene induktivitete: - mijenja se primjene - nečim je induktivitet drugih sekundarnih i jednog primarnog sviteva

PIEZOELEKTRIČKA OSJETILA - piezoelektrički efekt = pojavljevanje naboja kada se mehanički djelovanje stavlja na kristal ($Q \sim F$)
- materijali: keramik (kvarc) i keramika
- za uverenje sile, Hooke, akceleracije

• princip rada:

1) longitudinalne sile: Linijske naboje su u geometriji (osjetilo oblike trapeza)

$$Q_y = -2.3 \alpha F_y \frac{b}{a} [\text{pC}]$$

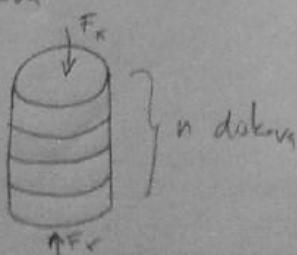


2) transverzalne sile: - osjetilo sestavlja diskove

- koljetne naboje ne su u geometriji

- poređenje osjetljivosti s više diskova

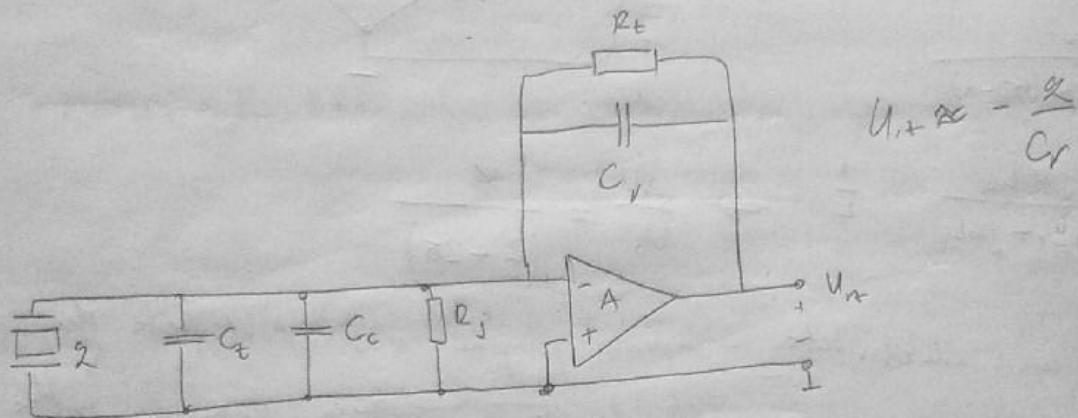
$$Q_x = 2.3 \alpha F_x$$



- pomoč električne napetosti ugravirane v. krovu
- pri spajanju, potrebno je generirani nalog pretvoriti v napon
 \Rightarrow konstantno NABOJSKO POJAČALO

NABOJSKO POJAČALO = pojačalo visokog pojačanja obvezne petlje, s vrlo visokom ul. impedancijom

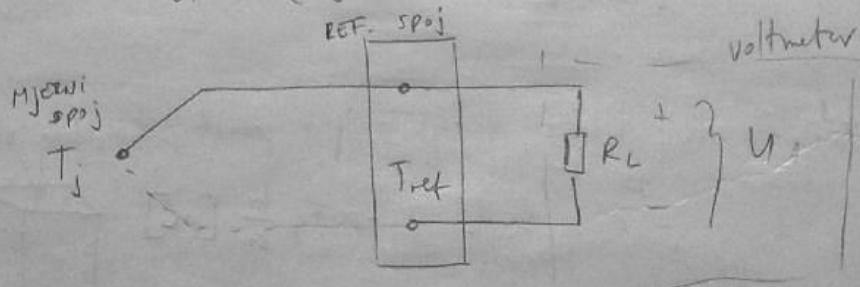
- spoj integratora s definiranim granicnom frekvencijom
- drift istezanj naponu određuju struje curenja pojačala



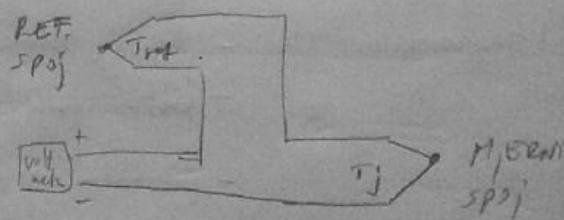
TERMOPAR - krov od 2 različitih metala sa spojevinice ne razl. temperaturom
 \Rightarrow javlja se elektromotorne sile

- generirani napon ovisi \rightarrow varstvi temperature (α - Seebeckov koef.)

$$U = \alpha (T_j - T_{ref})$$



Spajanje u m. tempi:

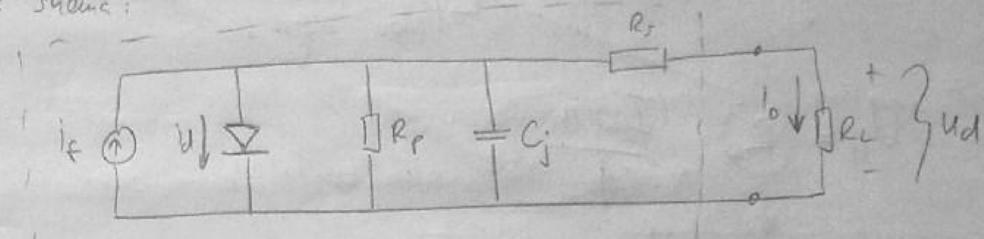


FOTODIODA

- optoelektronische komponente → prenosi optičku energiju u električnu

- pretvara - upadajući brezjevi svjetlo → - spredstavlja karakterističnu diodu
- upadajući kemijski brezjevi

Nedampirajuća shema:



i_f - struja nosilaca

R_p - paralelni otpor pn pripje

i_d - difuzijska struja

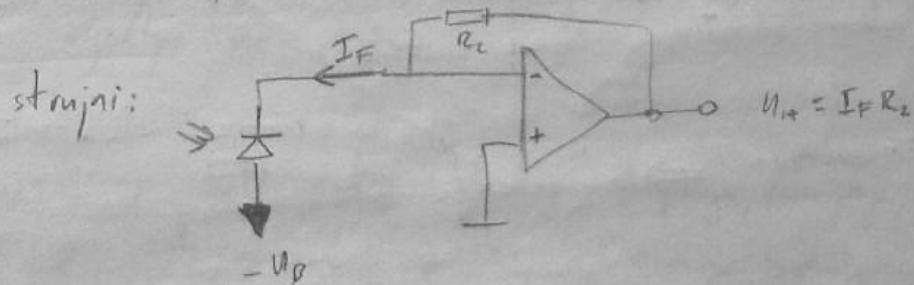
C_j - kapacitet

R_s - senzorski otpor diode

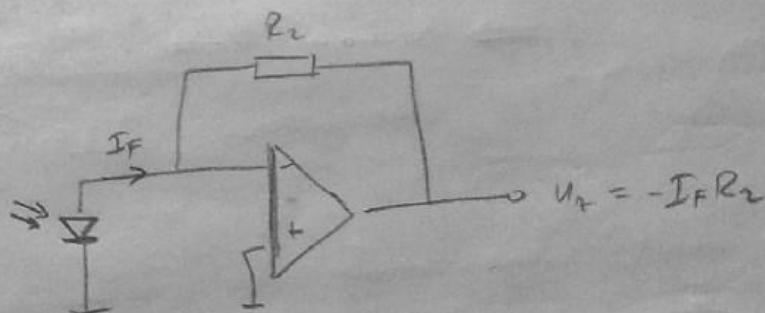
- napon U_d na kojemu stvara struju i_o

$$i_o = i_f(\phi) - I_s \left(e^{\frac{U_o}{U_T}} - 1 \right)$$

- 2 načina rada:
 - naponski - bez zaporne polarizacije
 - strujni - sa zapornom polarizacijom



naponski:



HALLOV objekt

- na vodič kojim teče struja I djeluje magn. polje B
- javlja se elektromotorna sila (U_H) okomita na smjer struje i magnetski polje
→ Hallov napon

$$U_H = (R_H) \cdot \frac{I \cdot g \cdot B}{d}$$

↓
Hallov
koeficijent

P3 - ELEKTROMAGNETSKE SMETNJE

- = su neželjeni električni signali koji utječe u mjeru kroz (interference)
- izvor smetnji:
 - atmosferske razbijanje
 - održljivi komunikacija, radio i TV održljivi
 - energetske postrojenja
 - gradskog energetske mreže, električni i elektronički uređaji
- izvor smetnji i mjeru mogu biti većni
 - a) elektromagnetskim poljem (električne i magnetske smetnje)
 - b) putem zajedničkih impedancija
- utjecaj smetnji može se smanjiti
 - a) eliminacijom izvora smetnji
 - b) slabljenjem vese između izvora smetnje i mjeru kroz
 - c) izbjegavanjem elektroničkih mjeru kroz koj je manje osjetljiv na smetnje
- tehnike smanjenja utjecaja EM smetnji uključuju oklopanje, usmjeruje, simetričan dizajn, filtriranje, izoliranje, odmicanje i orijentiranje, kontrolu veličine impedancija, dizajn kabala, potiskivanje obradom signala

VISOKOFREKVENCIJSKE (VF) SMETNJE

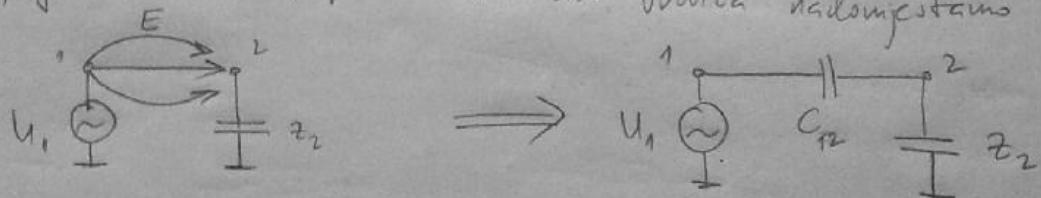
- radio, TV, GSM odajiljača
 - vodovi elektroničkih uređaja (fj. priključnice) = prijamne antene za signale smetnji
- VF smetnje je moguće eliminirati
- a) Faradayevim kavcom
 - b) oklapanjem

↳ ako se radi o malim induciranim naponima, tada primjenjujemo filtriranje signala (za mjerjenje NF signala koristimo nizospropusne filtre, za mjerjenje VF signala koristimo pojasnospropusne filtre)

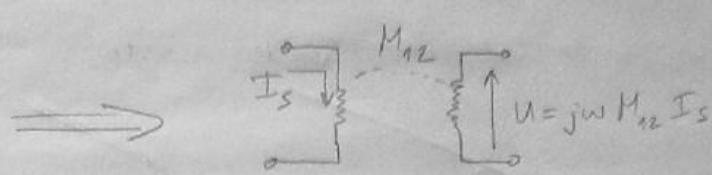
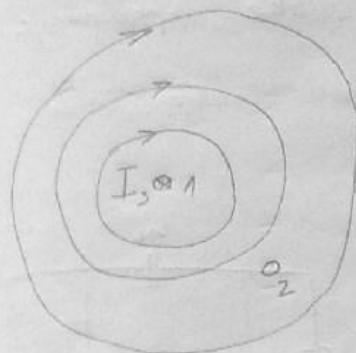
NISKOFREKVENCIJSKE SMETNJE

- cilj nije precizno određivanje iznosa smetnje
- prema valnim duljinama signala smetnje; dimenzije električnih uređaja su zanemarive \Rightarrow moguće je odvojeno promatrati električno i magnetsko polje
- \Rightarrow prijenosni kanal uključujemo koncentriranim elementima električnog kruga

