

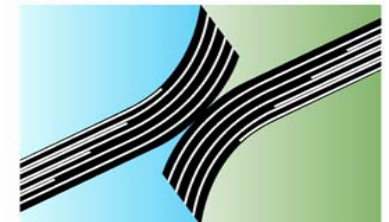
EKSPERIMENTALNE METODE

Alojzij Sluga

Univerza v Ljubljani – Fakulteta za strojništvo

Katedra za kibernetiko, mehatroniko in proizvodno inženirstvo

*Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo*



2005/2006

EKSPERIMENTALNE METODE

2005/2006

45/30

Učitelj:

Alojzij Sluga, S-65, tel. 749

Asistent koordinator:

Janez Lap, S-66, tel. 747

Predavanja: ob torkih 7.30-10.00

Vaje: laboratorijske po razporedu 5 vaj po 6 ur

Predavanja bazirajo na predavanjih Eksperimentalne metode prof. Peklenika.

Priporočena literatura:

Peklenik, Janez. Eksperimentalne metode in merilni sistemi, skripta, FS UL, 1999 (ponatis)

Doebelin O.E. Measurement Systems Application and Design, McGrawHill

Grabec, Igor, Gradišek, Janez. Opis naključnih pojavov. Ljubljana: FS UL, 2000.

Priporočeno predznanje: fizika, elektrotehnika, opis naključnih pojavov, tehnična kibernetika. Predloženo učno gradivo je namenjeno izključno za pomoč pri predmetu Eksperimentalne metode za slušatelje/ice Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, ki imajo predmet vpisan v š.l. 2005/06. Razmnoževanje, posredovanje učnega gradiva tretjim osebam, objavljane na spletnih straneh in drugačno razširjanje ni dovoljeno. Reprodukcijska, ali posredovanje edicije ali njenih posameznih delov je dovoljena le s pisnim soglasjem avtorja. 2005©LAKOS.

Gradivo ni revidirano. V kolikor opazite v dokumentu napake in neskladnosti, prosimo, da vaša opažanja javite na E-mail: alozj.sluga@fs.uni-lj.si

Kazalo

I.del Merilni sistemi – splošne značilnosti

1. Uvod
2. Splošni principi merilnih sistemov
 - 2.1 Merilni sistemi in njihova namembnost
 - 2.2 Proces merjenja in struktura merilnega sistema
3. Sestavljanje merilnih signalov
4. Lastnosti merilnih elementov / sistemov
 - 4.1 Statične karakteristike merilnih sistemov
 - 4.2 Merilna negotovost
 - 4.3 Dinamične karakteristike merilnih sistemov
 - 4.4 Energetske karakteristike merilnih sistemov
 - 4.4 Umerjanje
5. Analiza merilnih signalov

II.del Funkcijski elementi

6. Senzorji
 - 6.1 Merilni potenciometri
 - 6.2 Merilni trakovi
 - 6.3 Magnetni senzorji
 - 6.4 Kapacitivni in piezo senzorji
 - 6.5 Merjenje hitrosti
 - 6.6 Seizmični senzorji
 - 6.7 Merjenje sil, vrtilnih momentov in moči
7. Elementi za pretvorbo in manipulacijo signalov
8. Elementi za prikaz signalov
9. Elementi za prenos signalov

III.del Primeri

Priloge

Priloga 1 - Merske enote si sistema

Priloga 2 - Meroslovje - slovarček pogostejših izrazov v meroslovju

I. del

Merilni sistemi – splošne značilnosti

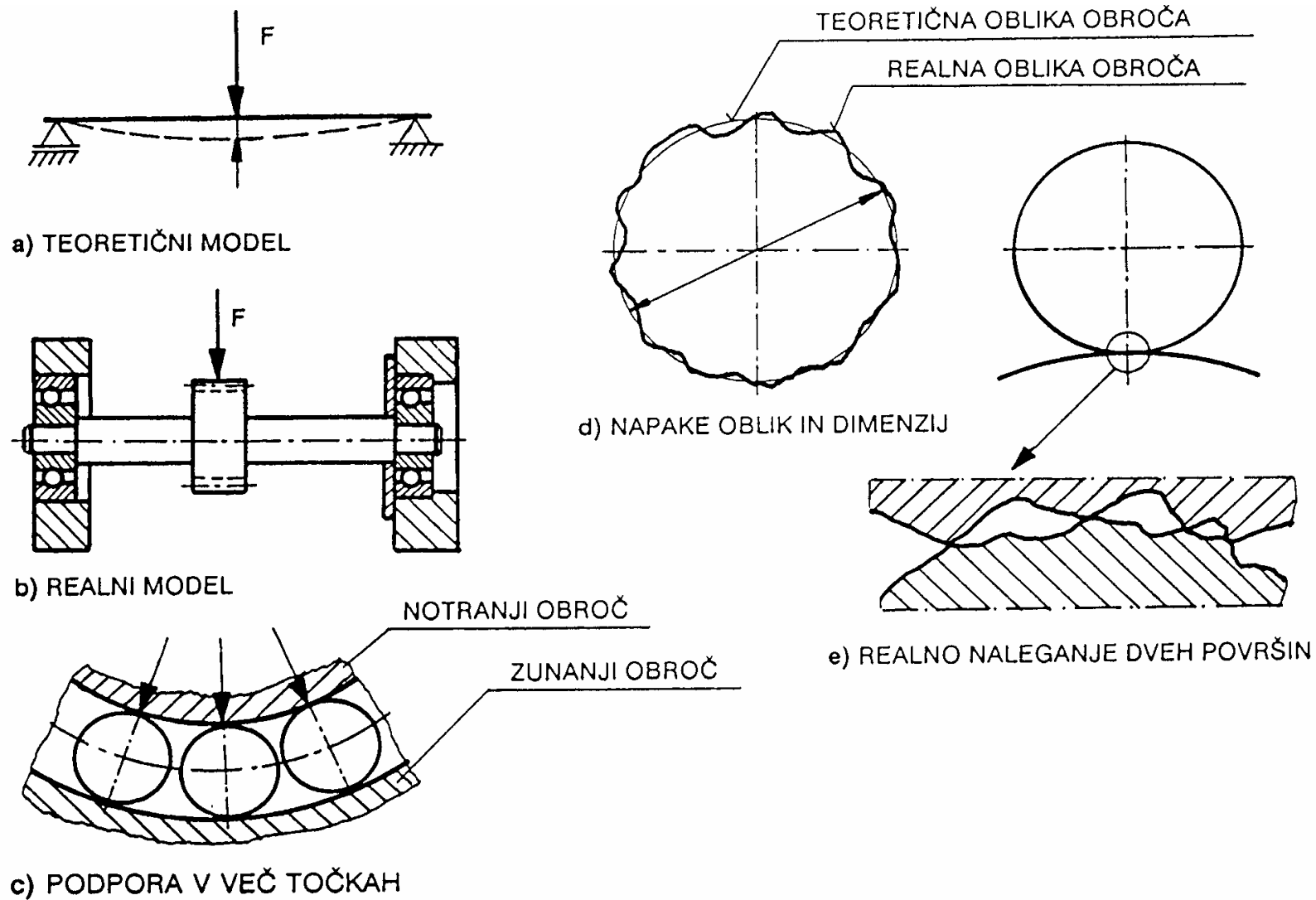
1. Uvod

Merilni sistemi
I.del

2. Splošni principi merilnih sistemov

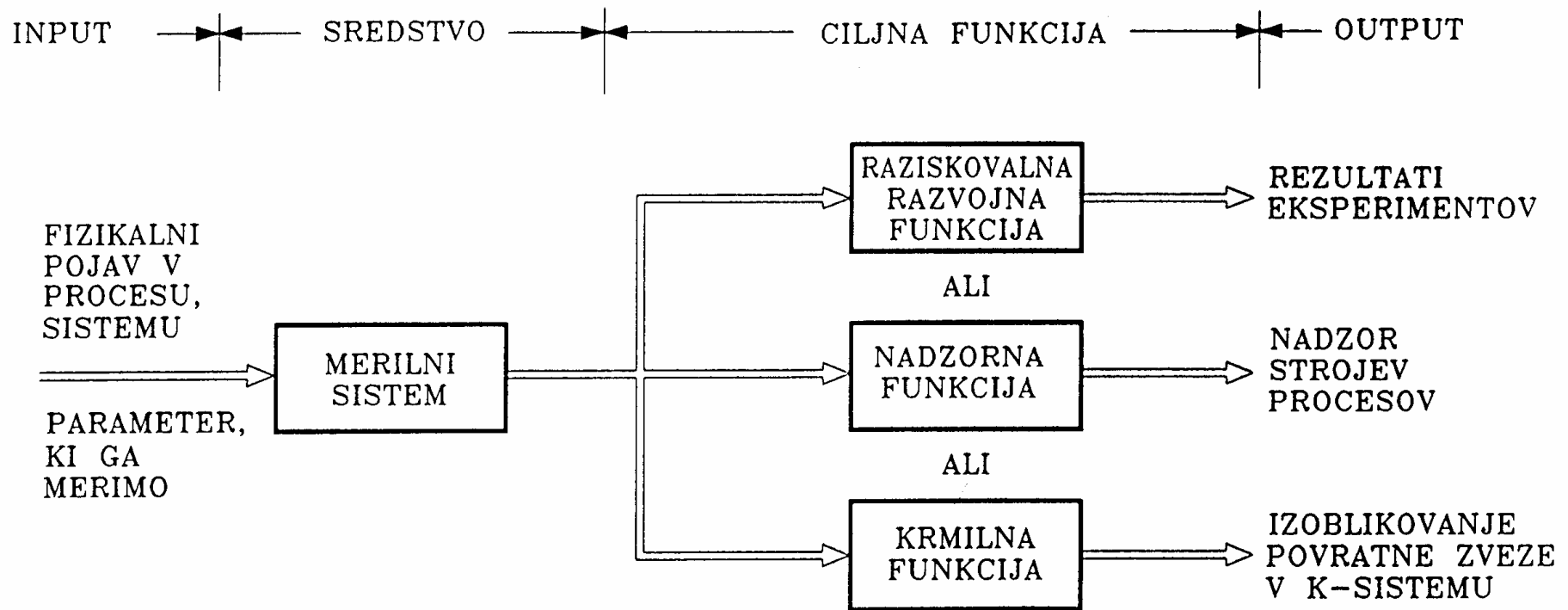
**Merilni sistemi
I.del**

Teoretični model in realni sistem vpete gredi



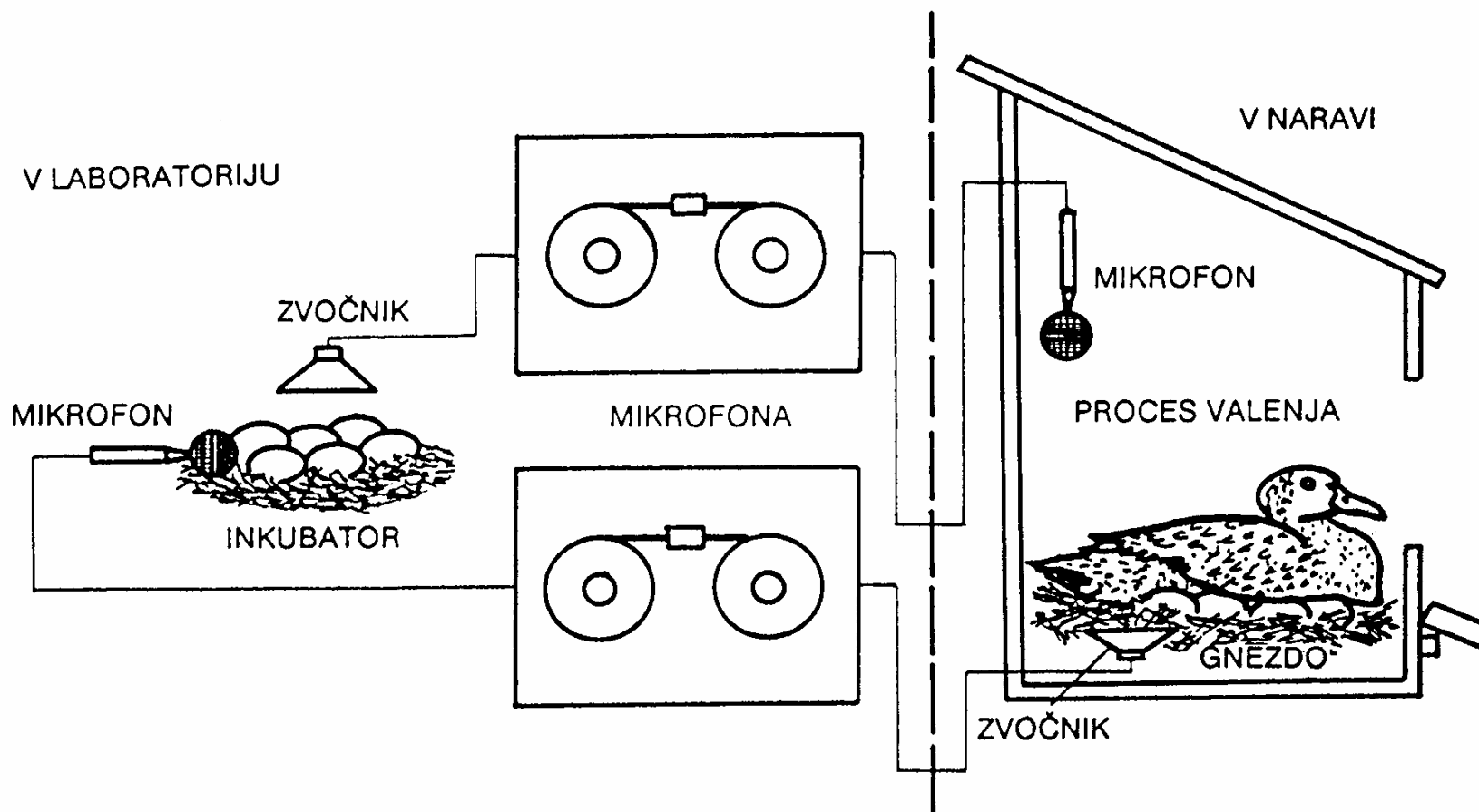
2.1 Merilni sistemi in njihova namembnost