1. promjenjivo električno polje između dva vodiča uključujemo kondenzatorom



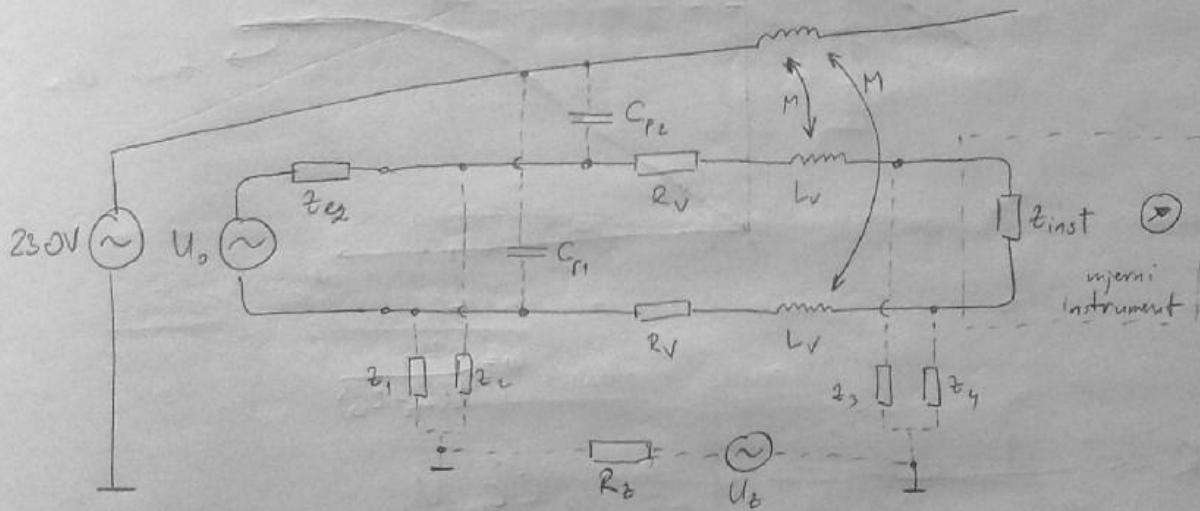
i) promjenjivo magnetsko polje između dva vodiča nadograđuje se međuinduktivitetom između drugu strujnih krugova



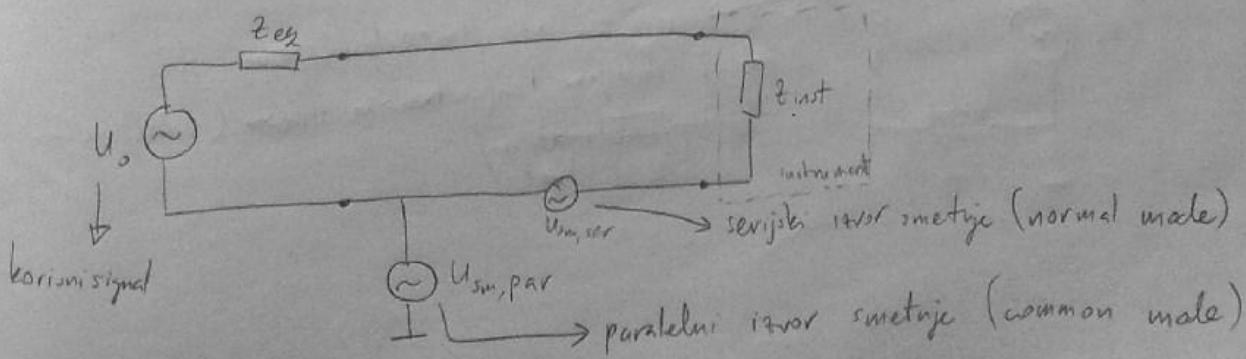
- najčešći izvor NF električnih smetnji je gradske mreža (230V, 50Hz)

↳ udaljenosti i duljine vodova su puno kraće od λ ($f=50\text{Hz} \rightarrow \lambda = 6000\text{km}$)

↳ smetnje se prenose kapacitivnom i induktivnom vezom, te preko zajedničke impedancije

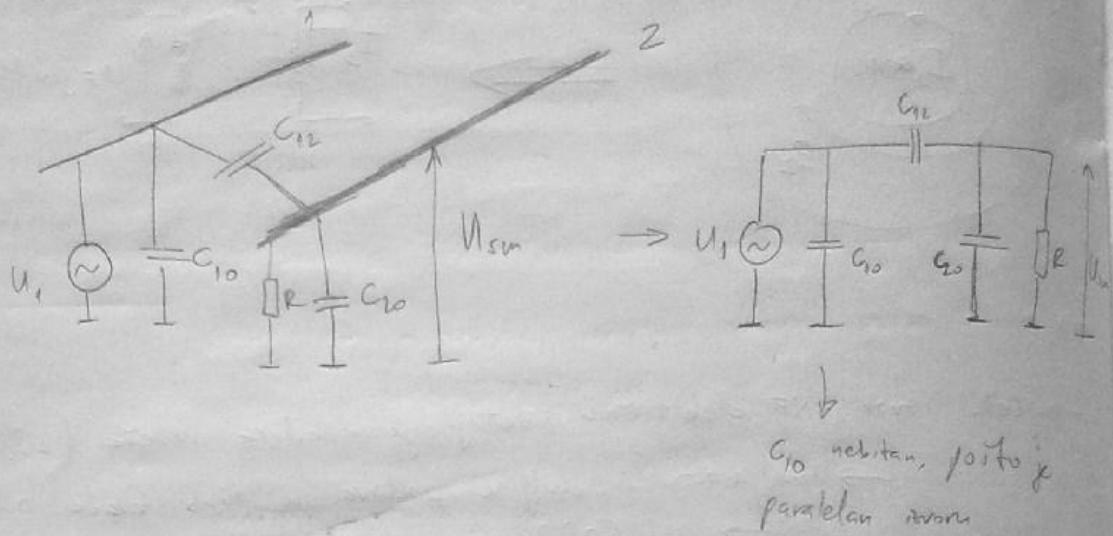


nadograđena shema mjernog kruga i izvor smetnje:

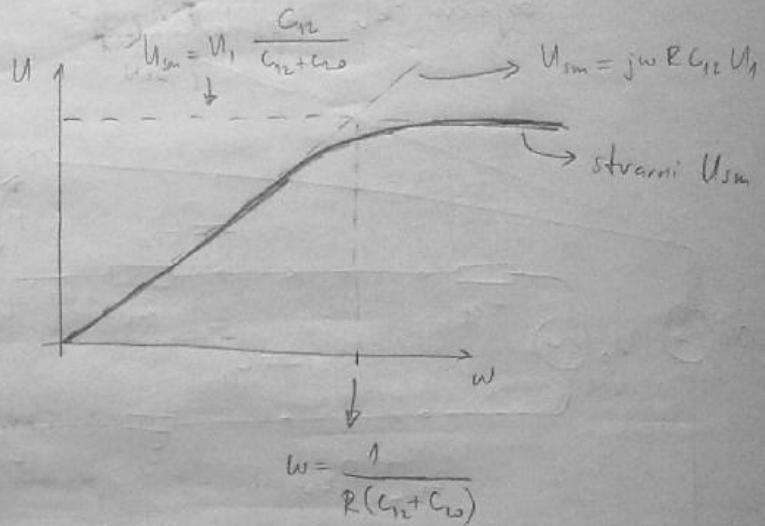


ELEKTRIČNE SMETNJE

- uvozi se u kruž kapacitivnim vezom
- modelira se izvorom visoke impedancije



$$\rightarrow U_{sm} = U_1 \cdot \frac{j\omega R C_{12}}{j\omega R(C_{12} + C_{20}) + 1}$$



$$1^{\circ} \Rightarrow R \ll \frac{1}{\omega(C_{12} + C_{20})} \rightarrow U_{sm} = j\omega R C_{12} U_1$$

↳ smajenje smetnje frekv vlt otpor vrem: kap.

metanje

→ užem vlt. impedancijom ili

slabijom kapacitivnom vezom (izdizavanjem ili
uklapanjem)

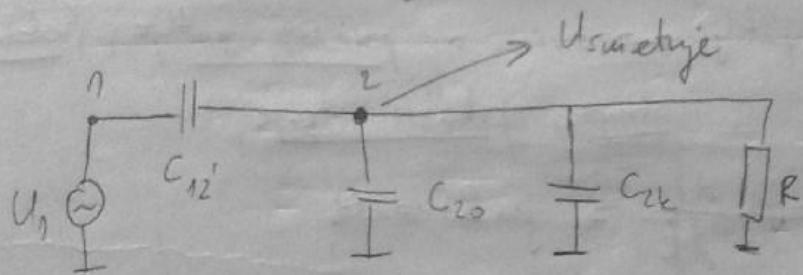
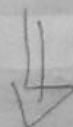
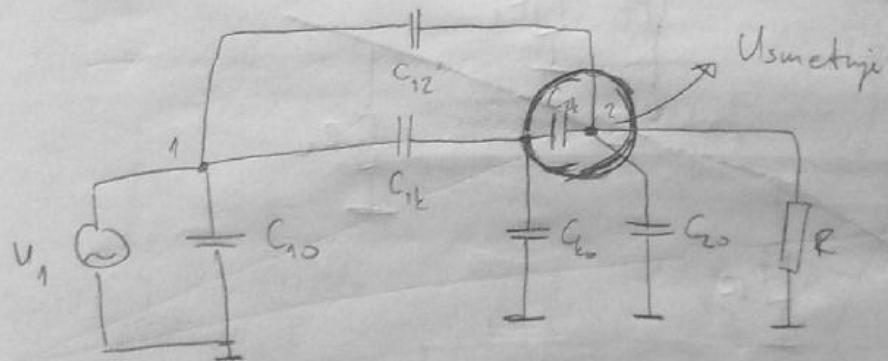
$$\approx R \gg \frac{1}{w(C_{12} + C_{20})} \rightarrow U_{\text{sum}} = U_1 \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}}$$

kapacitivus ugnys
dydis

\rightarrow ugnys smetija velyk neig kai jei ugnys atspyr R ugnys,
tame avisi \propto frekvencijai

SMANJENJE ELEKTRIČNE SMETNJE

- ugnys smetnje smanjujama smanjenim parametrų vertėmis kapaciteteis
 C_{12} \rightarrow telsi tuo kabelo atsparumas i oklop ugnystime

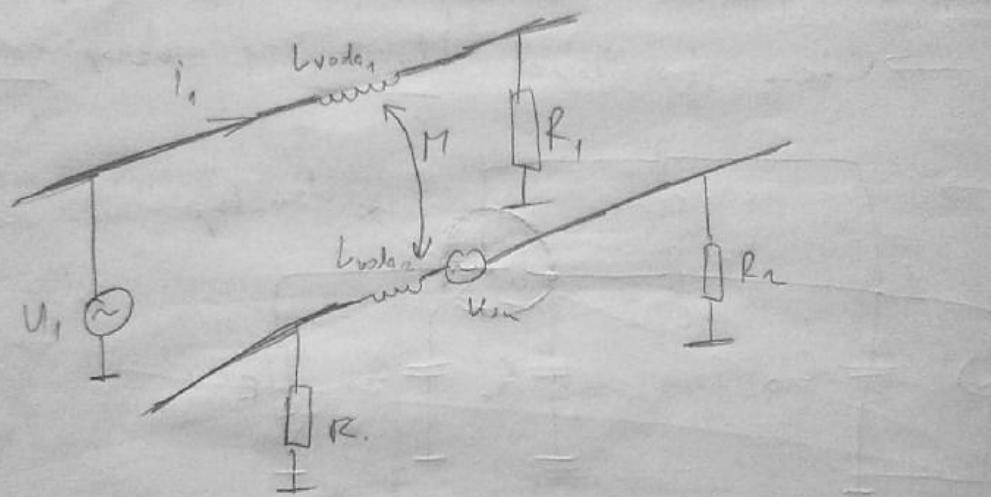


ZAŠTITA OKLAPANJEM

- poliedrične smetnje ugnys sustarp
 - paraičiai ugnys kapacitetai, povečanje opterečenja i ugnys signalas ugnys frekvencijoms (C_L abo $50 \mu F/m$)
 - kurė oklop kabelo telsi kapacitivine struje

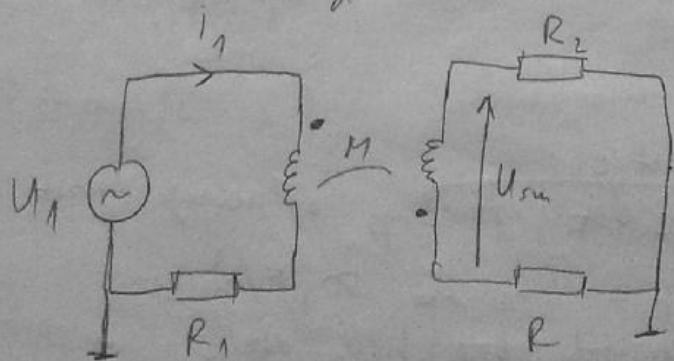
- signal ne ide kroz oklop kabete
- oklop treba usmjeriti u istom smjeru gdje je mjeriti sistem, da ne bi došlo do induktivnih smetnji između mjerog voda i oklopa

MAGNETSKE SMETNJE = prouzročuju struja u jadrom kruga \rightarrow induciraju se napon u drugom krugu, zbog postojanja međulinakutiviteta M