Klasifikacija ciljnih funkcij merilnega sistema

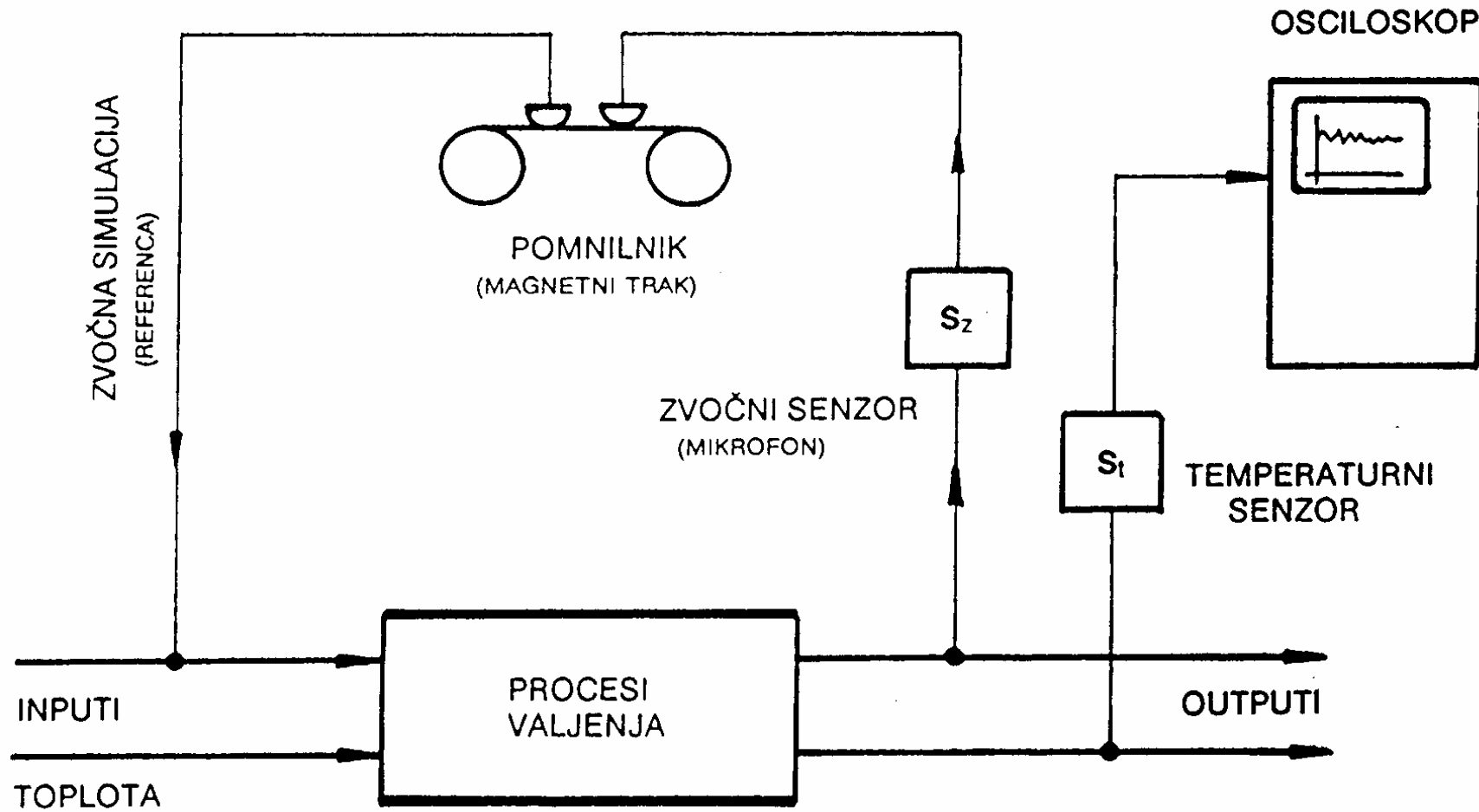


Vir: Peklenik

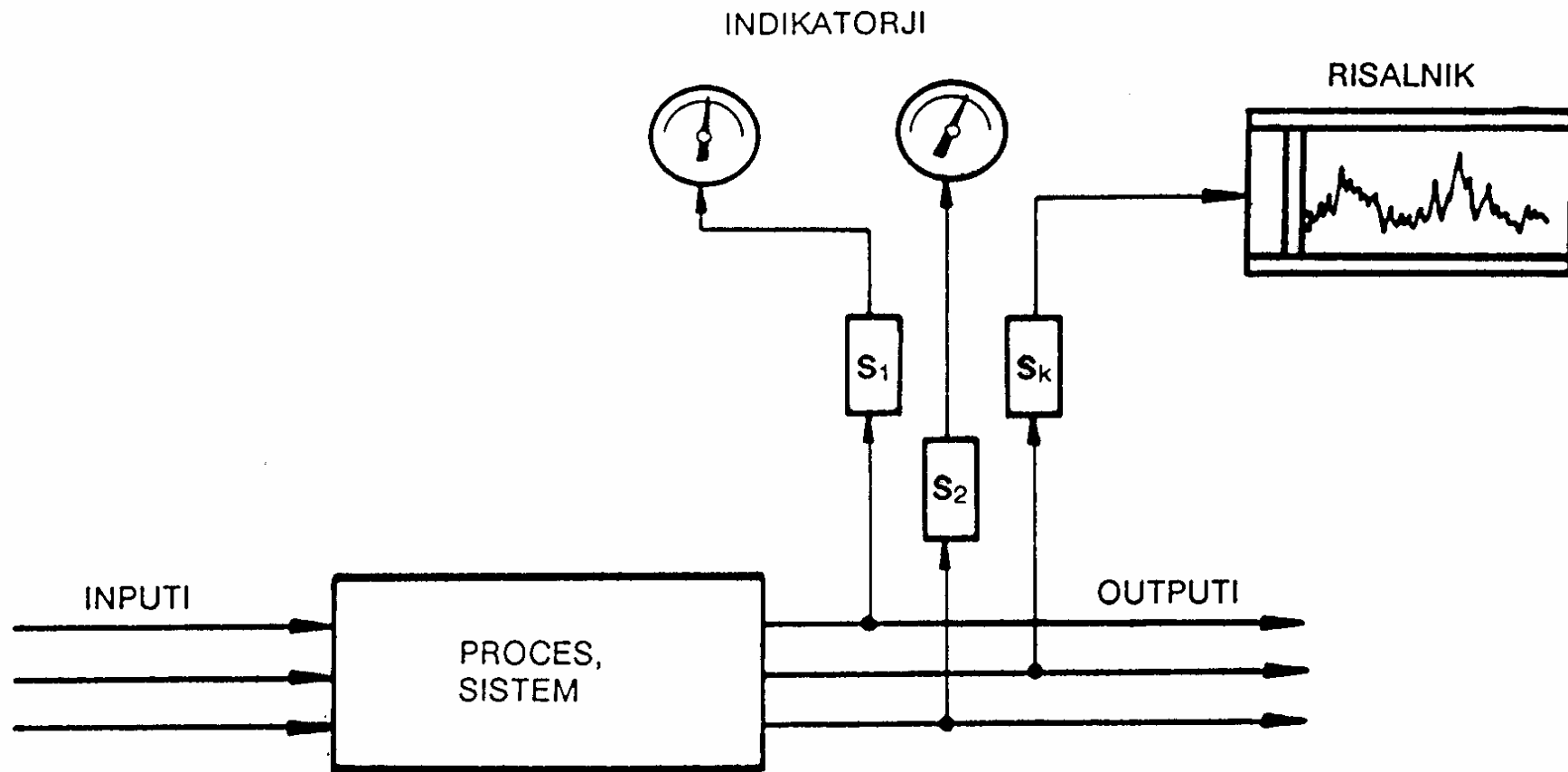
Kombinacija laboratorijske in poljske tehnike za raziskavo procesa valjenja (raziskovalno-razvojna funkcija M-sistema)



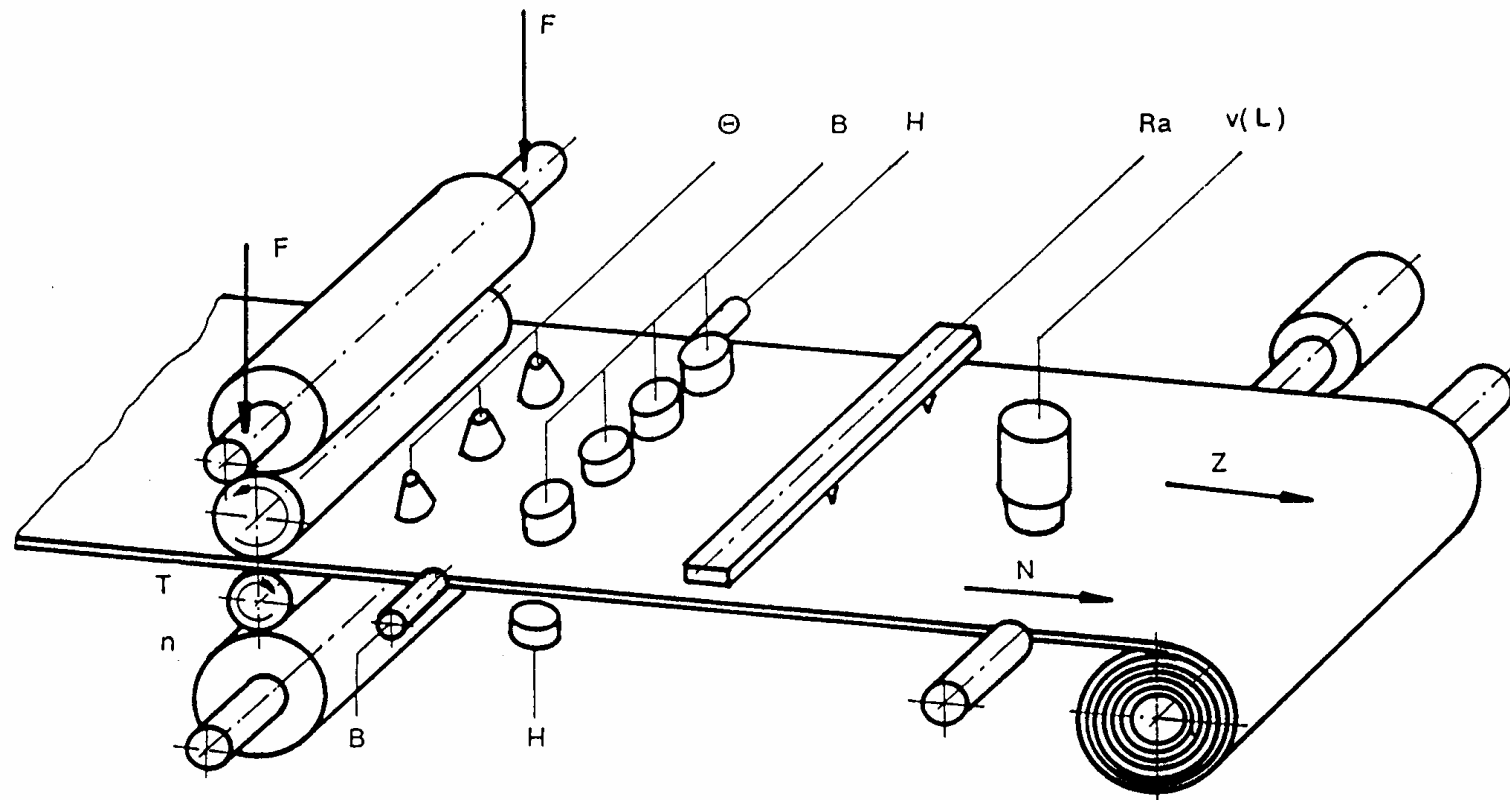
Blokovna shema sistema za določitev parametrov valjenja (raziskovalno-razvojna funkcija M-sistema)



Diagnostika in nadzor poteka procesa ali delovnega sistema (nadzorna funkcija M-sistema)

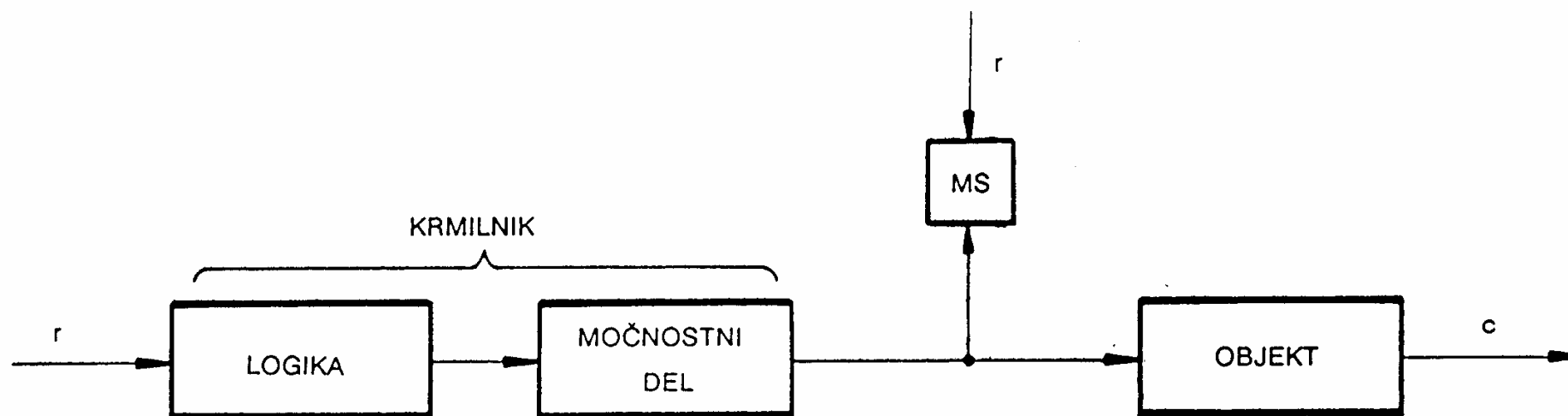


Merilni sistem pri valjanju pločevine (nadzorna funkcija M-sistema)