- modeliraju ih izvorom viske impedancije
- napon induciran u petlji \rightarrow ovisi o površini petlje, frekvenciji, struje, jakosti struje

$$U_{sm} = M \frac{di}{dt} = j\omega BS \cos \theta$$



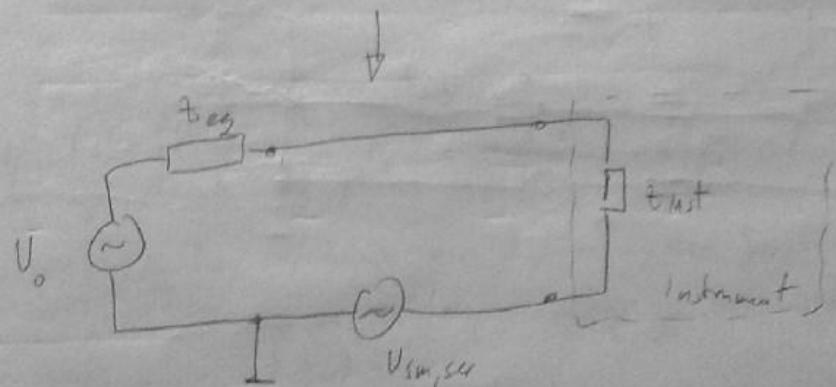
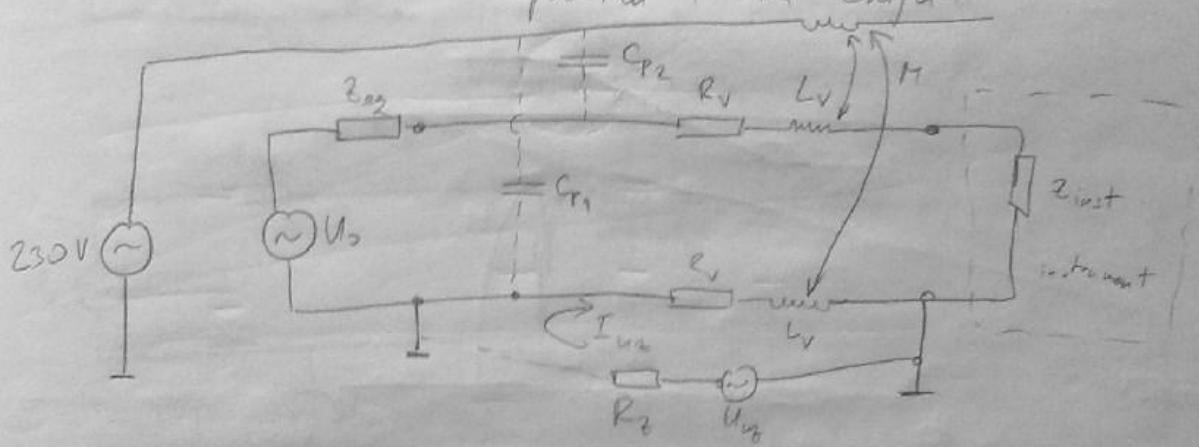
STANJENJE MAGNETSKOG METRIGA:

→ surađujući u pozitivne polje S (uplitajuća valica)

- za prec. mjerljiva i primjera analogog signala uz veliku udaljenost, koristimo oklopljeni kabel s upletenim vodičima

ASIMETRIČNI / UZEMLJENI spoj

- impedanije Z_1 ; Z_4 su $\infty \rightarrow$ dugi i uzemljeni na početku i na kraju



- napon smjere $U_{sm,per} = 0V \rightarrow$ paralelni napon

$U_{sm,scr} = \pm u_2 - R_V \rightarrow$ senzori, mog raddar napon
uzemljenu točku

- dolazi do istraživačkih procesnih signala (udaljenost senzora, signali, mjerljivi naredbi)

- kod asimetričnog spoja, izvor smetnje se eliminira tako da spojimo u temelju
u (samo) jednoj točki

→ možemo uzmijeti izvor signala (sensor)

- npr. kotač

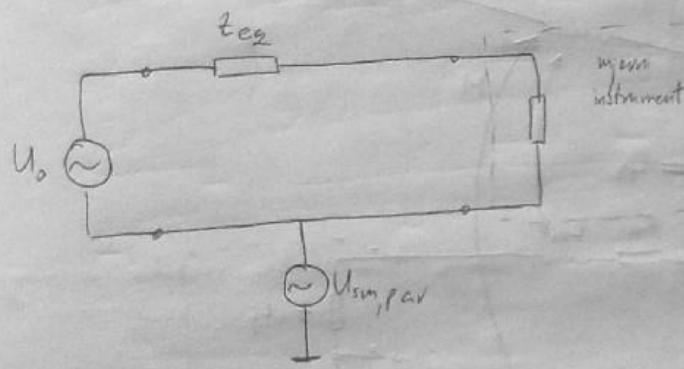
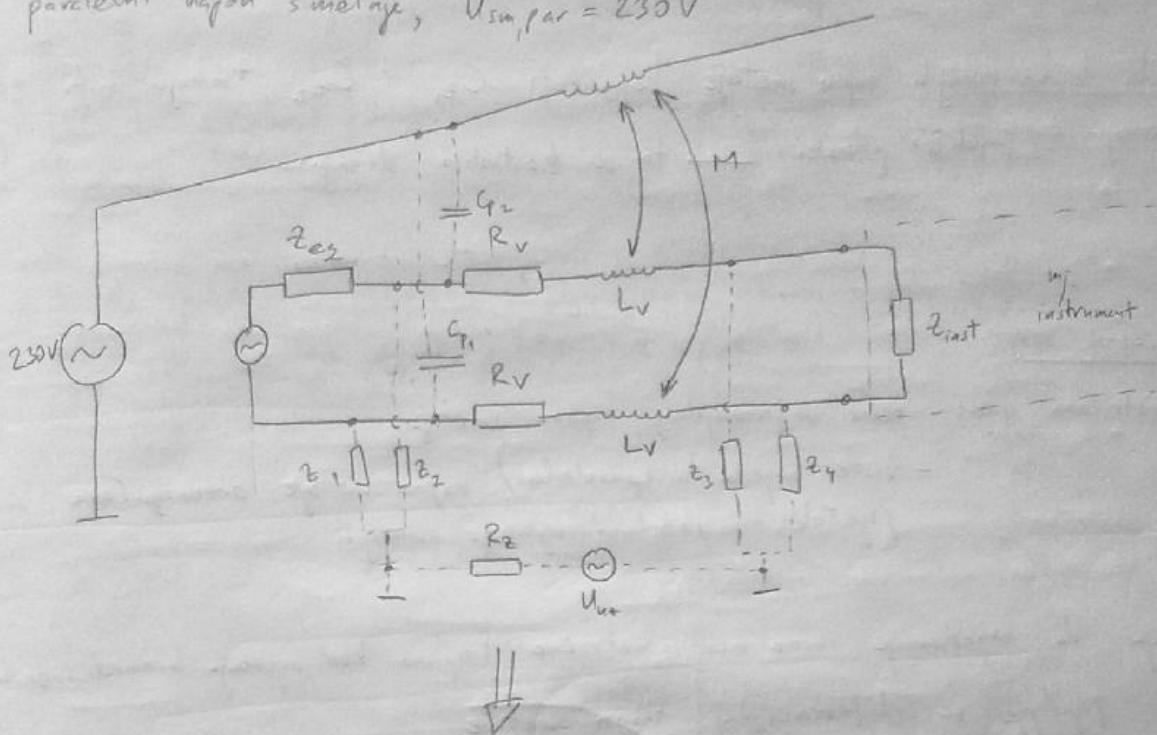
- obično se primjenjuje plovajući ili diferenčni spoj
s pojačalom

→ možemo uzmijeti mjeru pojačala (uređaj)

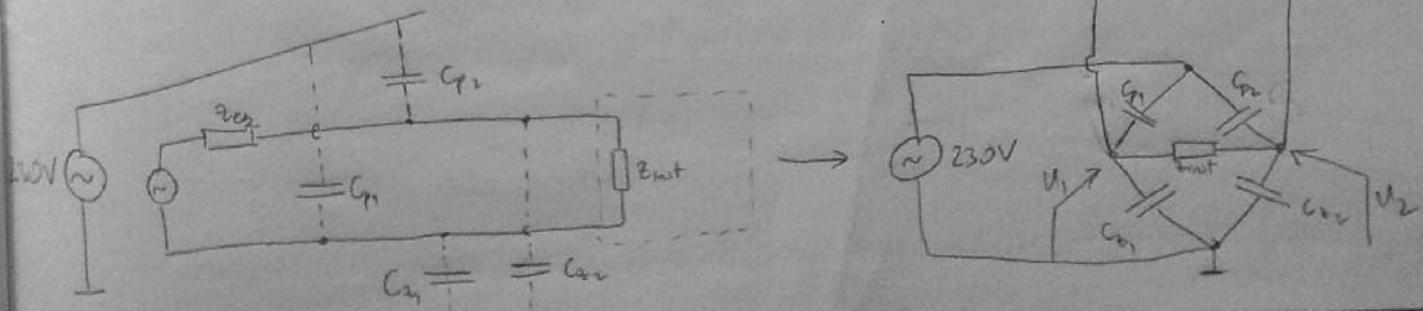
- u ovom slučaju sensor neće biti u kontekstu
uzemljenjem

PLIVAJUCI spoj

- u idealnom slučaju, impedančije z_1, z_2, z_3 i z_4 su veoma velike, te se struja ne izvraća preko njih (pa je serijski napon smetnje $U_{sm,ser} = 0V$)
- postoji paralelni napon smetnje, $U_{sm,par} = 230V$



- kod plivajućeg spoja, prisutni su rasipni kapaciteti prema zajedničkom potencijalu, koji porastom frekvencije dovode do pada impedančije
- u realnoj situaciji: zajedničke impedančije nisu beskonacne, već konacne i kapacitivnog karaktera \Rightarrow serijski napon smetnje je zanemarivo, a paralelni velik (kapacitivno djeluju)



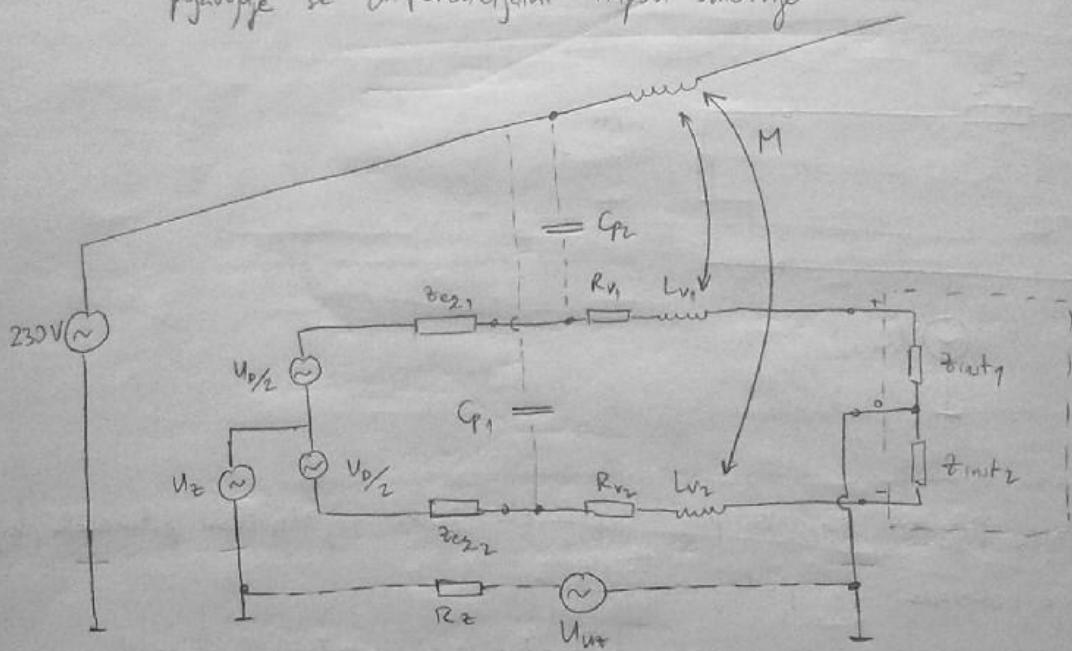
⇒ na ulazu mjenjачa instrumenta, napon je

$$U_D = U_1 - U_2 \quad U_Z = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