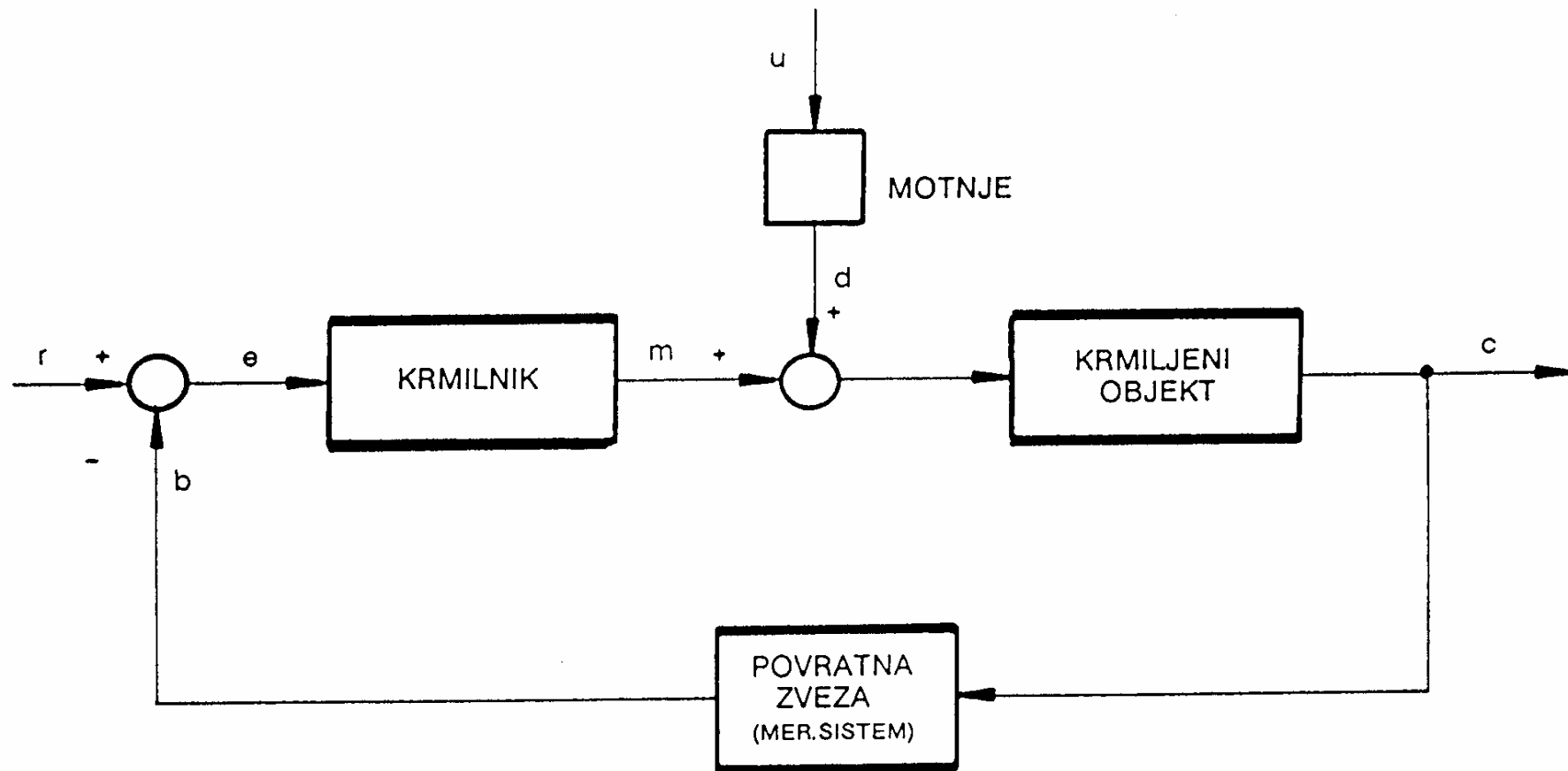


T - VRTILNI MOMENT
 n - ŠTEVILO VRTLJAJEV
 v - HITROST
 Z - VLEČNA SILA
 N - NATEZNA SILA
 F - SILA VALJANJA
 Θ - TEMPERATURA
 B, H, L - ŠIRINA, DEBELINA, DOLŽINA TRAKU
 Ra - HRAPAVOST

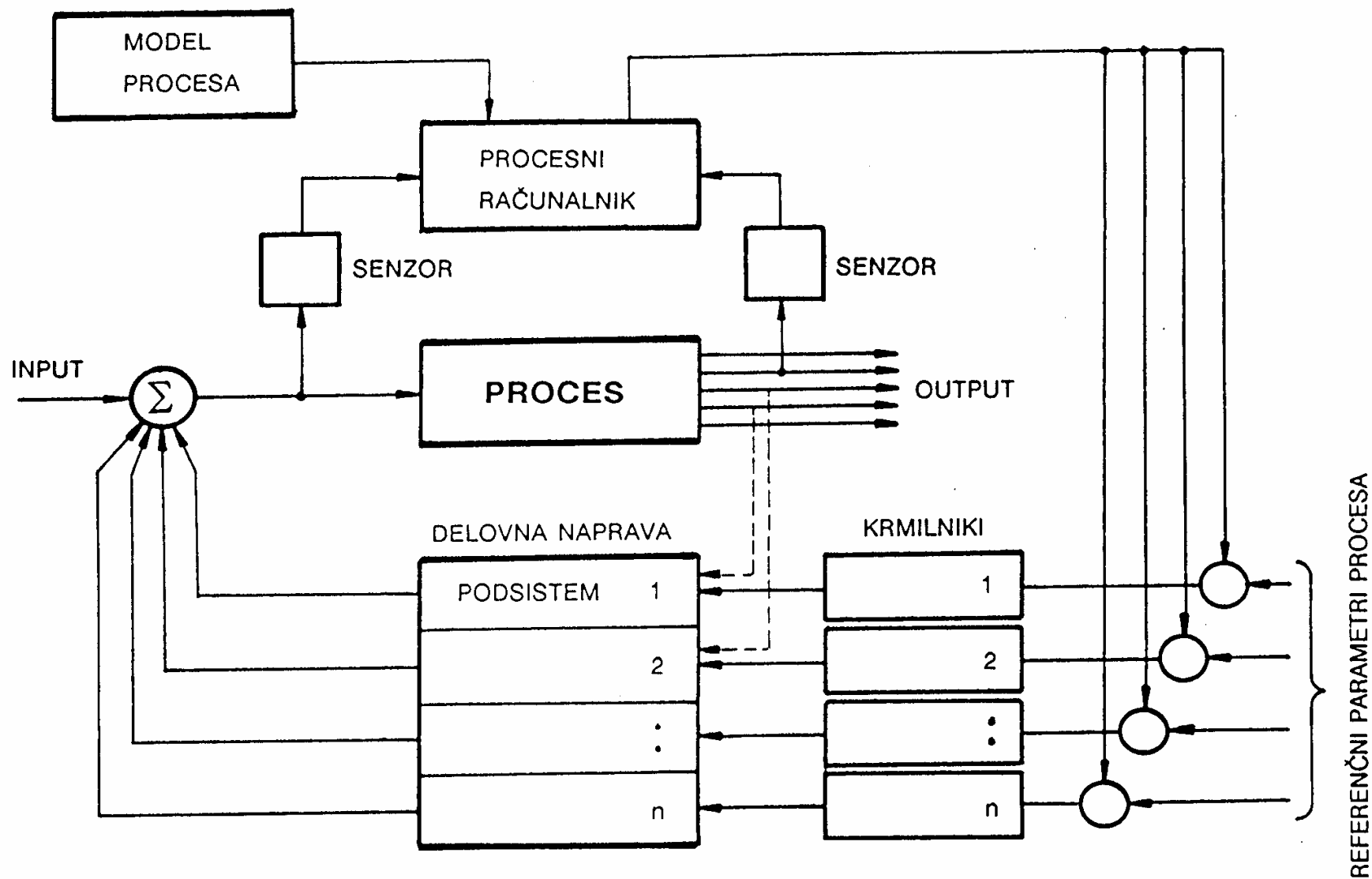
Odprt krmilni sistem (brez M-sistema)



Krmilni sistem s povratno zvezo (krmilna funkcija M-sistema)



Princip identifikacije in krmiljenja procesa (krmilna funkcija M-sistema)

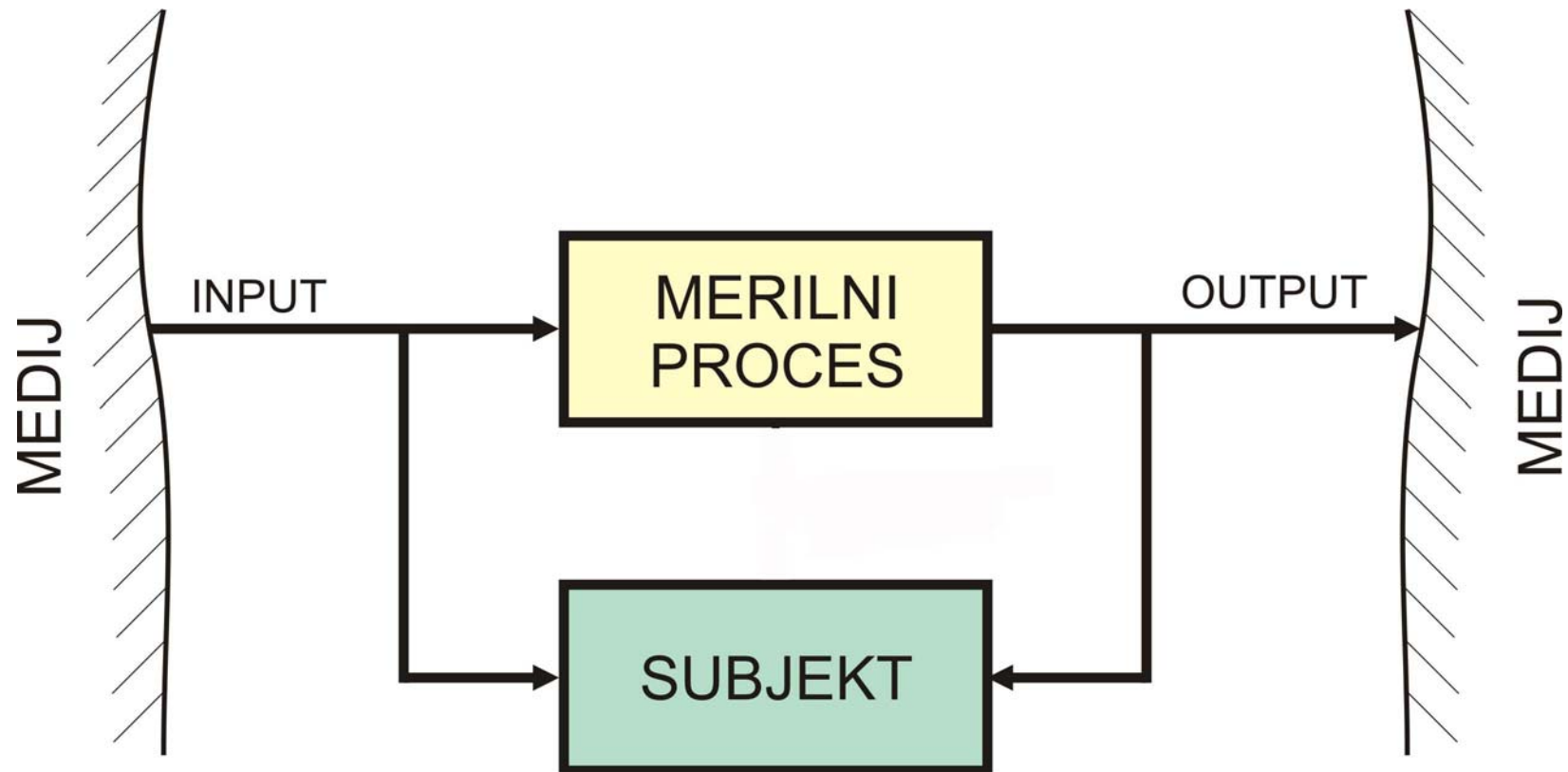


Vir: Peklenik

2.2 Proces merjenja in struktura merilnega sistema

Merilni sistemi
I.del

Koncept merilnega sistema



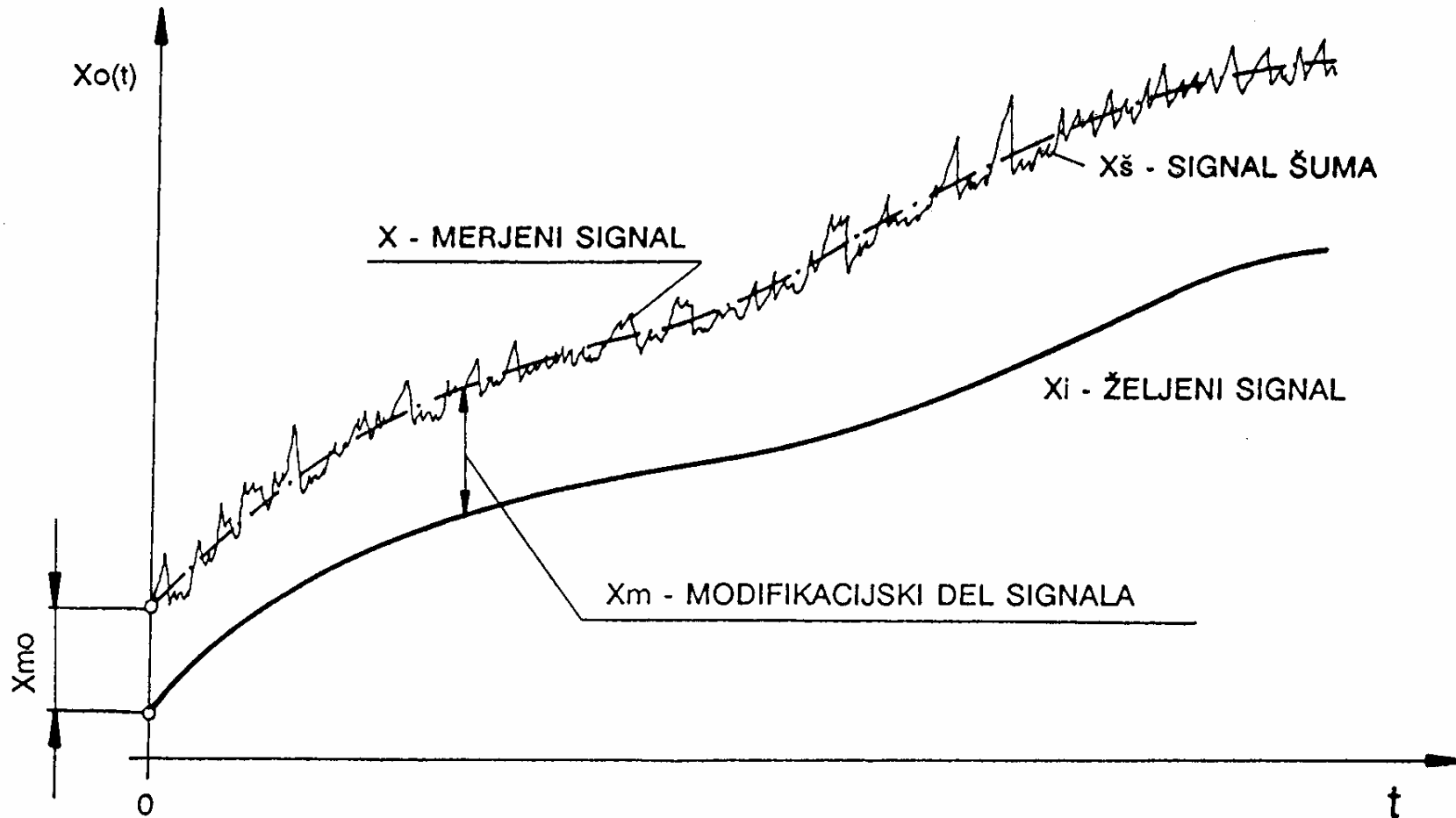
Vir: Peklenik

Glavne vrste in oblike inputnih signalov

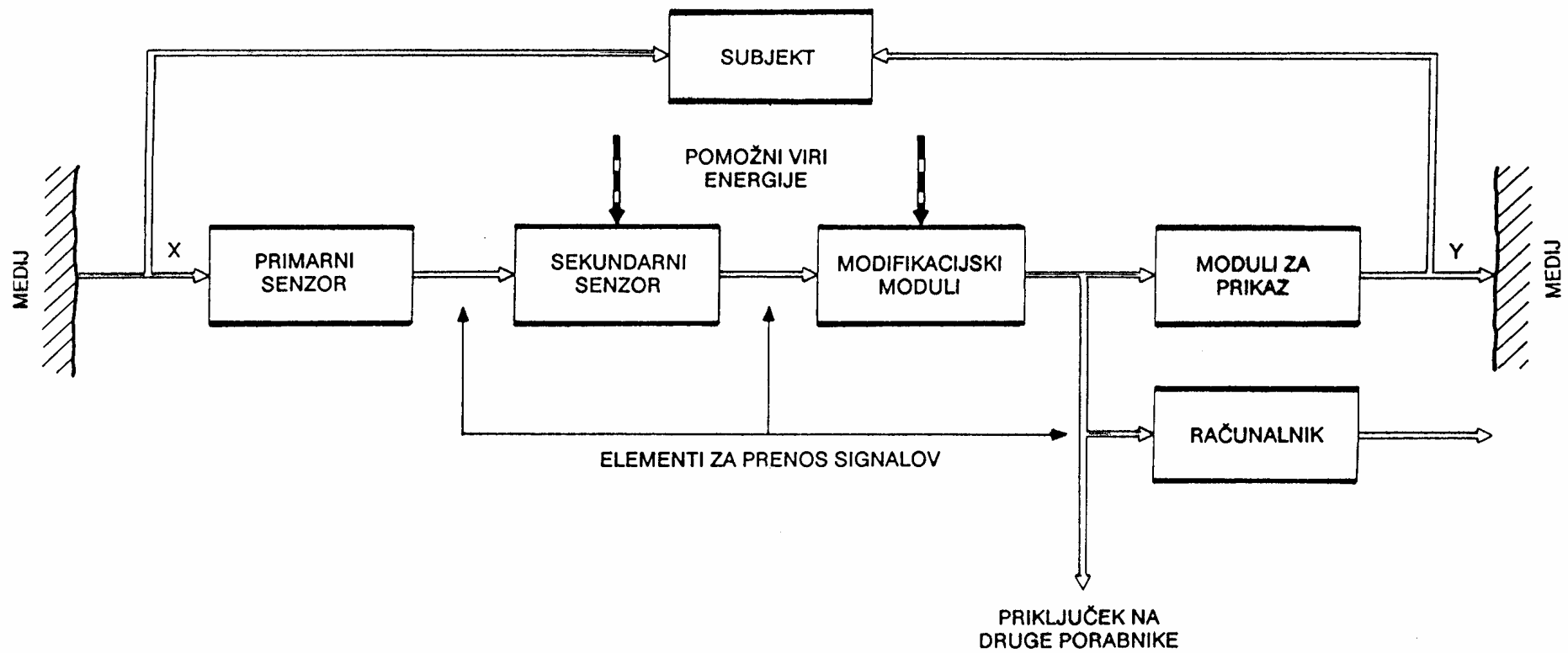
VRSTE SIGNALOV		OBLIKE SIGNALOV			
DISKRETNi SIGNALI					
KONTINUIRANI SIGNALI	DETERMINISTIČNI				
	NAKLJUČNI				

Vir: Peklenik

Merjeni signal in njegove komponente



Struktura merilnega sistema



Vir: Peklenik

Funkcijski elementi merilnega sistema

- senzorji (za poti, hitrosti, pospeške, maso, sile, momente, moči, temperatura, tlak, zvok, pretok, toplotni tok, toplotno in jedrsko žarčenje, čas, frekvenca)
- manipulacijski moduli (ojačevalci, filtri, impedančni pretvorniki, moduli za seštevanje, odštevanje, integracijo, odvajanje, množenje, deljenje, računsko korekcijo, dinamično kompenzacijo, amplitudno in frekvenčno modulacijo in demodulacijo, A/D in D/A pretvorniki, itn.)
- moduli za prikaz in zapis signalov (analogni in digitalni voltmetri, x-y in x-t pisalniki, osciloskopi, oscilografi, analogni magnetofoni in digitalni diski, tiskalniki in risalniki, itn.)
- elementi za prenos signalov (koaksialni in optični kabli za prenos analognih in digitalnih podatkov, pnevmatski in mehanski prenos signalov, prenos z drsnimi obroči, brezžični (RF) prenos, lokalne mreže, itn.)
- moduli za digitalno obdelavo signalov (kompaktni podatkovni loggerji, analizatorji signalov in sistemov, mikroračunalniki, itn.)

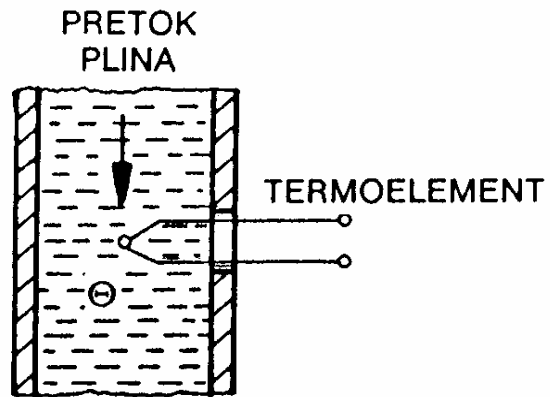
Generične vrste senzorjev

- KEMIČNI SENZORJI
- BIOLOŠKI SENZORJI
- SEVALNI SENZORJI (atomske)
- FIZIKALNI SENZORJI

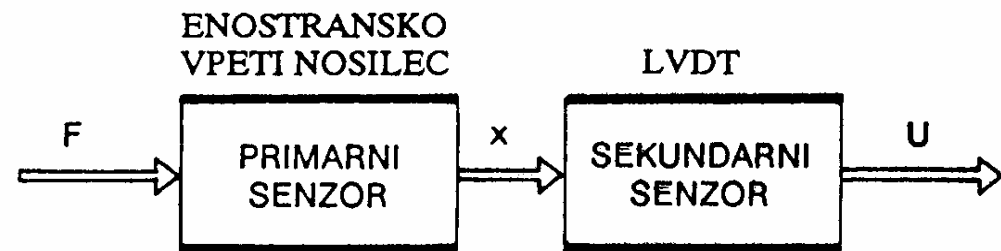
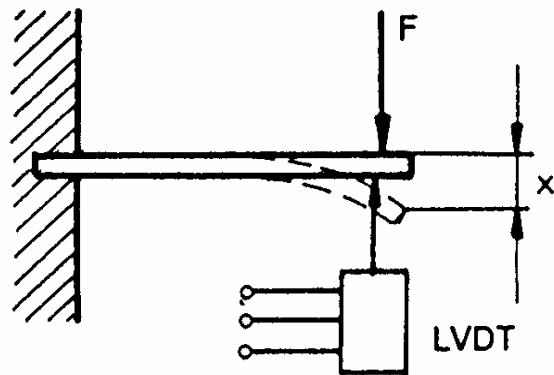
ELEKTRONIKA IN SISTEMI

MERJENJE MAKRO LASTNOSTI

Vrste senzorjev



a)

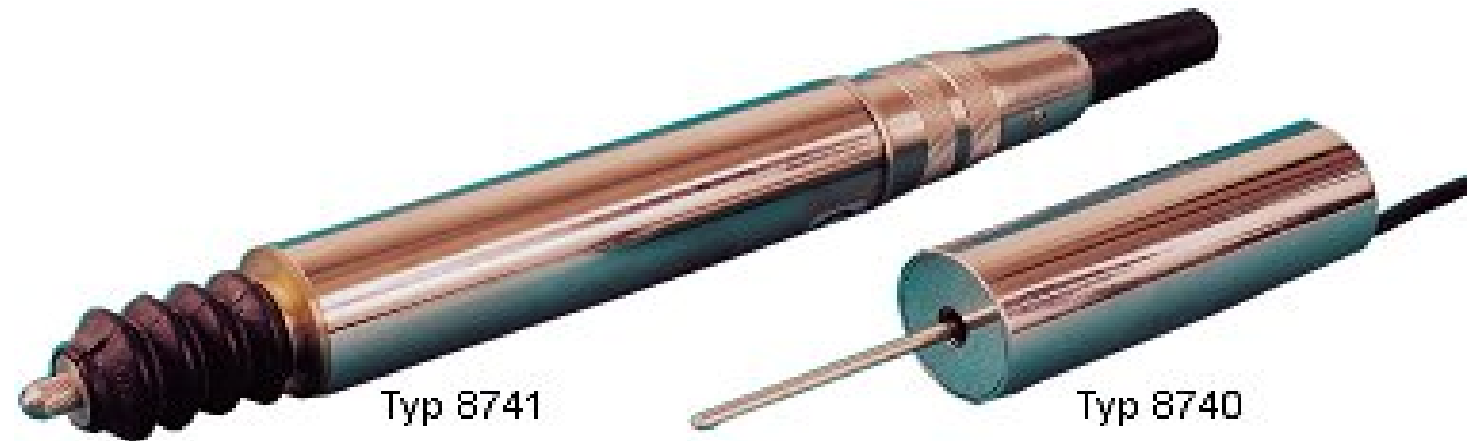


b)

Senzor za merjenje poti - primer



DC/DC senzorja za merjenje poti
Tip 8740, Tip 8741 s tipalom



- Merilno območje 0 ... 1 mm do 0 ... 150 mm
- Linearnost $\pm 0,25$ % FS
- Zanemarljiva histereza
- Integrirani ojačevalnik, Izhod 0 ... 5 V
- Zanemarljivo občutljiv na vibracije
- Možnosti posebne izvedbe (npr. 0 ...10 V, linearnost $\pm 0,1$ %)

Vir: Buster



Visokotlačni senzor Tip 8270 "A5-UHP"



- Merilno območje od 0 ... 3,5 kbar do 0 ... 12 kbar
- Merilna negotovost < 0,5 %
- Zaščita proti poku z integriranim izhodno odprtino
- Robustna izvedba
- iz nerjavnega jekla



Precizni majhen sensor sile Tip 8431



- Majhna dimenzija
- Enostavna izvedba prijemališča z navoji
- Minimalna prečna občutljivost
- Merilna negotovost $\leq 0,2 \%$
- Merilno območje od 0 ... 2,5 N do 0 ... 40 kN
- Tip 8432 z obojestransko zaščito pred preobremenitvijo
- Za netezne in tlačne sile

Vir: Buster

Senzorji vrtilnega momenta - primer



Senzorji vrtilnega momenta

Za statične meritve (ne-rotirajoč)

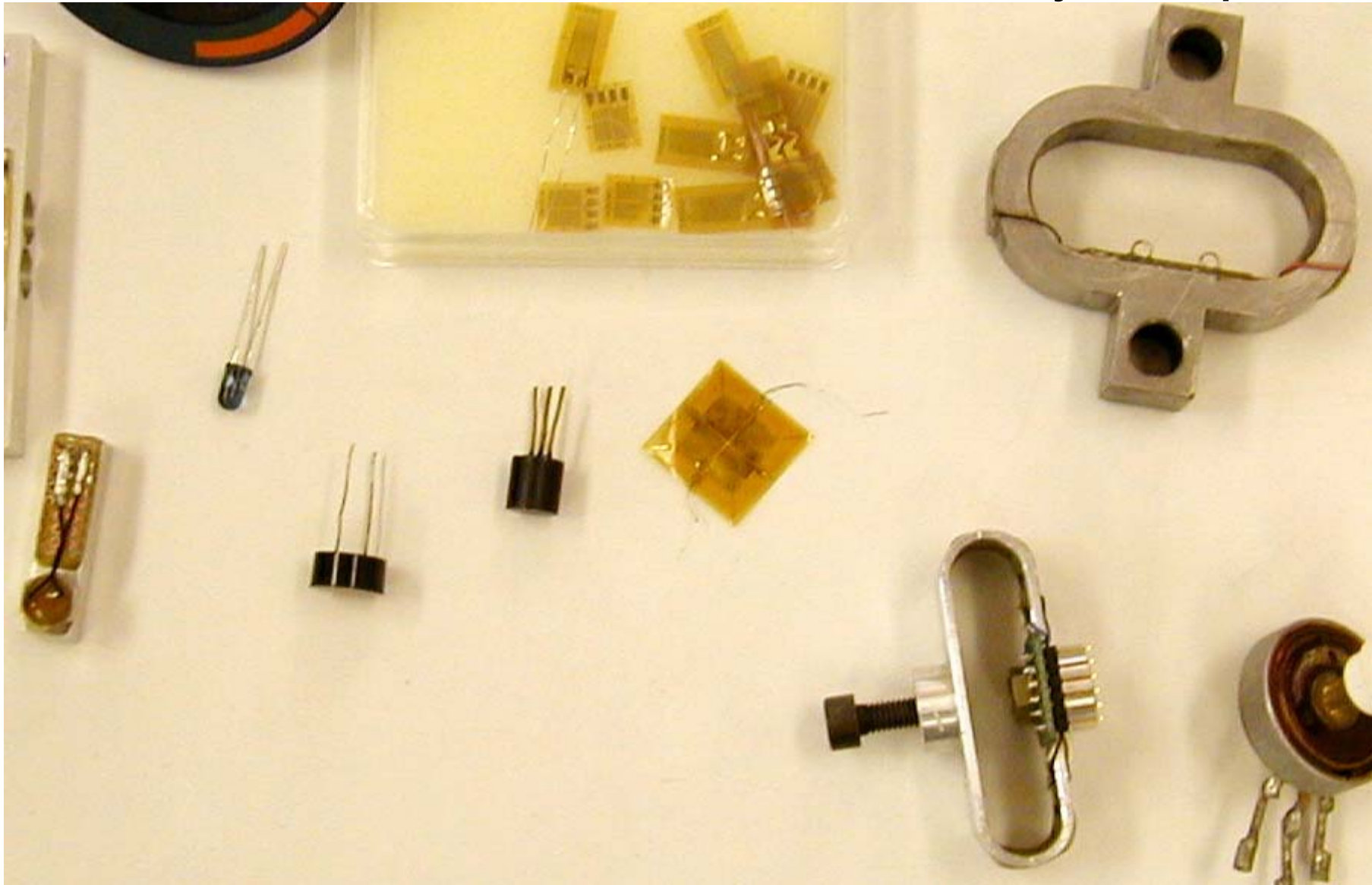
Tipi 8624, 8627, 8628, 8632



- ❑ Merilno območje od 0 ...1 Nm do 0 ... 5 kNm
- ❑ Merilna negotovost 0,2% (0,1% opcija)
- ❑ zanesljivost in robustnost
- ❑ enostavno rokovanje
- ❑ standardiziran izhodni signal