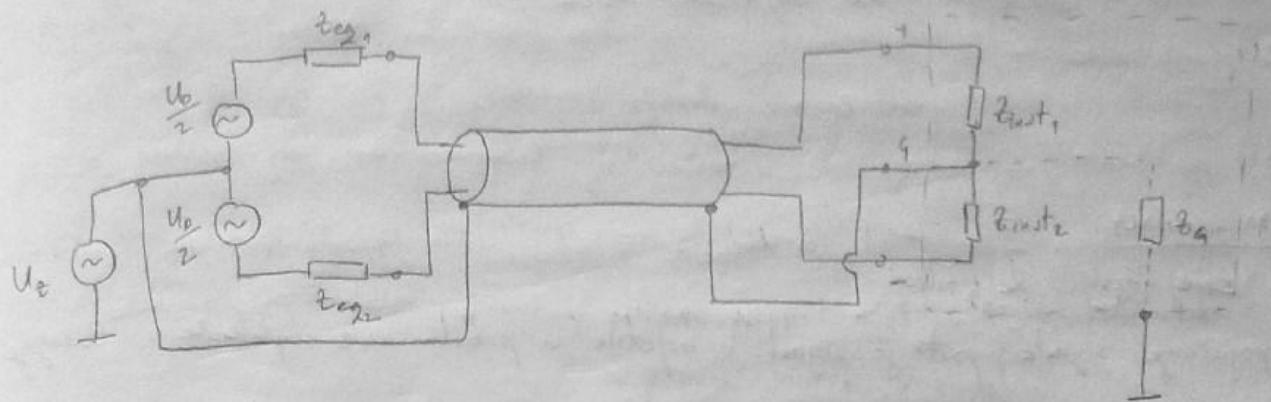
→ da bismo smanjili napon smetnje, kapaciteti C_{Z1} i C_{Z2} trebaju biti što manji i prilikom jednaka → to se kontrolira dizajnom

DIFERENCIJALNI spoj

- pri simetričnom spoju:
 - nema diferencijalnog napona smetnje
 - visok zadrživac (paralelni) napon smetnje onemogućava rad pojačala i potrebno ga je smanjiti
- u slučaju da impedancije izvora nisu simetrične (tipično kod mjeranja biomedicinskih signala) pojavljuje se diferencijalni napon smetnje



- ta otlanjanje smetnji kod dif. spoja, spojamo oklop kabela like sa:

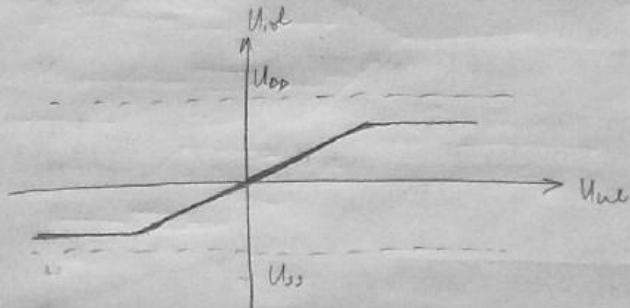


- 3. vr. povez. instrumenta s diferencijalnim ulazom se ne spoje u izmjerjaju; označava se kao guard priključnik (g)

P7 - POJAČALA — spolu u dloj pomoći: analogne obrade signala
elektroničkom signalom luku

ANALOGNA OBRADA SIGNALA

- funkcije koje obavljaju delovanje:
 - pojačava signale, posto je signal = osjetilo u prviku mreže amplitude, energije
 - linearizacija prijenosne karakteristike (npr. NTC otpornike \leftrightarrow mjerjenje temperature)
 - potiskivanje šuma i smetnje (princip električnih filtera \leftrightarrow oblikovanje spektra signala, smetnje i šuma)
 - usporedba s referentnom vrijednošću (ako se koristi analogni relac)
- tipična statička (prijenosna) karakteristika bloka za pojačanje signala = pojačanje sa zavojnjem



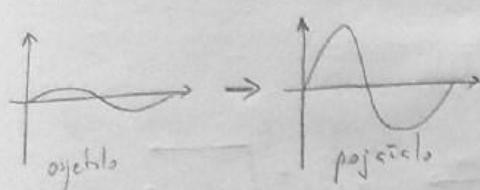
- kod analogne obrade: + jednostavnost
 - pamet mreže, temperaturna kloranje, šum, problem izvedbe memorije, nestabilnost

- tipična, dinamičke karakteristike bloka pojačanja signala su pravz, drugog reda
- važan parametar: linearnost faze karakteristike (tj. jednako kašnjuje svih komponenti koje su u spektru signala)

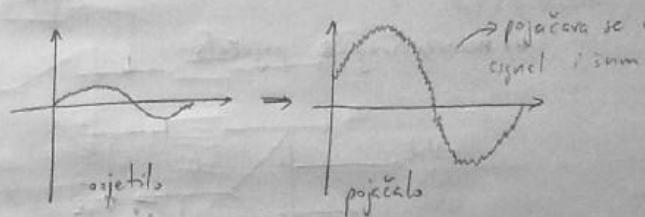
① POJAČANJE SIGNALA

- potrebno je pojačavati signal iz objekta, jer je on niske frekvencije; potrebno je je podići na razinu koja je potrebna za prikaz, prijenos ili A/D pretvorbu
- pri tome, delogorje je rješeno:
 - smetnjuju
 - sumu pasivnih i aktivenih komponenta
 - pomaknu nulte frekvencije
- kvaliteta pojačala ovisi o razini gornja tri utjecaja na signal (mjera $\frac{\text{signal}}{\text{smetnje}}$, tj. koliko dobro poštjuje smetnju, sum i pomak)
- znacičajke pojačala se mijenjaju (najčešće pogoršavaju) paratom frekvencije

IDEALNO:



REALNO:



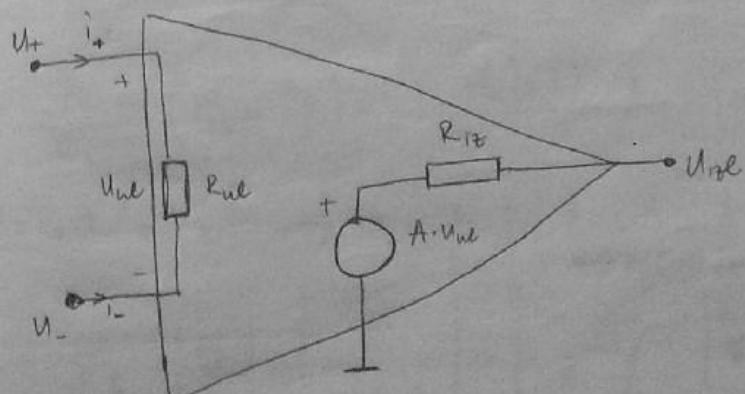
IZVEDBA pojačala:

- u praksi isključivo se koriste integrirana pojačala, zbog niske cijene i boljih tračajki u odnosu na diskretna
- najtračajniji vrsta su operacijska pojačala (opamp)

↳ u idealnoj izvedbi, imaju

- beskonačno pojačanje otvorene petlje
- neograničen frekvencijski pojas
- beskonačno veliki ulazni otpor
- izlazni otpor 0Ω

↳ moguće je izvesti različite funkcije sklopove uz minimalan broj vanjskih pasivnih komponenta

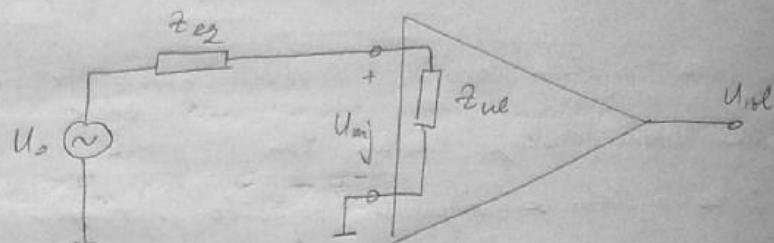


ZNAČAJKE POJAČALA

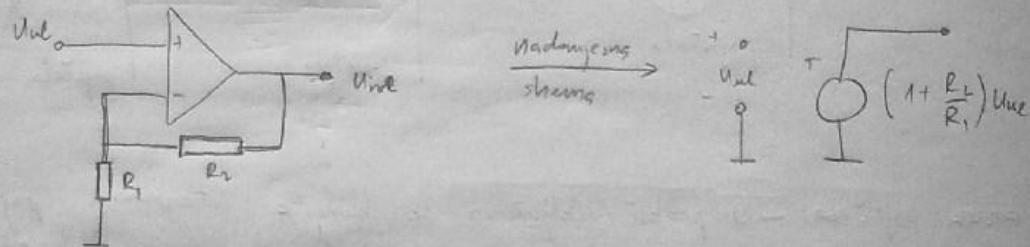
- 1.) izraz pojačanja - ovisi o pojačajuju otvorene petlje i pasivnim komponentama (R_i, C)
- 2.) ponost nule - ovisi o tehnologiji izvedbe pojačala, topologiji sklopa i temperaturnom području rada
- 3.) osjetljivost na smetnje - asimetrični spoj, diferencijalni spoj, plovajući spoj
- 4.) razina šuma - ovisi o izvedbi pojačala, pasivnim komponentama, temperaturi
- 5.) dinamičke karakteristike - frekvenčko područje, raspodjelica signala

OSNOVNI SPOJEVI OPERACIJSKOG POJAČALA

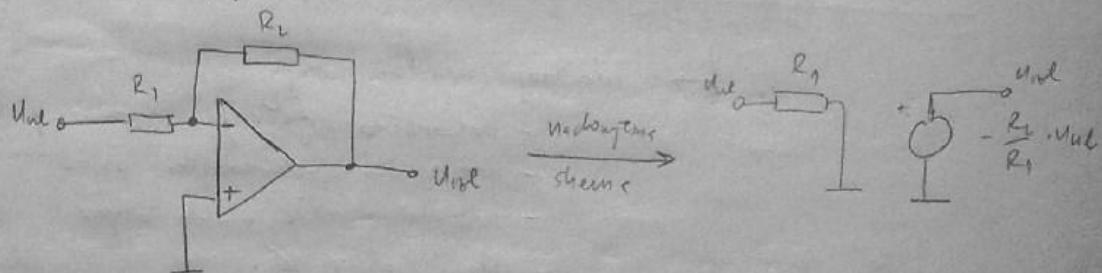
1) Asimetrični spoj



a) neinvertirajuće pojačalo

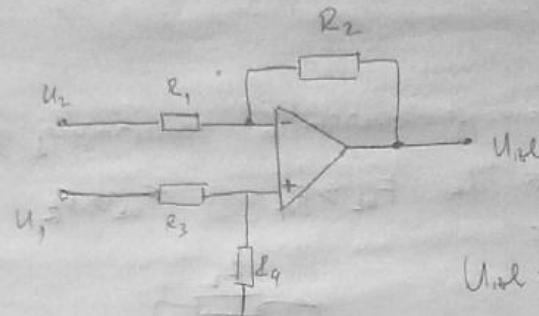
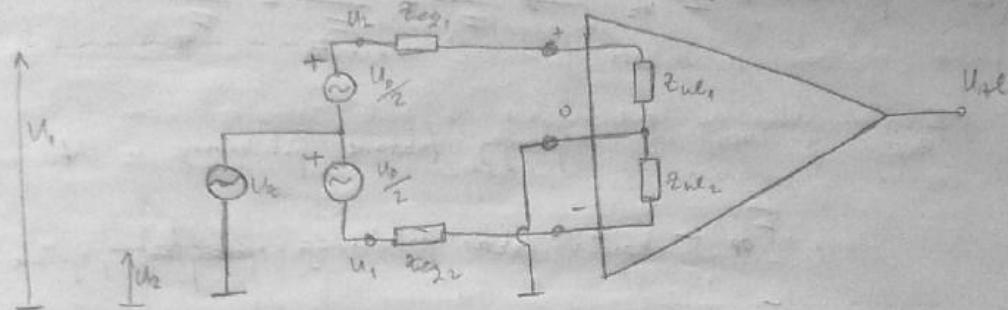


b) invertirajuće pojačalo



R : C)

2) Diferencijalni spoj \rightarrow diferencijalni pojačalo (izvedeno jednim operacijskim pojačalom)



$$U_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) U_1 - \frac{R_2}{R_1} U_2$$

- kod savremenog operacijskog pojačala

$$\rightarrow R_1 = R_3, R_2 = R_4$$

\Rightarrow pojačava se samo diferencijalni napon

\rightarrow diferencijalni napon se namjeni omjerom $\frac{R_2}{R_1}$

$$\rightarrow U_{out} = \frac{R_2}{R_1} (U_1 - U_2) = A_D \cdot U_D$$

- ulazni otpisi: • za diferencijalni napon $R_D = 2R_1$,

$$\bullet \text{za projekcijski napon } R_Z = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