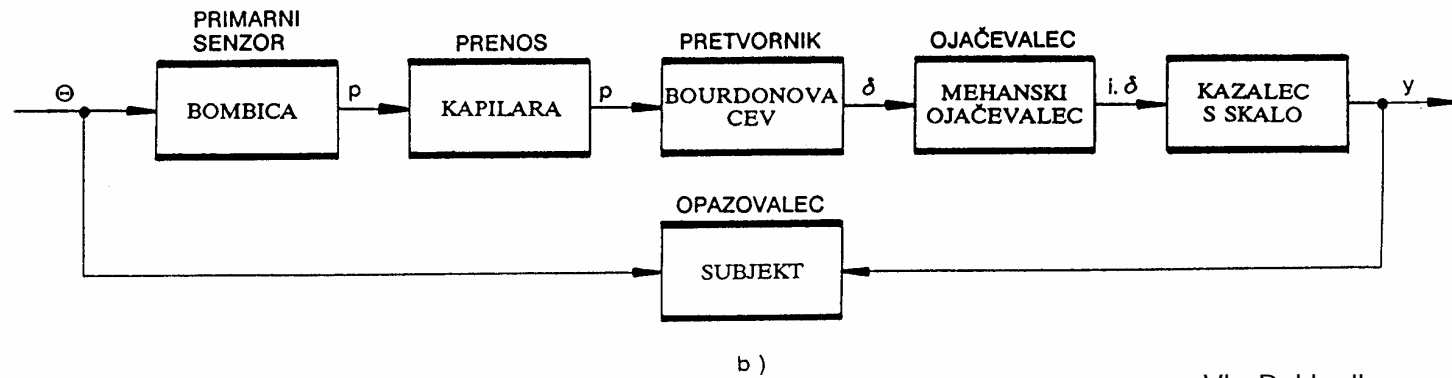
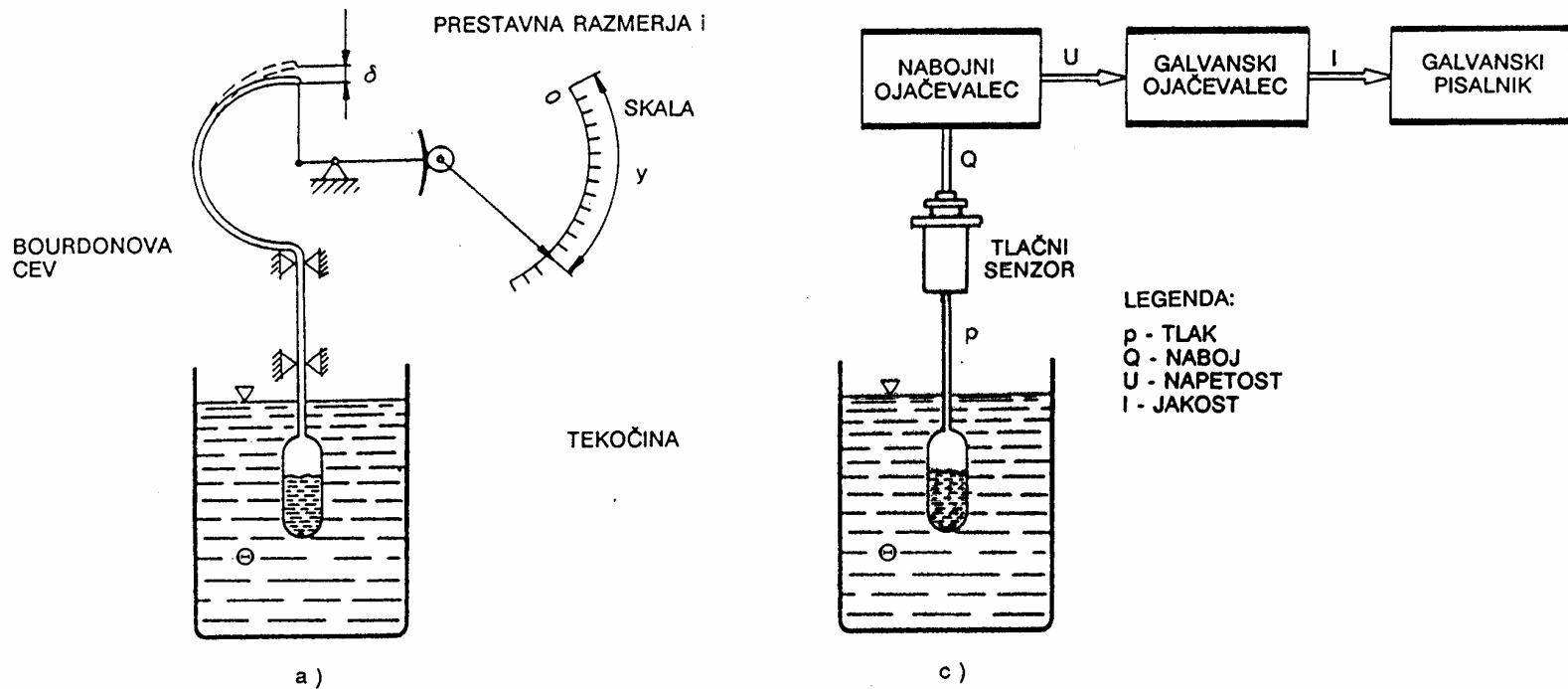
Vir: Buster