- faktor potiskivanja: - pretpostavimo da imamo savremeno operacijsko pojačalo ($R_1 = R_3, R_2 = R_4$), ali da postoji mala nesteklostnost, $R'_2 = R_2(1-\varepsilon)$

$\rightarrow \varepsilon$ je faktor nemavatnosti ($\varepsilon \ll 1$)

$$U_{out} = - \frac{R_2(1-\varepsilon)}{R_1} \left(U_1 - \frac{U_D}{2}\right) + \frac{R_1 + R_2(1-\varepsilon)}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(U_2 + \frac{U_D}{2}\right)$$

$$U_{out} = A_D U_D + A_Z U_Z \quad \rightarrow \quad A_D = \frac{R_2}{R_1} \left(1 - \frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{\varepsilon}{2}\right), \quad A_Z = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \varepsilon$$

$$F_R = \left| \frac{A_D}{A_Z} \right| \approx \left| \frac{\frac{R_2}{R_1}}{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \varepsilon} \right| = \left| \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{\varepsilon} \right| = \left| \frac{1 + A_D}{\varepsilon} \right|$$

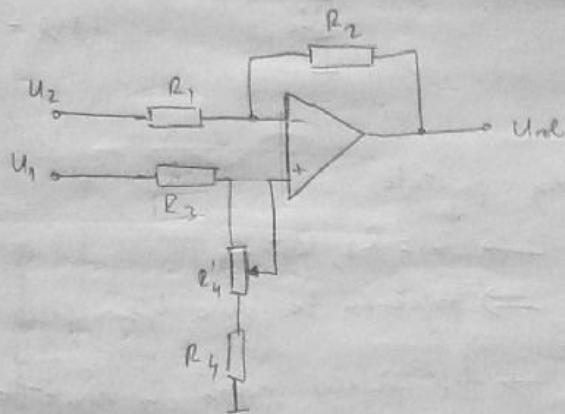
$$\text{ukupni faktor potiskivanja} = F_{\text{ukl}} \rightarrow \frac{1}{F_{\text{ukl}}} = \frac{1}{F_R} + \frac{1}{F_{\text{op}}}$$

- F_{ukl} je množi od nejednog faktora potiskivanja u dft. pojčaćalu

F_{op} - končani faktor potiskivanja operacijskog pojčićala (stupis 80dB)

F_R - faktor potiskivanja zbez neustalostnosti mreže otpornika

- F_{ukl} namještano potencijometrom u neinvertujućoj granu pojčićala, moguće je napraviti da $F_{\text{ukl}} > F_{\text{op}}$ i $F_{\text{ukl}} > F_R$



- nedostaci diferencijalnog pojčićala: - otpor rezora utječe na pojčanje i potiskivanje

$A_x(R_1, R_2)$ - dif. pojčaćala

$A_x(R_1, R_2)$ - komplikaciono je namještajuće pojčanje i potiskivanje

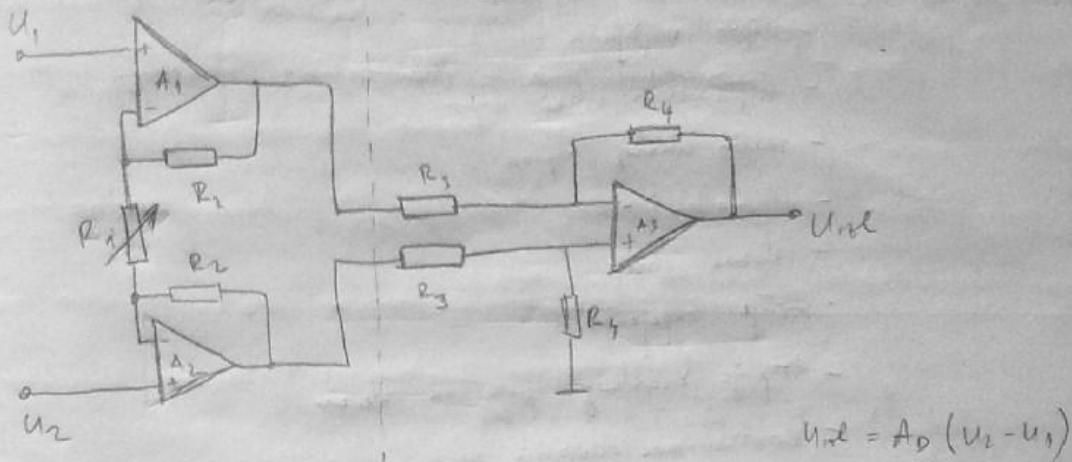
$$\frac{F_R F_{\text{op}}}{F_{\text{ukl}} + F_{\text{op}}} = T_R$$

$$F_{\text{ukl}} = \frac{F_R F_{\text{op}}}{T_R - F_{\text{op}}}$$

$$F_{\text{op}} \rightarrow \infty$$

INSTRUMENTACIJSKO POJĀČALO

- rješava nedostatke diferencijalnog pojāčala
- to je dvostrukopunjko pojāčalo s tri opampa



Učeni stupanj - odvojno diferencijalno pojāčalo sa simetričnim izlazom

- neinvertirajući spoj
- velik učeni otpor
- namještanje pograđanja otpornikom R_1
- $A_2 = 1$

drugi stupanj - diferencijalno pojāčalo s asimetričnim izlazom

- namještite se učenim potiskivanjem

$$A_D = A_{D_1} \cdot A_{D_2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \frac{R_4}{R_3}$$

ZNAČAJKE STVARENITI POJAČALA

- maksimalne dopuštenе vrijednosti (absolute maximum ratings) - ne smiju se prekoriti, da se prekoristi, sklop ne radi dobro, i li bude trajno oštećen
 - napon napajanja
 - diferencijski ulazni napon
 - raspon ulaznog napona
 - ulazna struje
 - izlazna struja
 - struje napajanja
 - trajanje kratkog spoja na rezistor
 - kontinuirana dissipacija snage
 - radna temperatura
 - temperatura skladističnja
 - temperatura lemljenja
- radne vrijednosti (recommended operating conditions)
 - napon napajanja
 - raspon ulaznog napona
 - trajednički ulazni napon
 - radna temperatura
- statičke i dinamičke neverfenosti
 - struje i naponi pomaka
 - strine fikrenog pojačaja
 - ujveća brzine porasta izlaznog napona

- uljni transistori operacijskih pojačala imaju karakterne statičke struje napajanja
 - te struje određene su topologijom i tehnologijom uljnih kruža
- uljne struje na streljkama, kao i naponi, se međusobno razlikuju
- proizvodci operacijskih pojačala deklariraju
 - uljnu struju (input bias current) kao srednju vrijednost struja napajanja

$$I_{\text{ulj}} = \frac{I_+ + I_-}{2}$$

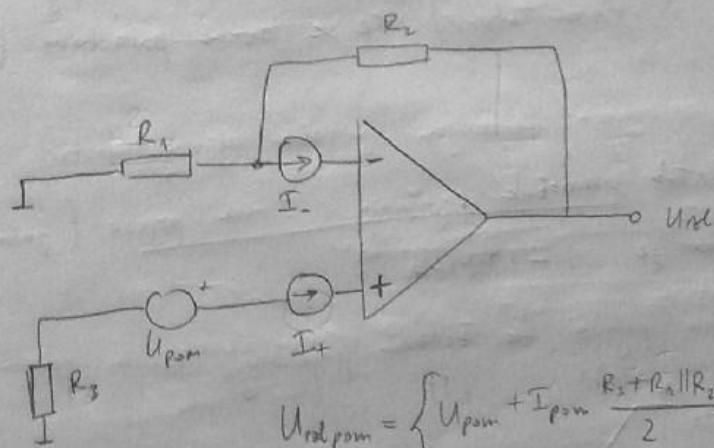
- Uljna struja pomaka (input offset current) kao razlika struja napajanja

$$I_{\text{pom}} = |I_+ - I_-|$$

- Uljni napon pomaka (input offset voltage)

- tipično su uljne struje $\mu A - 100 \mu A$, a ulj. naponi $\mu V - 1 \mu V$

- ukupni uljni napon pomaka određujemo kada su uljne približnice spojne na masu



$$U_{\text{ulj pom}} = \left\{ U_{\text{pom}} + I_{\text{pom}} \frac{R_3 + R_4 || R_2}{2} + I_{\text{ulj}} (R_3 - R_4 || R_2) \right\} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

- postojanje relativnog napona pomaka je temeljno ograničenje primjene operacijskih pojačala te istosmjernih naponi

- 3 komponente relativnog napona: pojačani uljni napon pomaka (uljni pojačalo je neinvertirajuće), komponentu uljne struje (eliminira se jednstrukim otporima u doje grane pojačala), komponentu uljne struje (smanjuje se smanjujući otporni)

- relativni napon pomaka može se kompenzirati:
 - u ravnotočnjem ulaznog kruga operacijskog pojačala
 - vanjskom kompenzacijском mrežom
- struje i napon se mijenjaju s temperaturom \rightarrow temperatura kloraju (temp. drift) \rightarrow onemogućena je kompenzacija ulaznog napona pomaka u širem temperaturnom rasponu
- kod mjerjenja malih istosmjernih naponova koriste se posebne izvedbe pojačala
 - s automatskim namještanjem nule (auto-zero amplifier)
 - s transpozicijskom frekvencijom (chopper amplifier)

AMPLITUDNO - FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA

- frekvencijski kompenzirani operacijsko pojačalo je sustav prvog reda
 - velik je pojčinjanje otvorene petlje (tipično 100 dB)
 - granična frekvencija je vrlo niska (5 Hz)
 - značajke sklopova izvedenih operacijskih pojačala ovise o pojčinju otvorene petlje (pojačanje, ulazni i izlazni otpor), te se kreće parastom frekvencije signala
 - za pojačala se daje podatak umnošak pojčinjanja i širine pojačaja (gain bandwidth product, GBP) \rightarrow tipično je 1 - 10 MHz
 - iz GBP procjenjujemo širinu pojačaja za željeno pojčinjanje
- $$GBP = A_v \cdot f_0 = A_v \cdot f_i$$
- frekvencijsko područje primjene operacijskih pojačala je vrlo 10 kHz

BRINA PORAŠTA IZLAZNOG NAPONA

- brina proučava izlaznog napona je:
- 1) ograničenjem struje u prvom stupnju pojačala
ograničenje se:
 - prethodne ulazne stepenje pojačala, I_m (redni veliki signal)
 - 2) kapacitivnim opterećenjem kompenzacijskog kondenzatora C_L u drugom stupnju pojačala

najveća brina porata napon, BP (slope rate) - tipične vrijednosti $0.1 \frac{V}{\mu s} - 10 \frac{V}{\mu s}$
 $(1000 \frac{V}{\mu s})$

$$\left(\frac{du_{re}}{dt} \right)_{max} = \frac{I_m}{C_L} \left[\frac{V}{\mu s} \right]$$

- najveća brina porata izlaznog napona ograničava gornju granicnu frekvenciju pojačala za redni veliki signal
- vrijeme porasta tr izlaznog napona ovisi o veličini naponu (dolazi do stabilizacije signala, ne ovisi o pojačanju)

$$t_r = \frac{0.8}{BP} U_m$$

- situacija napon \rightarrow određivanje gornje granicne frekvencije pojačala f_g

$$BP = \left(\frac{du_{re}}{dt} \right)_{max} = \omega U_m \Rightarrow f_m \leq \frac{BP}{2\pi U_m}$$

IZBOR OTPORNIKA U IZVEDBI POJAČALA

kriteriji:

- korisna smjeruje

- šum

- ukupni napon pomaka

- potrošnja delova

- stabilnost pojačala i granicne frekvencije

tipični otpornici do $10k\Omega$

P8 - ŠUM

šum = nepredviđeni signal koji ulazi u mjeri kruž (interference, disturbance)

šum = slučajne fluktuacije napona i struje elementa električnih sklopova

- šum postoji inherentno u mjenjem kruži (od osjetila do AD pretvarača)
- šum je posljedica fizičkih procesa u električnim komponentama, te je temeljno ograničenje preciznosti mjeranja

- sklopke za predobradu i pojačanje signala mora minimalno povećati Σn osjetila
- mjerila za ta kriterije je omjer signala i šuma (signal-to-noise ratio)
- primični Σn je empirijska procjena

PARAMETRI ŠUMA

- šum je slučajni signal, što znači da su mu frekvenčne komponente slučajne po amplitudi i fazi
- u vremenskoj domeni, šum opisujuemo funkcijom gustoće vjerojatnosti