Senzorji razni - primer



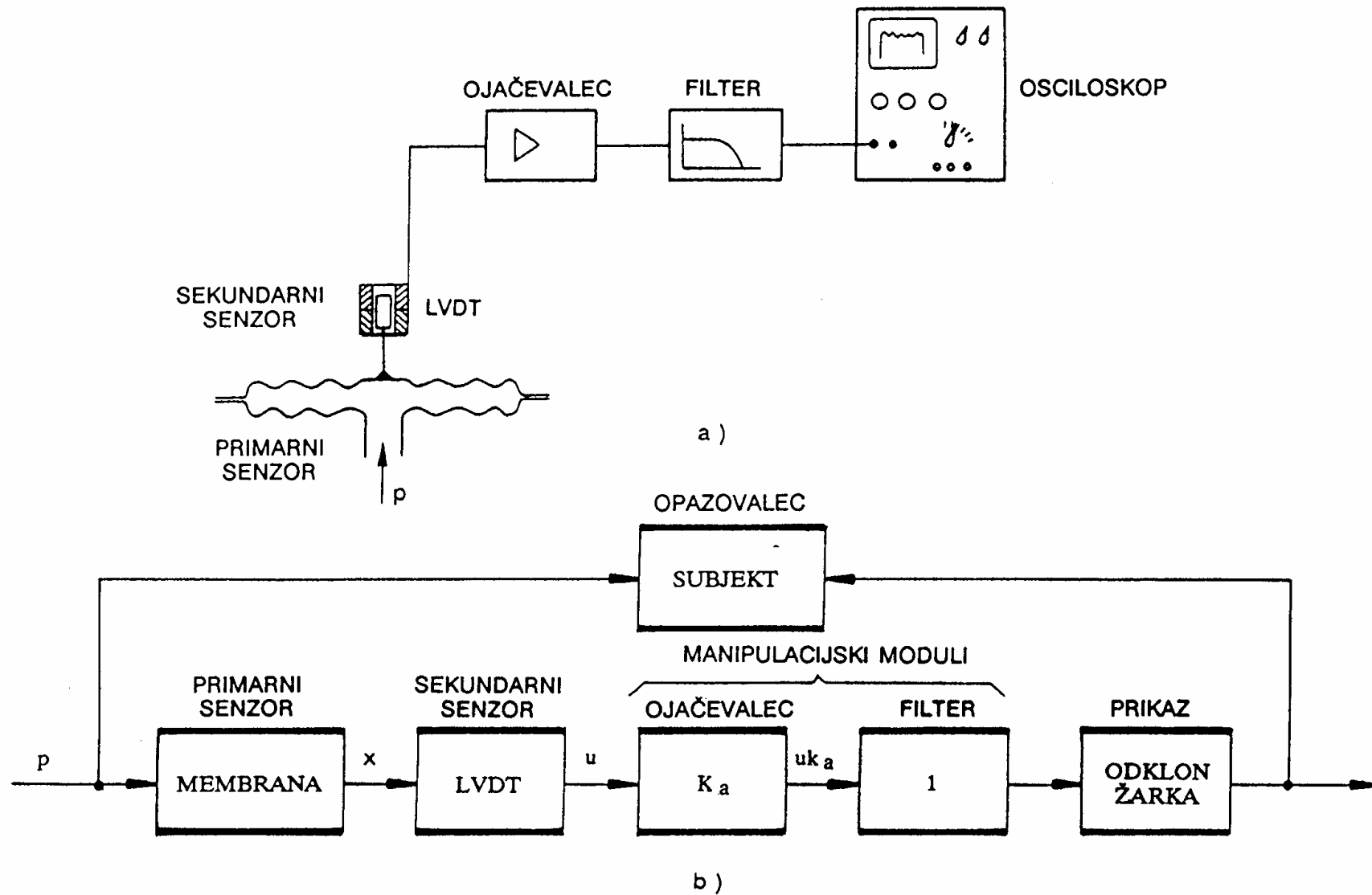
Vir: Lakos

Fluidni ekspanzijski temperaturni merilni sistem



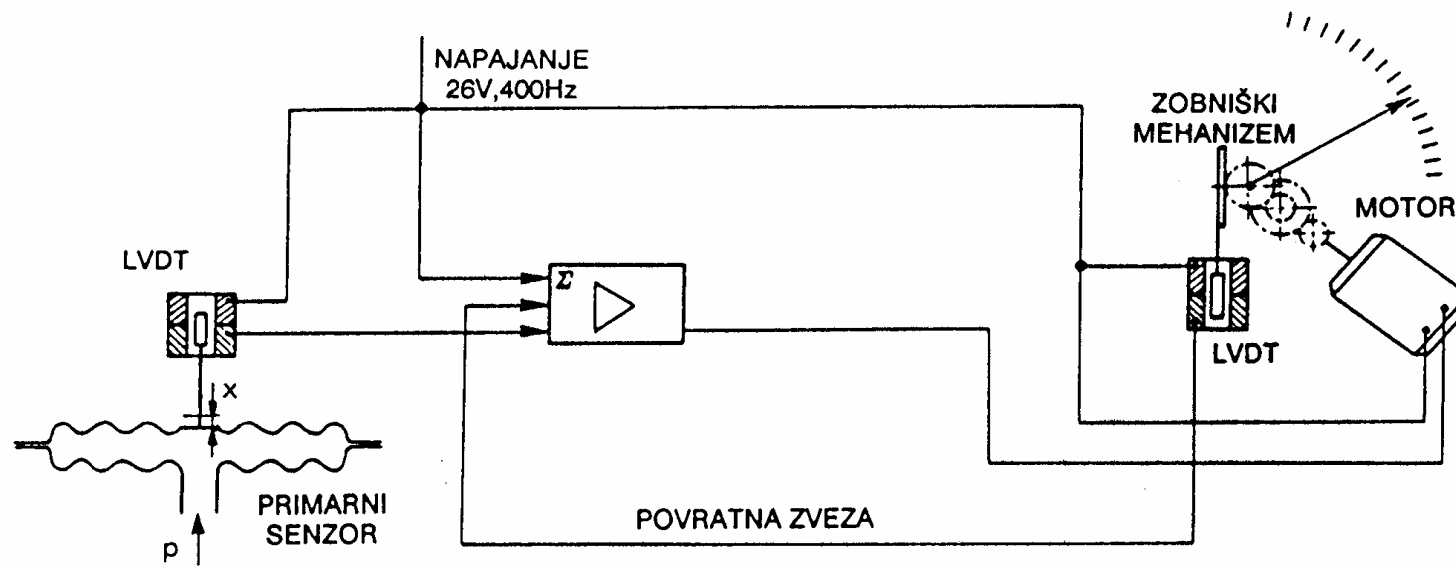
Vir: Peklenik

Tlačni merilni sistem

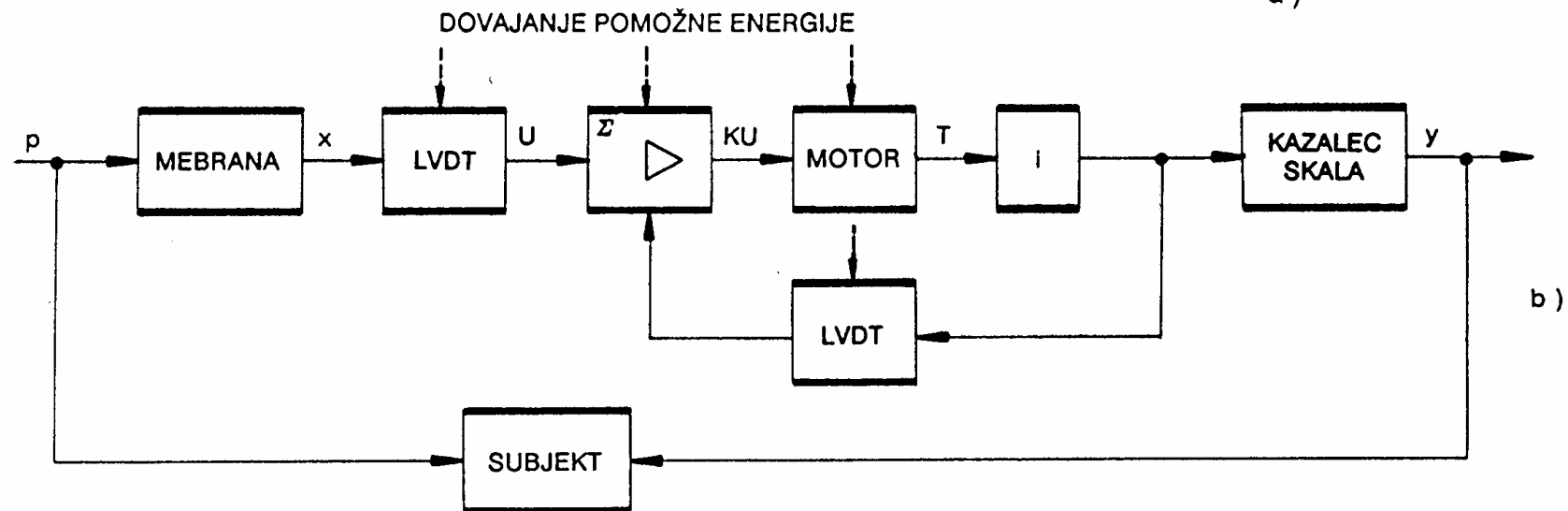


Vir: Peklenik

Tlačni merilni sistem na daljavo s servo motorjem in povratno zvezo



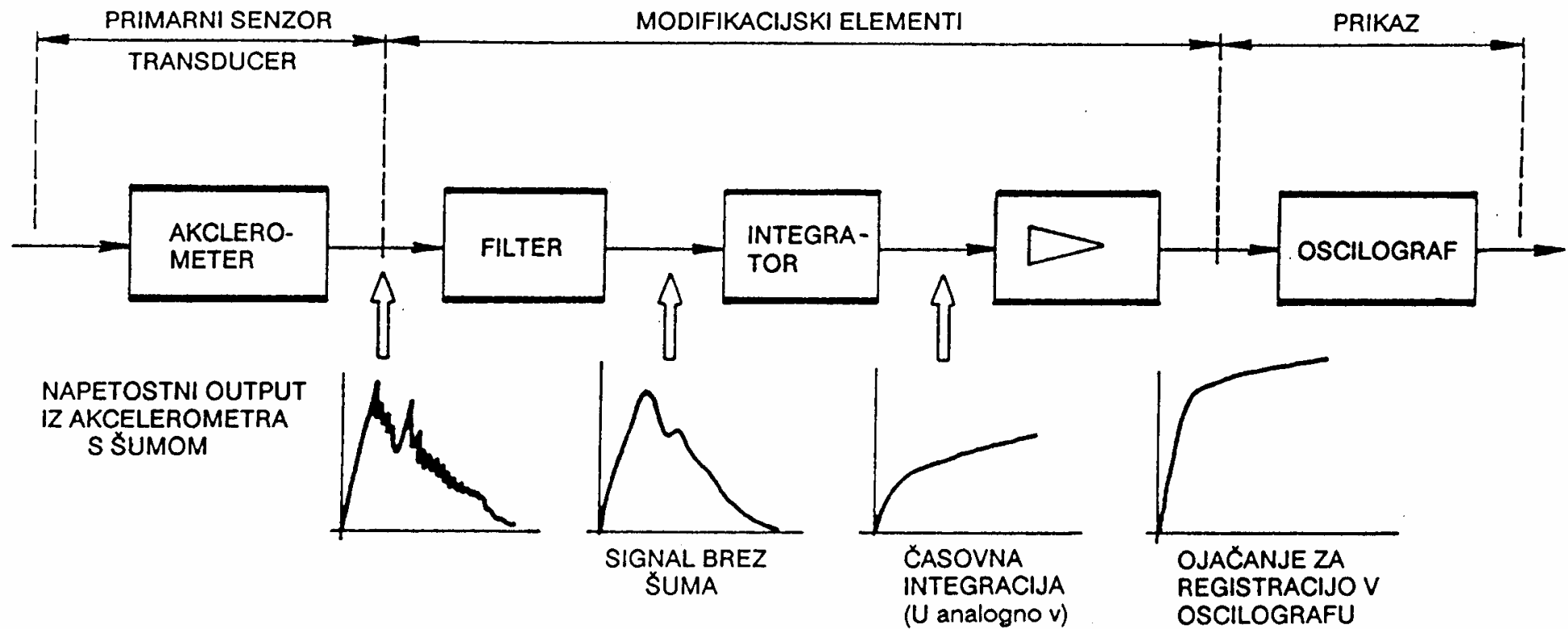
a)



b)

Vir: Peklenik

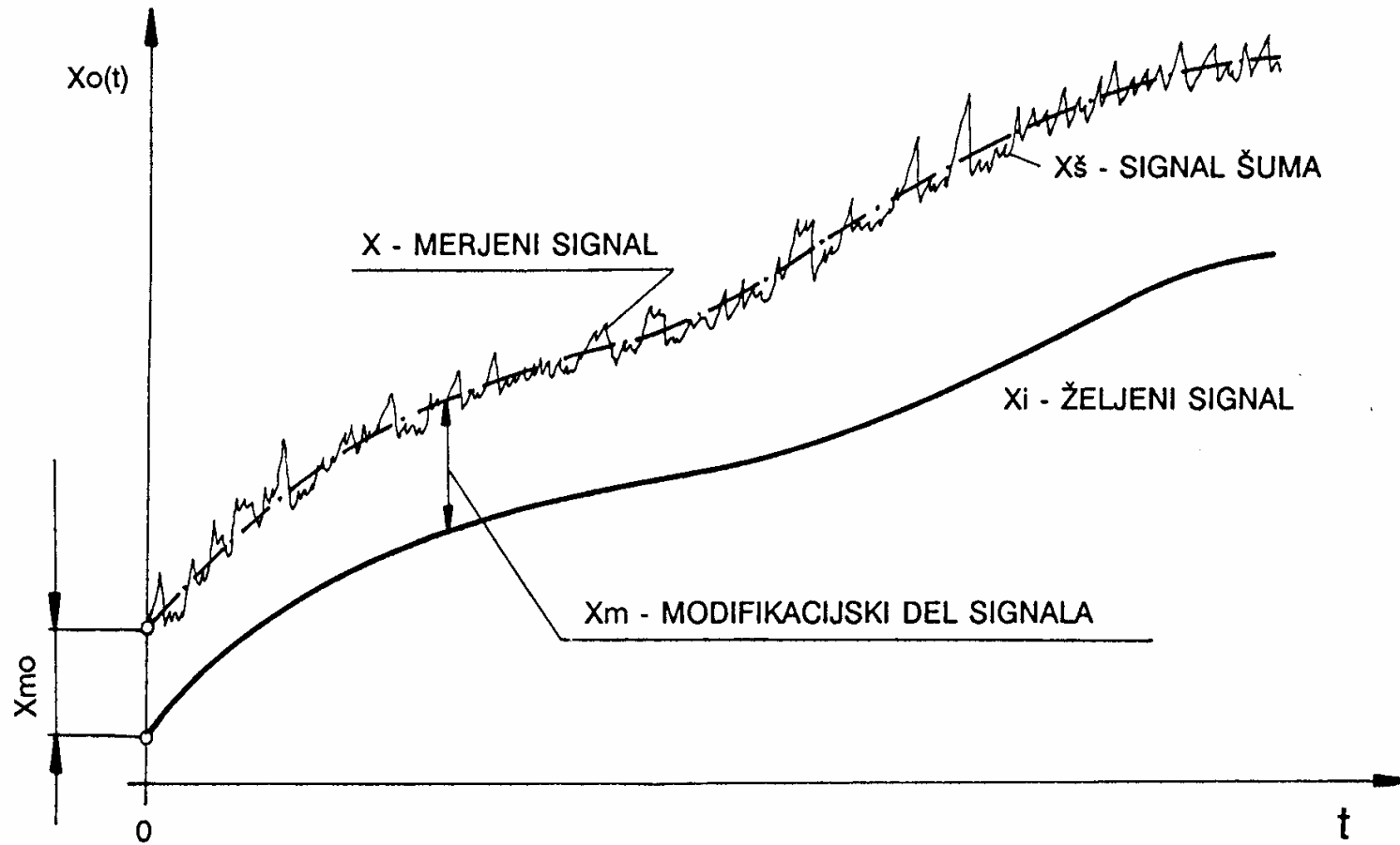
Blokovni diagram merilnega sistema za merjenje hitrosti (primer)



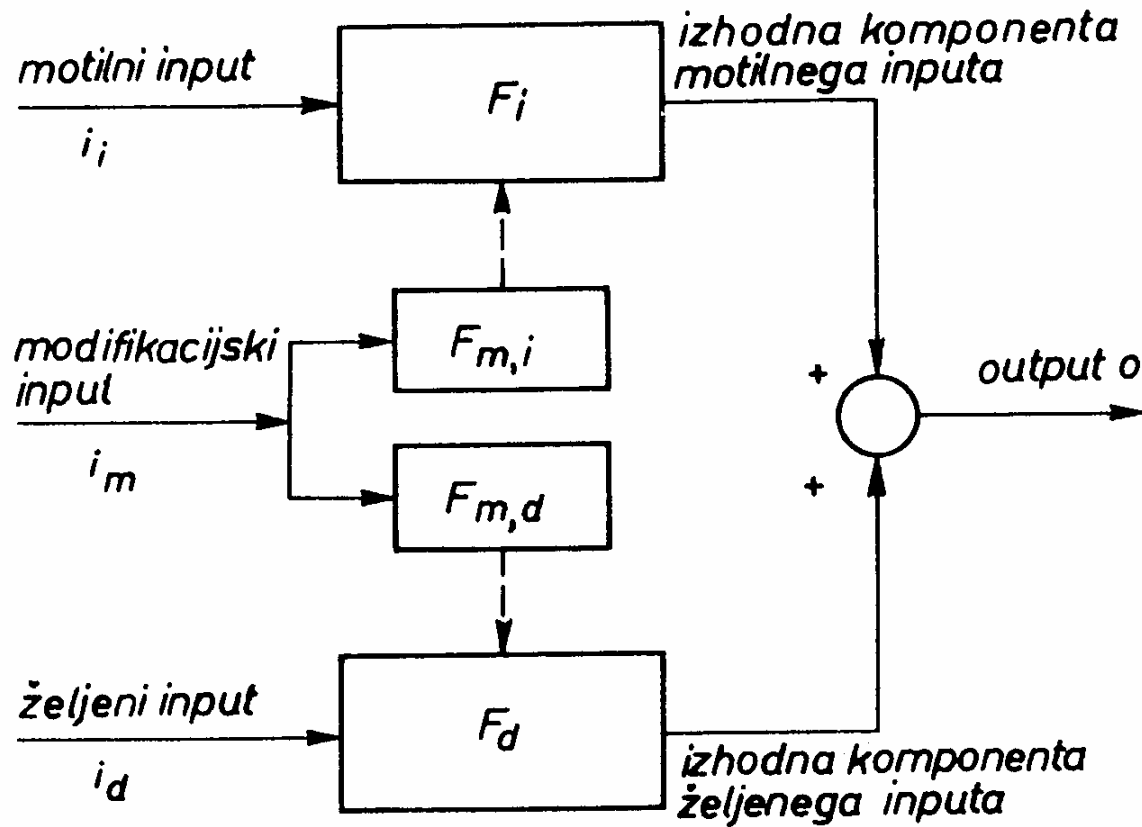
3. Sestavljanje merilnih signalov

Merilni sistemi
I.del

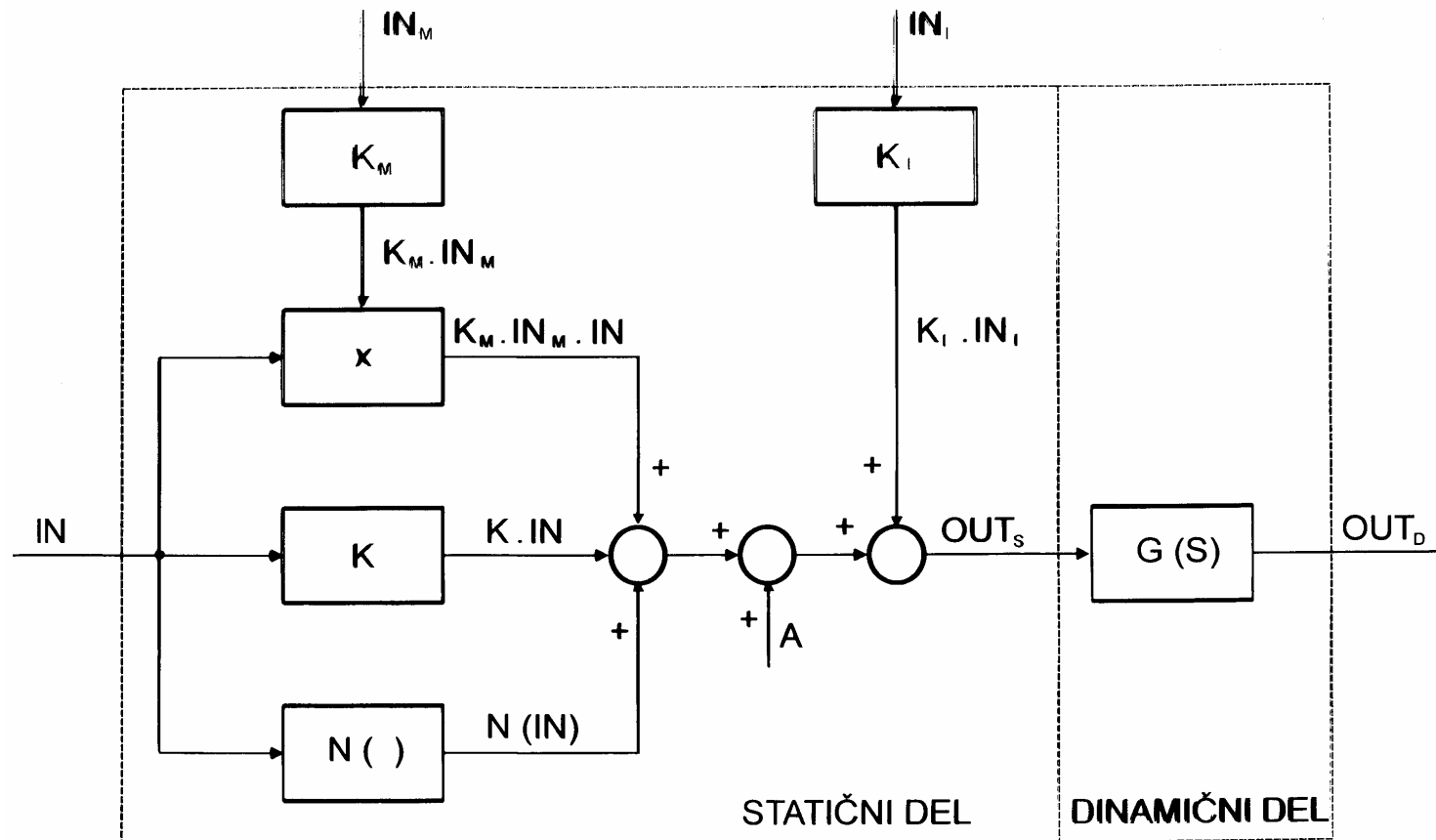
Merjeni signal in njegove komponente



Splošna konfiguracija inputa-outputa



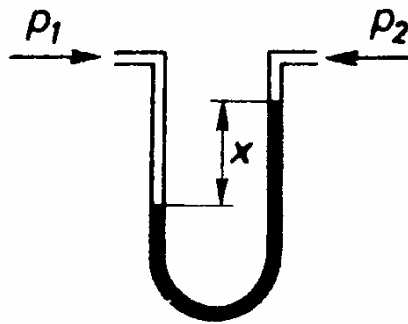
Generična struktura M-elementa



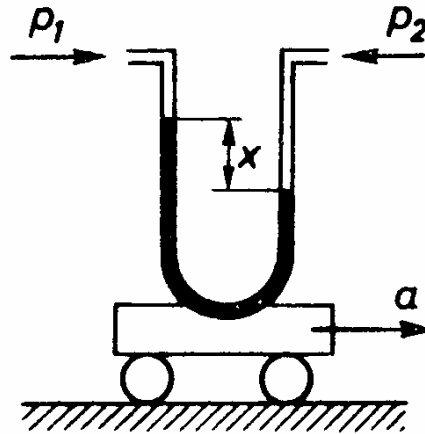
IN_M - modifikacijski input
 IN_i - motilni input