SNAGA ŠUMA = srednja kvadratna vrijednost napona/struje

↳ mjeri se efektivna vrijednost napona/struje šuma, u određenom frekvenčnom području

- frekvenčna raspodjela srednje kvadratne vrijednosti daje spektralnu gustoću snage šuma

prijevozne parametre. Sinaus: sljedeći signal s sinusovom funkcijom, gustoću vjerojatnosti

- opisuje učestalost pojava neke vrijednosti napona
- srednja vrijednost napona

$$\bar{U}_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_n(t) dt = \mu [V]$$

- srednja kvadratna vrijednost napona = snaga

$$\overline{\bar{U}_n^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_n^2(t) dt = P [V^2]$$

- efektivna vrijednost napona (RMS)

$$U_{nRMS} = \sqrt{\overline{\bar{U}_n^2}}$$

→ std. devijacija σ , 99.7% vremenska vrijednost Gaussova sume je unutar $\pm 3\sigma$

- spektralna gustoća snage sume

→ konstantna na Gaussovu sumu (lijeli řim)

$$\overline{\bar{U}_n^2} = \int_0^\infty S(f) df, \quad S(f) = U_n^2(f) [V^2/\text{Hz}]$$

TERMICKI ŠUM (thermal/Johnson/Nyquist noise)

- termički šum je posledica kaotičnog gibanja nosilaca vredna u vodiču (to kaotično gibanje rezervisano je toploškom energijom)
- termički šum ima Gaussov razdobljeni gustoću vjerojatnosti \rightarrow bijeli šum

snaga Šuma u vodiču:

$$P_n = kT\alpha f$$

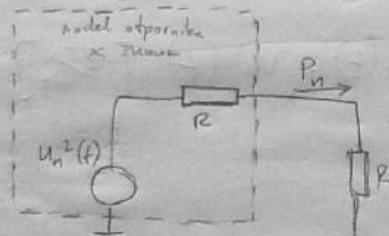
$$k = 1.382 \cdot 10^{-23} \frac{W_s}{K}$$

\hookrightarrow Boltzmannove konstante

$T \rightarrow$ apsolutna temperatura u kelvinima

$\alpha f \rightarrow$ srednja frekvencija pojava u Hz

Nedeljenji izvor Šuma:



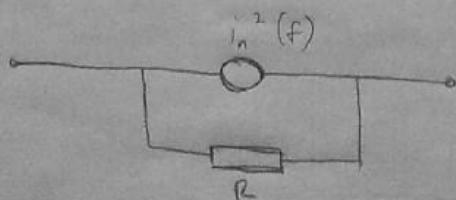
$$P_n = kT\alpha f = \frac{\overline{U_n^2}}{4R}$$

Neponisti nedeljenji izvor:



$$U_{n,RMS} = \sqrt{4kTR\alpha f} [V]$$

strujni nedeljenji izvor:



$$I_{n,RMS} = \sqrt{\frac{4kT\alpha f}{R}} [A]$$

- spektralna gustoća snage Šuma (termički sum je bijeli sum, pa je $\omega(t)$ konstanta)

$$S(f) \sim U_n^2(f) \sim \frac{U_n^2}{\pi f} = 4kT R \left[\frac{V^2}{f Hz} \right]$$

- pogona raspodjela Šuma:

$$4kT = 16 \cdot 10^{-21} \text{ W}, \Rightarrow T = 2.30 \text{ K}$$

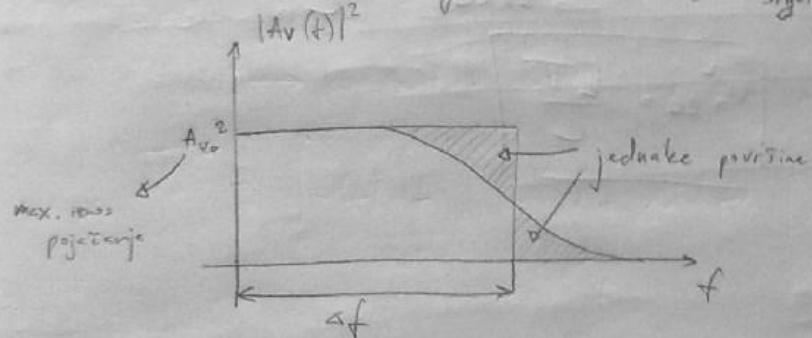
$$\rightarrow 1 \text{ k} \Omega, 1 \text{ Hz} \rightarrow 4_{\text{in}} V_{\text{RMS}}$$

$$\rightarrow 1 \text{ k} \Omega, 10 \text{ kHz} \rightarrow 400_{\text{in}} V_{\text{RMS}}$$

ŠIRINA FREKVENCIJSKOG POJASA ŠUMA

- Šum se javlja na izlazu pojačala, i tada je njegova spektralna gustoća oblikovana prenosom funkcijom pojačaja

- Širina frekvencijskog područja te ŠUM nije ista kao te signal



$$\Delta f = \frac{1}{A_{V_0}^2} \int_0^\infty |A_v(f)|^2 df$$

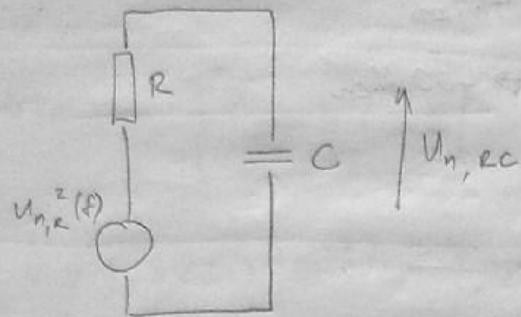
Primer: za sustav • 1. reda $\Delta f = 1.57 f_g$

• 2. reda $\Delta f = 1.22 f_g$

• 3. reda $\Delta f = 1.15 f_g$

TERMICKI SUM RC ČLANA

- strani otpornici imaju parazitne kapacitete, koji određuju širinu frekvenčnog pojasa napona sume otpornika
- efektivna vrijednost napona sume koja se može isjaviti u RC -članu ovise
 - o temperaturi i kapacitetu



$$U_{n,RC}^2 = \int_0^\infty U_{n,R}^2(f) |A_v(f)|^2 df = \int_0^\infty U_{n,R}^2(f) \cdot \left| \frac{1}{R + \frac{1}{j2\pi f C}} \right|^2 df$$

$$U_{n,RC}^2 = 2\pi k T R \cdot \frac{1}{2\pi R C} = \frac{k T}{C}$$

$$\boxed{U_{n,RC}^2 = \frac{k T}{C}}$$

ZUM SAČME (shot/Schottky noise)

- zum sačme javlja se pri protjecanju struje diodom, tranzistorom i elektronskim cjevima
- diskretni prirodni električne struje, to je Gaussov sluzajni proces ; srednja vrijednost 0

SNAGA ZUMA SAČME - ne ovisi o temperaturi, već o srednjoj struci PN spoja

$$\overline{I_n^2} = 2g I_{DC} \text{ af } [A^2]$$

↳ nebitne elektrone

- zum sačme je bijeli sum, pa mu je spektralna gustoća snage konstantna

$$S(f) = i_n^2(f) = 2 \cdot g \cdot I_{DC} \left[\frac{A^2}{Hz} \right]$$

1/f SUM (1/f bl. flicker/contact noise)

- 1/f sum je posljedice površinskih efekata kod tranzistora i otpornika

- spektralne gustoće snage : $S(f) = U_n^2(f) = \frac{K}{f^\alpha} \left[\frac{V^2}{Hz} \right]$

$$\alpha \approx 1 \quad (0.8 < \alpha < 1.3)$$

↳ niže frekvencije više doprinose snazi

- snaga :

$$P_n(f) = K_f \int_{f_d}^{f_2} \frac{df}{f} = K_f \ln \frac{f_2}{f_d}$$

$$f_2 = 10 f_d, \quad P_n(\text{dekade}) = 2.3 K_f$$

→ svake dekade frekvenčnog pojasa jednako doprinosi snazi, a ukupna snaga raste s korištenom broj dekada

- problematично je izmeriti 1/f sum na velikim frekvencijama

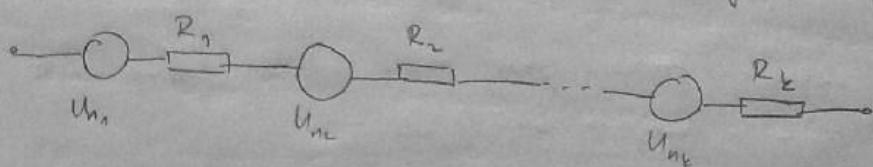
- izražava se u vršnoj vrijednosti napona sume (V_{pp}) u definisanim frekvenčnim području, tipično 0.1 - 10 Hz

SPECIFIKACIJA PODATAVA O SUMI

- ukupni sum pojačala ovisti o:
 - 1) izvorima sum pojedine komponente pojačale
 - 2) obliku i sivim pojase amplitudne - frekvenčne karakteristike pojačala
- izvori sumi su definirani s:
 - 1) spektralnom gustoćom snage ($u_n^2(t) \left[\frac{V^2}{Hz} \right]$ za neperiodički izvor, $i_n^2(t) \left[\frac{A^2}{Hz} \right]$ za struju izvor)
 - 2) spektralnom gustoćom napona ($u_n(t) \left[\frac{V}{Hz} \right]$) ili struje ($i_n(t) \left[\frac{A}{Hz} \right]$)
- podaci o sumi daju se:
 - 1) grafiki - dejagramom
 - 2) brojčano \rightarrow za linijski sum $\frac{nV}{Hz}$, $\frac{pA}{Hz}$ je mrežni faktor.
 \rightarrow za $1/f$ sum nV_{pp} u nekom frekvenčnom području ($0, 1-10Hz$)

SUMIRANJE NAPONA SUMI

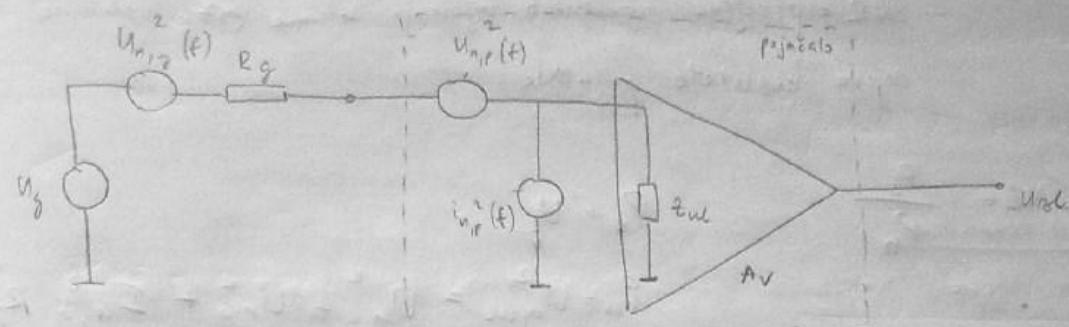
- kad određujemo ukupni sum, zbrojimo snage pojedinih izvora sumi
- pritom pretpostavljamo da su to međusobno neovisni slučajni procesi
- snage mogu biti izražene efektivnom vrijednošću $[V^2]$ ili spektralnom gustoćom $\left[\frac{V^2}{Hz} \right]$
- ukupni napon sumi određen je velinom od napona (10:1 je tanumirivo)



$$U_{n, \text{totalni}}^2 = U_{n_1}^2 + \dots + U_{n_k}^2$$

$$U_{n, \text{totalni RMS}} = \sqrt{U_{n, \text{tot}}^2}$$

MODEL SUMA POJĀČALA



model pojāčala:

- pojāčal s ulatnou impedanciou - bez U_d a R_g
- napomali reakcii sumy pojāčala (mjenimo na krateko spojen reakcii)
- strany reakcii sumy pojāčala (mjeni se na otvoren ulat)

model izvara signala:

- napomali reakcii termickej sumy s ulatnou impedanciou
- itkon su metusoben neovisni

ukupna spektralna hustota sumy na ulatu pojāčala

$$U_{n,ul}^2 = \left| \frac{Z_{ul}}{Z_{ul} + R_g} \right|^2 \cdot U_{n1g}^2(t) + \left| \frac{Z_{ul}}{Z_{ul} + R_g} \right|^2 U_{n1p}^2(t) + \left| \frac{R_g Z_{ul}}{Z_{ul} + R_g} \right|^2 i_{n1p}^2(t) =$$

$$= \left| \frac{Z_{ul}}{Z_{ul} + R_g} \right|^2 (U_{n1g}^2(t) + U_{n1p}^2(t) + R_g^2 i_{n1p}^2(t))$$

$$\text{-- teda } |Z_{ul}| \gg R_g \rightarrow U_{n,ul}^2 = U_{n1g}^2(t) + U_{n1p}^2(t) + R_g^2 i_{n1p}^2(t)$$

SUM POJĀČALA - zavire nos SNR na ulazu

- SNR = proporcija preciznosti mjerene ulazne fre. veličine (mjeru) i
mjerene kvalitete pojāčale

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}$$

$$P_s = U_s^2$$

$$P_n = U_{n,\text{tot}}^2 = U_{n,\text{d}}^2 + U_{n,\text{ir}}^2 + I_{n,\text{ir}}^2 R_s^2$$

$$\boxed{SNR = \frac{U_s^2}{U_{n,\text{d}}^2 + U_{n,\text{ir}}^2 + I_{n,\text{ir}}^2 R_s^2}}$$

- faktor sume pojāčala $F \rightarrow$ odnos SNR na ulazu : na polazu

↓
term. sum generatora

↓
sum gen. i
pojāčala

$\Rightarrow 1$, mjeru je za usporedbu pojāčala

$$\boxed{F = \frac{U_{n,\text{d}}^2 + U_{n,\text{ir}}^2 + I_{n,\text{ir}}^2 R_s^2}{U_{n,\text{tot}}^2}}$$

- napravak i strujni sum pojāčala \rightarrow spektralna gustoća snage je kombinacija frek. svih sume

- operatorki, prijenosne funkcije pojāčala nisu iste za sve frekvencije \Rightarrow za svaki mjer
 $U_{n,\text{tot}}^2$ se odredi prijenosne funkcije $H_k(f)$ i njegova spektralna gustoća na ulazu
pojāčala, te sumiranjem svih doprinosa dobivaju se ukupni ulazni signal (1)

- snaga sume na ulazu pojāčala određujemo integriranjem spektralne gustoće

- ekvivalentni ulazni mjeni sume dobije se djelovanjem s max. pojačanjem na ulazu
sigurni (2) $(1) S_{\text{tot}}(f) = \sum_k |H_k(f)|^2 S_k(f)$

$$(2) U_{n,\text{tot}}^2(f) = \sum_k |H_k(f)|^2 U_{n,k}^2(f)$$

$$(3) U_{n,\text{tot}}^2 = \frac{1}{|\Delta_{\text{vs}}|^2} \int_0^\infty S_{\text{tot}}(f) df = \frac{1}{|\Delta_{\text{vs}}|^2} \sum_k U_{n,k}^2(f) df$$

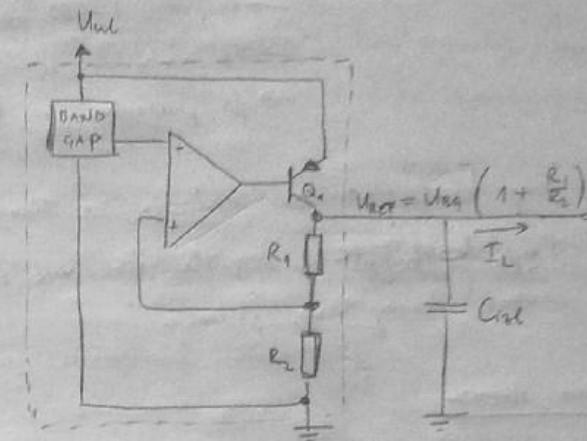
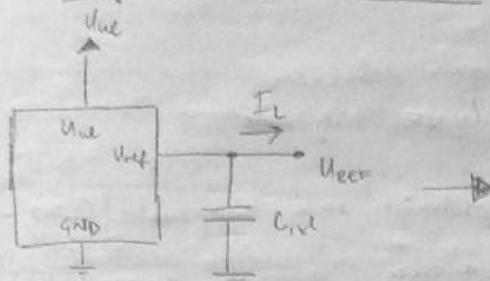
pg - Izvori referentnog napona

- biti da elektronika ujednači napon, uspostiti se s ujednjom napona

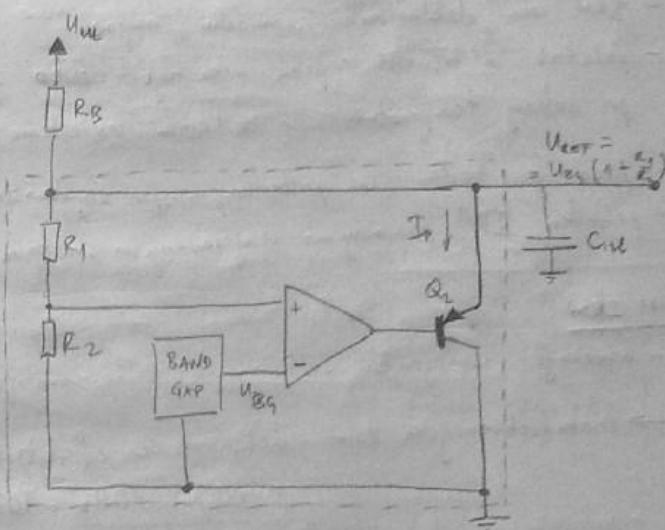
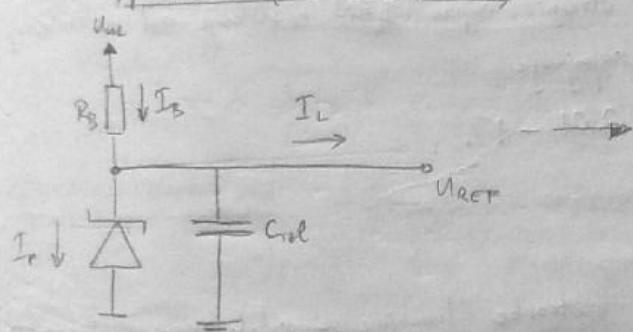
- duž konstrukcije tako da AD/DA prevođi te u upoštevanju rezistorima

izvori - moguće ih je spojiti

1) serijski (series reference)



2) paralelni (shunt reference)



- kod serijskog, napon na rezistoru regulira se naponom serijskog članistora

- kod paralelnog, napon na rezistoru regulira se tako da paralelni transistor odredi visok struju

SERIJSKI IRN: - troše manje struje (dejstvo struje kod je potreban)

- mogu se istključiti

PARALELNI IRN: - troše ukupnu struju dvostruko i struju reference

- veća fleksibilnost obveza (raspon učinkovog napona, dobivanje negativnih naponi ili povećanje reference)

- kod malih struja rezistor ($100\mu A$), rezistor u potrošnji je benefičniji

Značaj IRN-a - temp. koeficijent, dočinot napona, emisija, termički bistevi, dugotrajnost, stabilitat, regulacija i proujanje opterecenja, regulacija i proujanje napajanja, rucki napon, potrošnja

• TEMPERATURNI KOEFICIJENT

- proujanu U_{eff} izračavamo preko temperaturnog koeficijenta u ppm/°C
 - raspon 1-100 ppm/°C
 - temperaturna ovisnost je u pravilu neLinearna
 - pri proizvodnji se koristi doppia: više reda
- temp. koeficijent se specificira za temperaturna područja rade komponente (0-70, -40-85-100)
- temp. koeficijent se najčešće mjeruju u razliku najvećeg i najmanjeg napona IRN proujana unutar danog temp. područja

• TOČNOST NAPONA

- IRN ima deklarirani nominalni napon
- podatak o točnosti napona pokazuje koliko se strani napon IRN razlikuje od nominalnog pri sobnoj temperaturi i učinku utjecima napajajući
- tipično je zadan u postocima, raspon vrijednosti 0.01 - 1%
- pogrešku IRN popravljamo ujednavanjem sustava

• ŠUM IRN

- izraknjuje smanjenje SNR-a digitalno-analogne pretvorbe (smanjuje se efektivna razlučinost)
 - visokofrekvenjski šum - definira se efektivnom vrijednošću napona za frekvenjsko područje 10Hz - 10kHz
 - utjecaj širokopojasnog šuma ovisi o frekvenjskom pojasu korisnog signala
 - širokopojasni šum je u pravilu manji problem za IRN i moguće ga je filtrirati
- niskofrekvenjski šum
 - definira se V_{pp} (šuma) u frekvenjskom pojasu 0,1Hz - 10Hz
 - ovaj šum je uglavnom $\frac{1}{f}$ tipa
 - postoje nepraktično filtrirati napone ispod 10Hz, ovaj šum moramo pridobijati ukupnj pojačici pretvorbe
 - IRN koji nema u ugrađeno pojačalo imaju manji niskofrekvenjski šum

TERMICKA HISTEREZE = posek u vrijednosti referentnog napona, nastaje zbog jednog ili više termičkih efekata

- provjerava se u ppm
- provodostći određuju "tipičnu" vrijednost
- ne provjerava se u provodnosti

- termički ciklus - definiran kao promjene temperature od sobne, da najniže, zatim do najviše radne temperature i konično natrag do sobne temperature
- primjene neva veliki raspon temperature, ali progrijavanje može nastati kad ugradjuje/isključuje
- promjene napona - izazvane mehaničkim naprezanjima polovodičke pločice u čipu, naprezanja kušnje i stisknih plastičnih
- u pravilu, komponente u velikim kušnjama imaju manju termičku histerezu

DUGOTRJANA STABILNOST - pokazuje promjenu napona IRN nekoliko 1000 sati kontinuiranog rada u nominalnim uvjetima

- grubo progona stabilnosti napone bez radnog vremena
- postoje dugotrajna stabilnost u kojoj logaritamski s временom, velina promjene napona se dogodi u prvih 1000 sati
- ne provjerava se u provodnosti

- mehaničke naprezanja uzrokuju pomicanje referentnog napona (potrebno je voditi računa o izboru kušnje i položaju na PCB)

REGULACIJA NAPONA IRN - definira se u odnosu na:

- 1) promjeni struje opterećenja = STRUJNA REGULACIJA (load regulation)
- 2) promjeni napona napajanja IRN = NAPONSKA REGULACIJA (line regulation)

RADNI NAPON I POTEŠIĆNA IRN

- kad je potreban kritičan parametar, bolje je odlabrobiti senzori IRN
 - im tipično vrijeme struje od 15 μA do 250 μA, minimum je oko 1 μA
 - smanjuje struje uzrokuje smanjene preciznosti (rušte TC, netočnost) i porast šuma
 - senzori IRN imaju mogućnost izbjegavanja → moguće smanjiti potrošnju
- senzori IRN mogu raditi s vrlo malim rezistivama napona na ulazu i izlazu (dropout), reda veličine 200 mV
- problem kod paralelnih: mala razlika napona zahtijeva mali senzori otpor ⇒ velike promjene struje s promjenom ulaznog napona
- Iako se često koriste u impulsnom režimu, bitno je da imaju bilo kojeg kondenzator

ODABIR IRN

- prava kriterijuma aplikacije: - nominalni UREF
 - raspon ulaznog napona (najveća)
 - izlazna struja
 - potrošnja
 - veličina kućišta
- sljedeći kriterij: - točnost A/D pretvarbe (mjereno u LSB)
 - pretvarba LSB - ppm:
$$LSB(\text{ppm}) = 10^6 \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow 8\text{bit} \approx 3906 \text{ppm}, 10\text{bit} \approx 977 \text{ppm}, 16\text{bit} \approx 15 \text{ppm}$$
- točnost A/D pretvarbe: - zbog pogreške referentnog napona, događa se pogreška pojačanja (objektivna)
 - ADP
 - može povećati zubljak dinamičkog područja te ulaze signale blizu napona punih skala
 - pogreška je najveća na gornjem rubu prenosne karakteristike
 - pri odabiru IRN, dobro je ograniti dozvoljenu pogrešku preko pogreške pojačanja

UKUPNA POGREŠKA IRN

- konzervativna procjena (zbog pojedinačnih vrijednosti), ih efektivne vrijednosti i pretpostavku statističke neovisnosti
- kod nekih pogrešaka javni su najveće vrijednosti (T_C , inačice potroš, napona, i strujne regulacije)
- postupak prognoze pogreške te njihovi slučajevi, $p(\text{garantiran}) \rightarrow T_C$ u najvećem broju slučajeva dominira nad ostalim pogreškama

$$p(\text{temp}) = T_C (T_{\max} - T_{\min})$$

$$p(\text{load}) = \text{load-reg} (I(\text{load-max}) - I(\text{load-min}))$$

$$p(\text{line}) = \text{line-reg} (U(\text{in-max}) - U(\text{in-min}))$$

$$\boxed{P_{\text{garan}} = p_{\text{in-acc}} + p_{\text{temp}} + p_{\text{load}} + p_{\text{line}}}$$