Vir: Peklenik

Motilni inputi pri merjenju tlaka

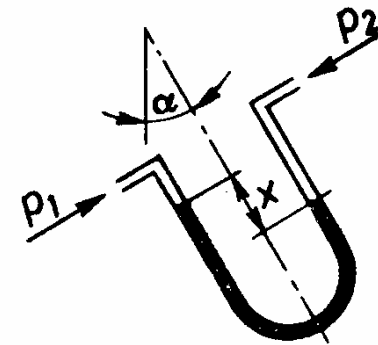


$$p_1 > p_2$$



$$p_1 = p_2$$

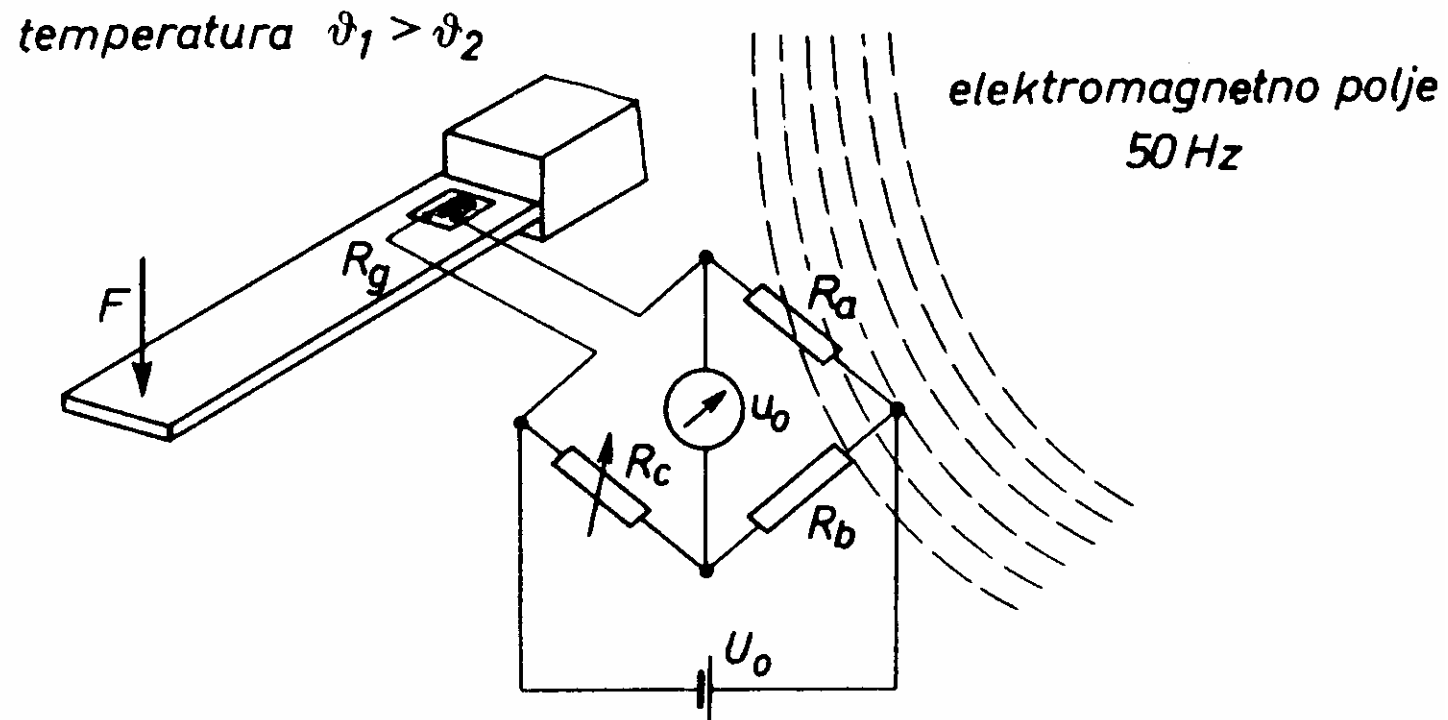
*motilni input je
pospešek a*



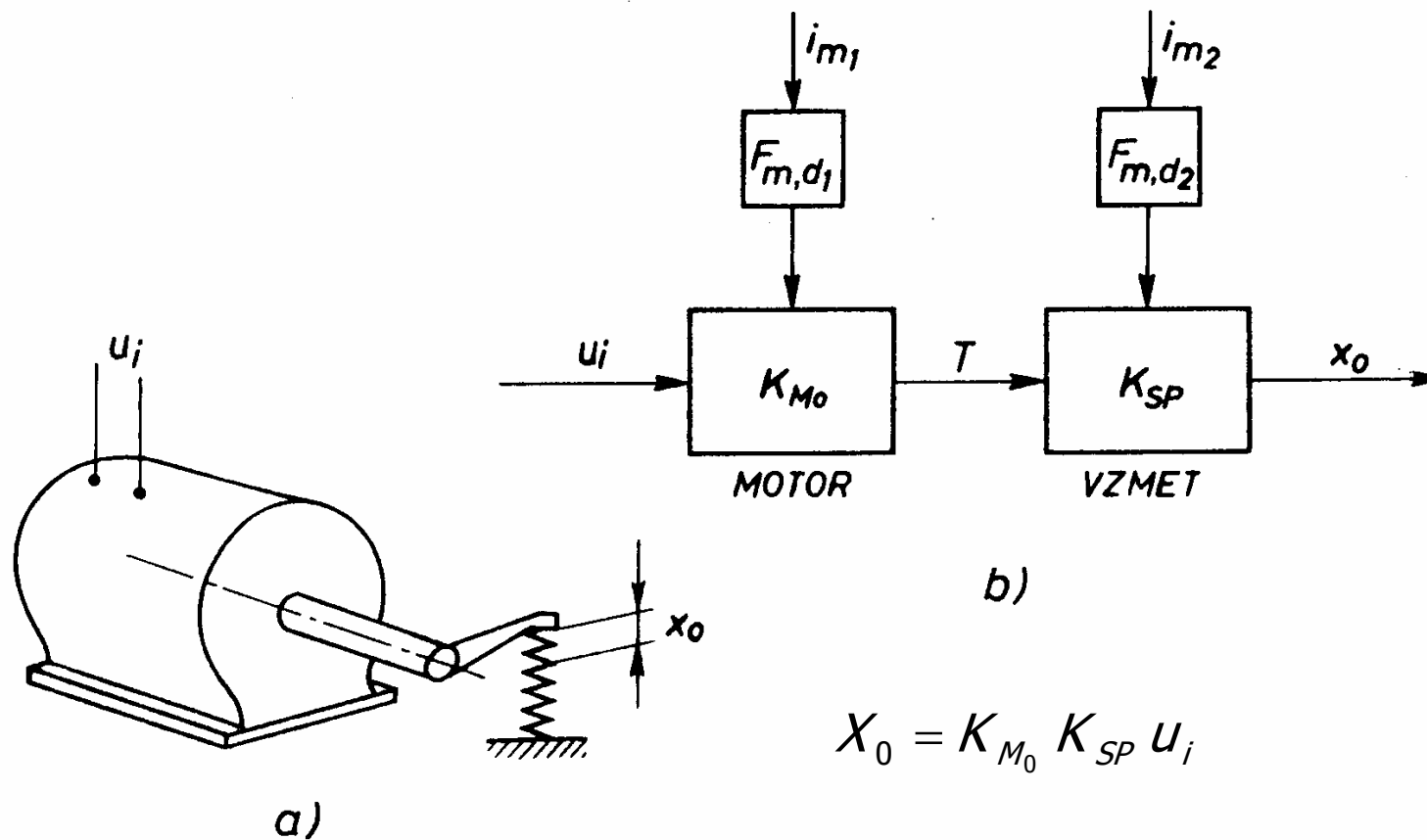
$$p_1 = p_2$$

*motilni input je
nagibni kot α*

Motilni input na Weatstonovem mostiču zaradi em-polja in temperature



Modifikacijskimi inputi, primer odprt sistem el-motorja

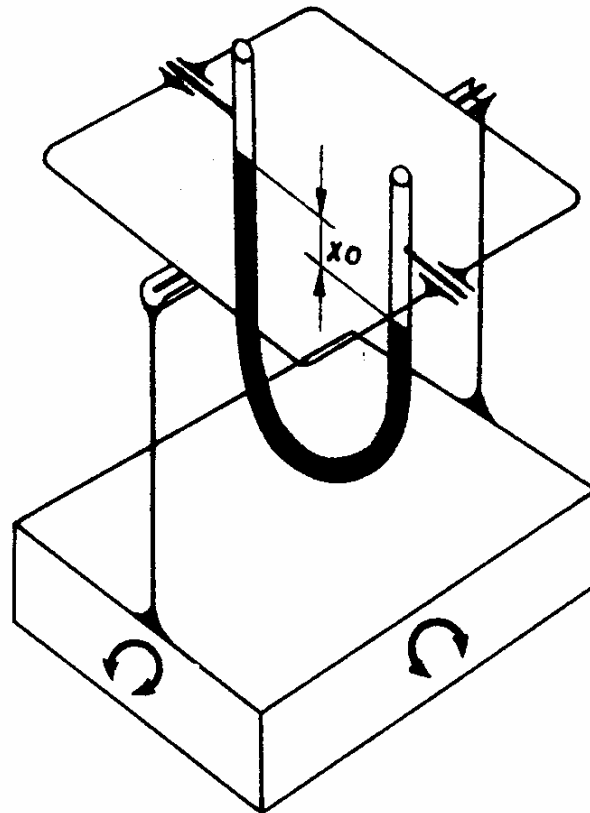


Izoblikovanje inputov in outputov merilnega sistema

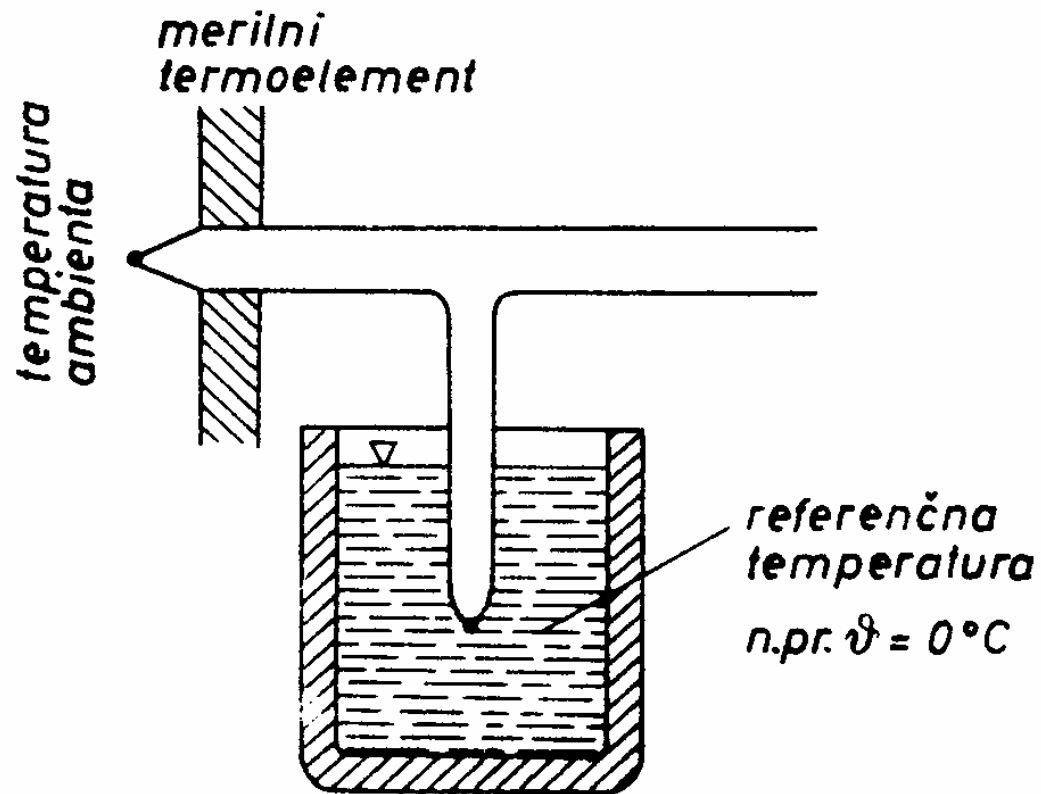
KOREKCIJSKE METODE

1. Metoda naravne neobčutljivosti
2. Metoda povratne zveze z visokim faktorjem ojačanja
3. Metoda izračuna korekcije outputa
4. Filtriranje signalov
5. Metoda nasprotujočih se signalov