- ostale pogreške su dana teža tipične vrijednosti (izm, termička histeresa, dugotrajna stabilnost)

- najveći slučaj je histeresa i stabilnost se određuje množenjem s 3(4)

- utjecaj NF izmene (0.1 do 10 Hz) određuje se uz pretpostavku da je $U_{REF} = 10$ sekundni promjeni se vrijednost izmene od vrha do vrha

→ pogreška u [ppm] treba pretvoriti u [LSB] te dani ADP

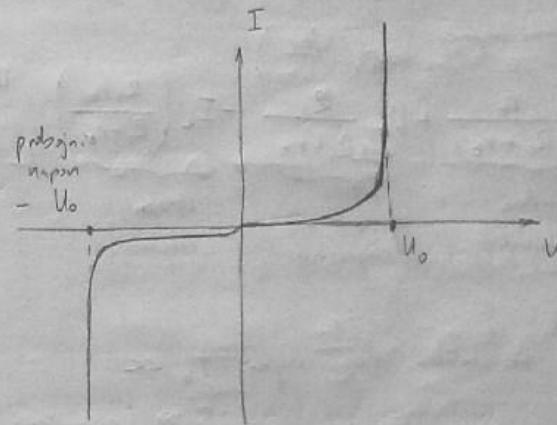
$$p(\text{therm-hist}) \approx 3 (\text{tip-therm-hist})$$

$$p(\text{longterm-stability}) \approx 3 (\text{tip-longterm-stability})$$

$$p(\text{NF-noise}) \approx 10^6 \left(\frac{U_{noise-rr} (0.1 - 10 \text{ Hz})}{U_{REF}} \right)$$

$$p(\text{total}) \approx p(\text{gorenje}) + p(\text{therm-hist}) + p(\text{longterm-stab}) + p(\text{NF-noise})$$

IZM SA ZENER DIODOM



- Zener dioda radi u području probaja (zadovolje polaritaciju)

→ tunelasti probaj ($< 5 \text{ V}$)

→ lavinski probaj ($> 5 \text{ V}$)

- struktura diode slična je signalnoj diodi, ali je razlike u koncentraciji primjesa

- probajni napon - ovisi o otpornosti pn spoja (koncentraciji primjesa)

→ kod komercijalnih dioda u rasponu 2-200V, tolerancije 5%

- može u rasponu 0.25 W - 50W

- dobiv zener dioda: - mala reverzna struja do probaja, velik proučišten napon sa strujom u toku probaja

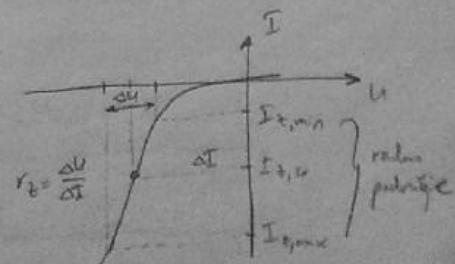
- minimalna radna struja: određena stabilnosti naponu

- maksimalna radna struja: određena dozvoljenom dissipacijom snage na diodi

$$\text{dinamički otpor: } r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

→ ovisi o radnoj fazi

→ specificira se za struju ne srednji radnog područja



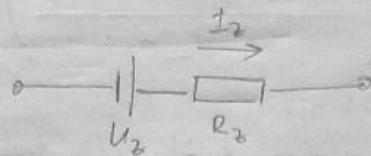
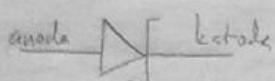
- strmna karakteristika zener diode (dinamički otpor) ovisi o razdvojenim naponu (koncentraciji) portajućeg
- dinamički otpor je ujedno i oba probajnog napona 5V (ujedno je konstantan)

- uz porast temperature, probajni napon
 - pada sa $U_2 < 5V$ (trudniji probaj)
 - raste sa $U_2 > 5V$ (lakniji probaj)

- temperaturni koeficijent zenerovog napona:

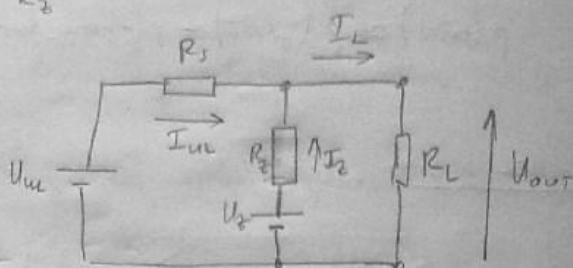
$$k_T = \frac{\Delta U_2}{\Delta T}$$

Spajanje zenerove diode



izvor se izlazi napon

$$U_{out} = U_{in} \underbrace{\frac{r_s}{R_s + r_z}}_{\text{napon je regulacije}} + U_z \underbrace{\frac{R_s}{R_s + r_z}}_{\text{avizost temperature}} - I_L \left(\frac{R_s r_z}{R_s + r_z} \right) \underbrace{- I_L}_{\text{struja regulacije}}$$



→ za stabilan izlazni napon: $r_z \ll$

- $R_s \gg$ (ograničuje $I_{z\min}$, može)

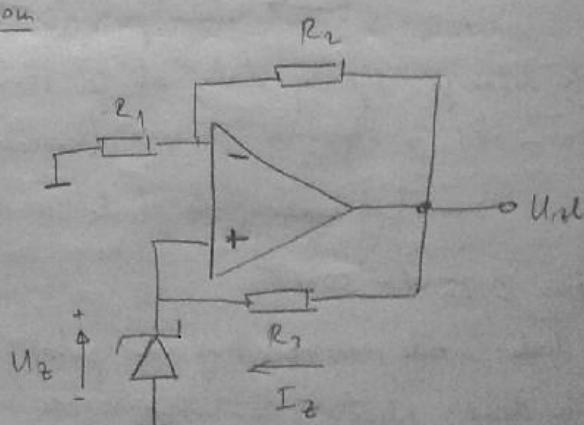
- $U_{in} \approx (2-4)U_z$

- $I_{z\min} \approx \frac{1}{4} I_{z\max}$

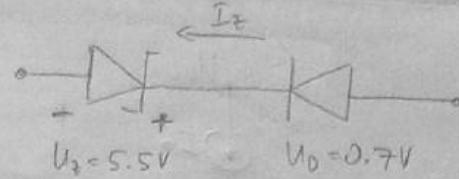
Spoj zenerove diode s operacijskim pojačalom

- kompenzacija promjena napona nepravljajući i
kereta

- neuna temperaturne kompenzacije



temperaturna kompenzacija



- idej: pouščanje temperaturnih koeficijenata zenerove i signalnih diode
→ konstan. temp. koeficijent do $1 \text{ ppm}/\text{C}$ ($5-100$)

→ PROBLEM: raste radni napon

- dvečji pristop:
 - temperaturna stabilizacija
 - termostatirano regeneriranje na višoki temp (90°C)

TEMPERATURNA SVENOST NAPONA PN-spoja

najprej:

$$U_D = U_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right)$$

napona
ekvivalent
temperature: $U_T = \frac{kT}{2}$

struje zasnovanje: $I_S = \frac{kT^3}{2} \exp \left(- \frac{U_{GO}}{U_T} \right)$ $\rightarrow U_{GO} = 1.205 \text{ V}$, finito
konstante
zakrivljen pojas (bandgap) Si

temperaturni koeficijent: ($^\circ\text{C}$):

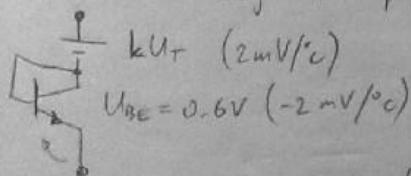
$$TC(U_T) = \frac{k}{2} = 0.0862 \frac{\text{mV}}{\text{C}}$$

$$TC(U_D) = \frac{\partial U_D}{\partial T} = \frac{\partial U_T}{\partial T} \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) + U_T \frac{\partial \left[\ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \right]}{\partial T}$$

$$TC(U_D) = \frac{U_D}{T} - U_T \frac{\partial \left(3 \ln T - \frac{U_{GO}}{U_T} \right)}{\partial T} = - \left(\frac{U_{GO} - U_D}{T} + \frac{3k}{2} \right)$$

$$T = 25^\circ\text{C}, U_D = 650 \text{ mV} \Rightarrow TC(U_D) \approx -2.1 \text{ mV}/\text{C}$$

- Idej: temperaturna kompenzacija: s pomočjo napon diode (transistora) s negativnim temperaturnim koeficijentom ($CTAT = \text{Complementary To Absolute Temperature}$) s istovrem. logično pozitivnim temp. koeficijentom ($PTAT = \text{Proportional} \dots$)



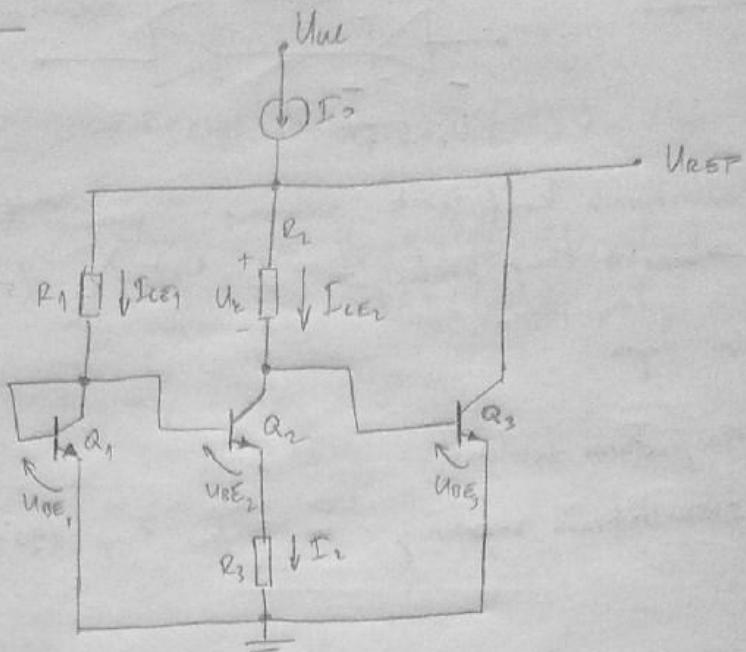
$$U_{BQ} = kU_T + U_{BE}$$

$$TC(U_{BQ}) = kTC(U_T) + TC(U_{BE}) = 0$$

$$k = - \frac{+c(U_{BE})}{TC(U_T)} = \frac{U_{GO} - U_{BE}}{U_T} + 3 \Rightarrow U_{BQ} = U_{GO} + 3U_T$$

$$U_{BQ}(25^\circ\text{C}) \approx 1.282 \text{ V}$$

BANDGAP TIE IRD



$$I_2 = \frac{U_{OE_1} - U_{BE_2}}{R_3} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_3}$$

$$I_{CE} = I_S \exp\left(\frac{U_{OE}}{V_T}\right)$$

$$U_{BE} = V_T \ln \frac{I_C}{I_S} \rightarrow \Delta U_{BE} = V_T \ln \frac{I_{CE1}}{I_{CE2}}$$

$$I_{S1} = I_{S2}, \beta > 1$$

$$I_{CE2} \approx I_2 = \frac{V_T}{R_3} \ln \frac{I_{CE1}}{I_{CE2}}$$

$$\boxed{U_2 = R_2 \cdot I_2 = V_T \frac{R_2}{R_3} \ln \frac{I_{CE1}}{I_{CE2}}} \approx 23.2 V_T$$

$$\boxed{U_{REF} = U_{BE} + U_2} = 0.6 + 23.2 \cdot 26 \cdot 10^{-3} = 1.203 V$$

ZENER (BURIED) VS. BANDGAP

	ZENER (BURIED)	BANDGAP
nepajajuje i radne struje	nepajanje $> 5V$ (napon 5-7V, nepajanje 10V) radne struje 1 - 10mA	nepajanje $< 5V$ radne struje $> 100\mu A$
šum	nižak za veliku snagu	visok za veliku snagu \rightarrow šum se okreće s naponom DCR \rightarrow smanjenje NF šuma \Rightarrow \Rightarrow povećati radne struje i povećati transistor (bušišta i potrošnja)
dugotrajna stabilnost i temp. kvaranje	dobro	pogrešno
histerezis	projekčna	projekčna
točnost	0.01 - 0.1%	0.05 - 0.1%