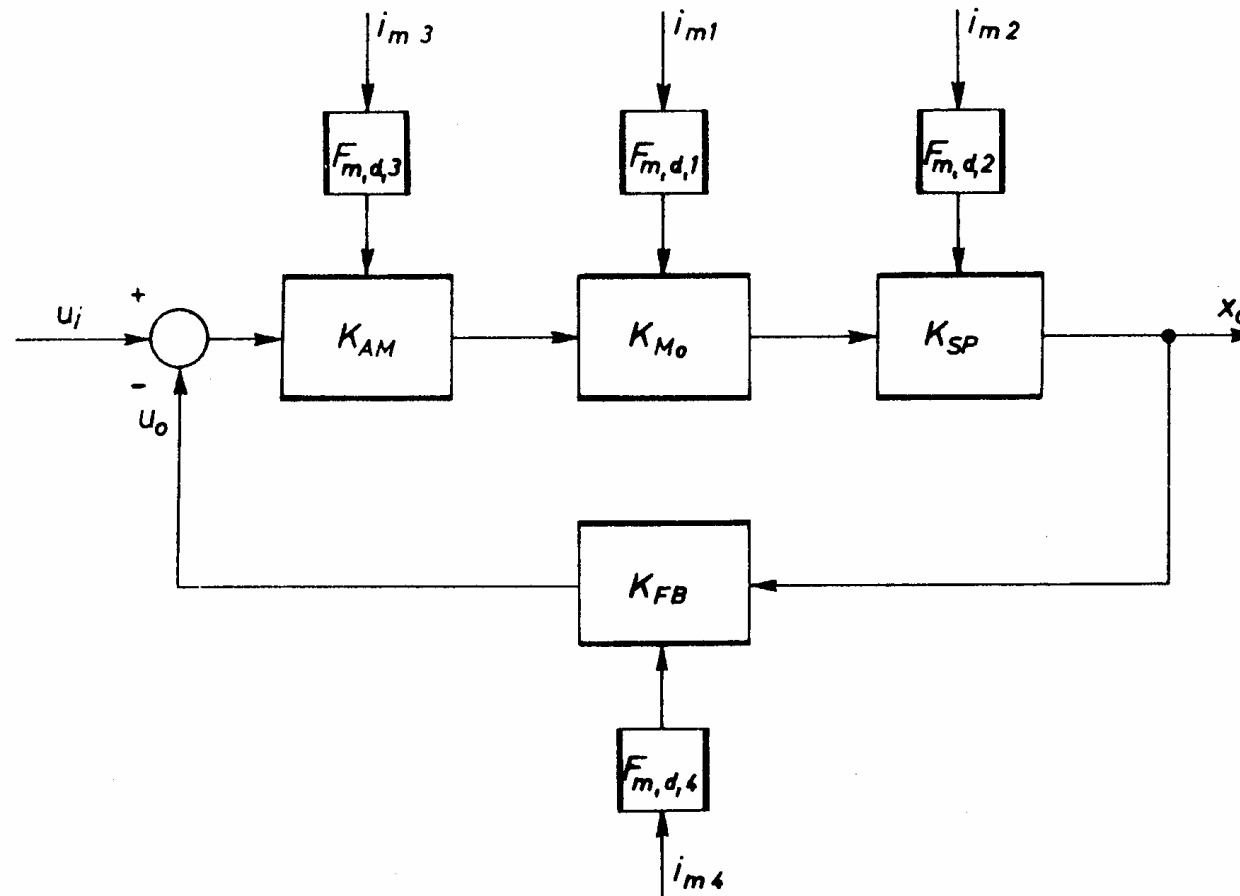
Kompensacija modifikacijskih inputov (metoda naravne neobčutljivosti)



Kompensacija modifikacijskega inputa pri merjenju temperature (metoda naravne neobčutljivosti)



Uporaba povratne zveze za reduciranje vpliva modifikacijskih inputov (1) (metoda povratne zveze z visokim faktorjem ojačanja)



Uporaba povratne zveze za reduciranje vpliva modifikacijskih inputov (2)

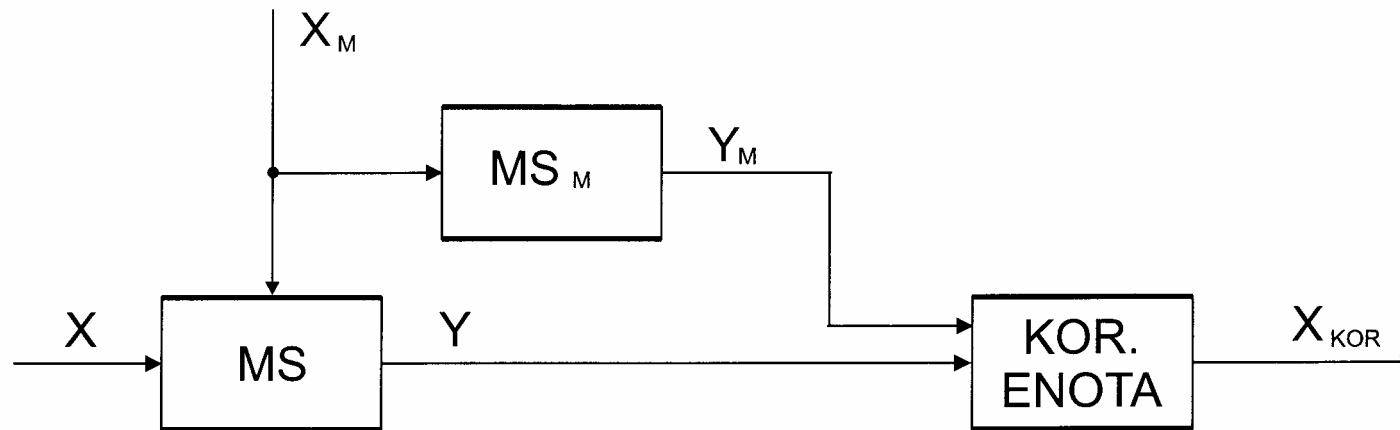
$$(u_i - u_o)K_{AM}K_{MO}K_{SP} = (u_i - K_{FB}x_o)K_{AM}K_{MO}K_{SP} = x_o$$

$$x_o = \frac{K_{AM}K_{MO}K_{SP}}{1 + K_{AM}K_{MO}K_{SP}K_{FB}} u_i$$

$$x_o \approx \frac{1}{K_{FB}} u_i; K_{AM}K_{MO}K_{SP} \gg 1$$

Izračun korekcije

(metoda izračuna korekcije outputa; upoštevanje vplivne veličine)



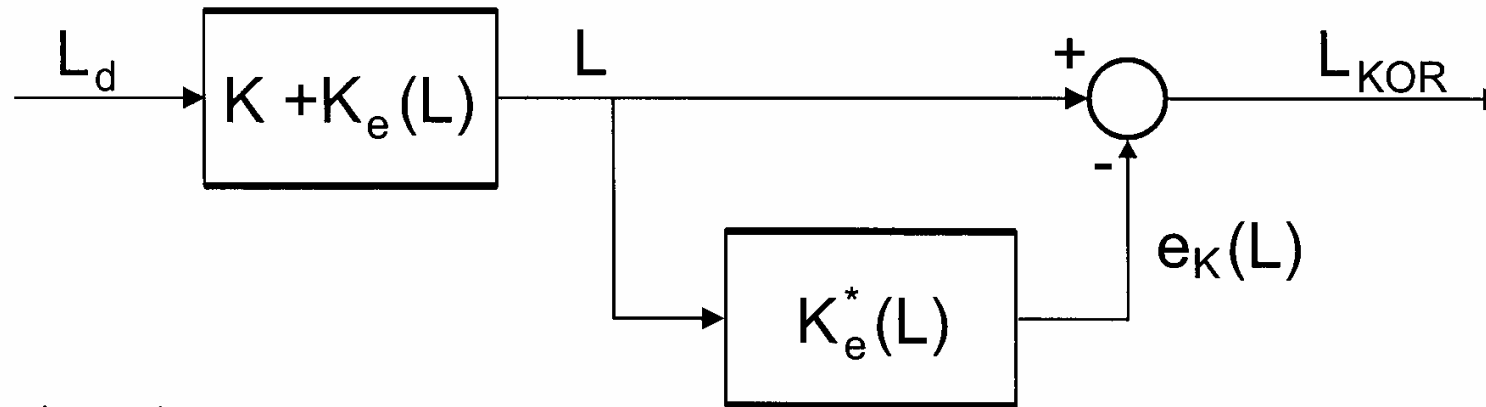
$$MS : Y = (K + K_M \cdot X_M) \cdot X + A$$

$$MS_M : Y_M = K_{MK} \cdot X_M$$

$$X = \frac{1}{K + K_M \cdot X_M} \cdot (Y - A)$$

$$X_{KOR} = \frac{1}{K + (K_M / K_{MK}) \cdot Y_M} \cdot (Y - A)$$

Primer: računsko korekcija pri merilnih letvah (1) metoda izračuna korekcije outputa

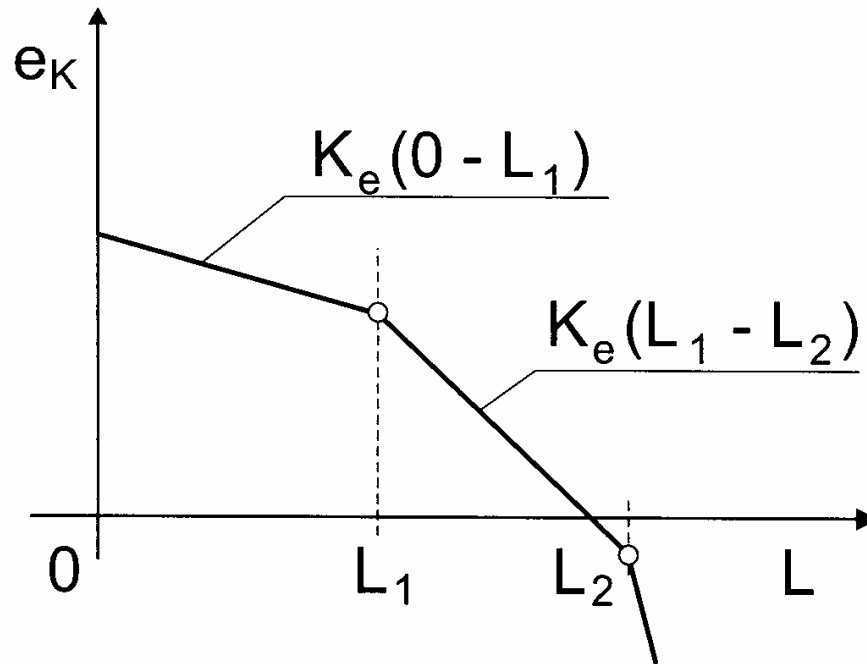


Legenda:

- L_d - merjena dolžina
- L - izmerjena dolžina
- e - pogrešek
- e_K - korekcija pogreška
- L_{KOR} - korigirana dolžina
- L_{KAL} - dolžina etalona

$$\begin{aligned}
 L_{KOR} &= L - e_K(L) \\
 &= L_d + e - e_K(L) \\
 &\approx L_d
 \end{aligned}$$

Računska korekcija pri merilnih letvah (2)



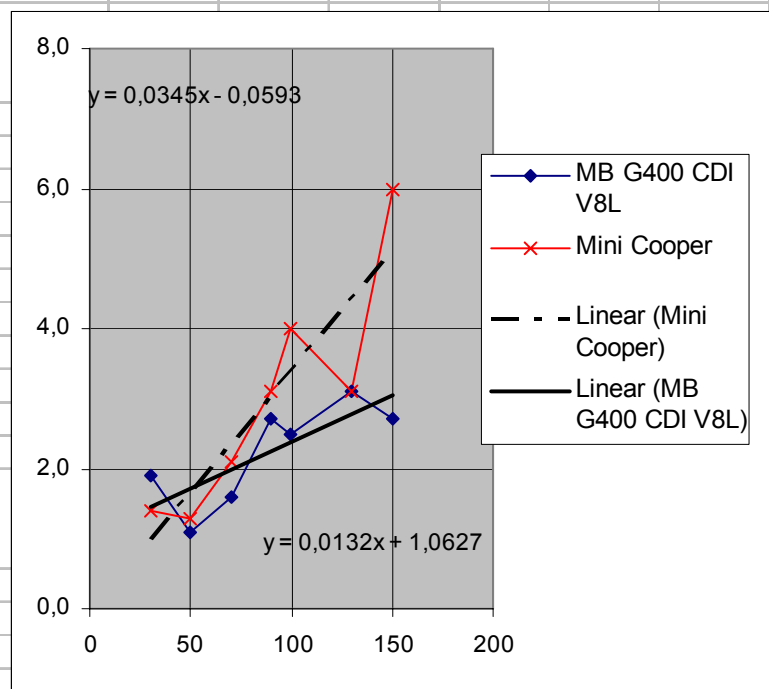
$$e_K(L) = L - L_{KAL}$$

$$L_d \approx L_{KAL}$$

Legenda:

- L_d - merjena dolžina
- L - izmerjena dolžina
- e - pogrešek
- e_K - korekcija pogreška
- L_{KOR} - korigirana dolžina
- L_{KAL} - dolžina etalona

Izmera	MB G400 CDI V8L	Napaka abs	Napaka rel	korekcija		
				v korigiran a	Napaka abs	Napaka rel
30	28,1	1,0%	6,8%	28,54	0,2%	1,6%
50	48,9	0,6%	2,2%	48,28	-0,3%	-1,3%
70	68,4	0,8%	2,3%	68,01	-0,2%	-0,6%
90	87,3	1,4%	3,1%	87,75	0,2%	0,5%
100	97,5	1,3%	2,6%	97,62	0,1%	0,1%
130	126,9	1,6%	2,4%	127,22	0,2%	0,3%
150	147,3	1,4%	1,8%	146,96	-0,2%	-0,2%
V max				korekcija		
190				1,0627		
				0,0132		
Izmera	Mini Cooper	Napaka abs	Napaka rel	korekcija		
				v korigiran a	Napaka abs	Napaka rel
30	28,6	0,7%	4,9%	28,91	0,2%	1,1%
50	48,7	0,7%	2,7%	48,22	-0,3%	-1,0%
70	67,9	1,1%	3,1%	67,53	-0,2%	-0,6%
90	86,9	1,6%	3,6%	86,84	0,0%	-0,1%
100	96,0	2,1%	4,2%	96,49	0,3%	0,5%
130	126,9	1,6%	2,4%	125,46	-0,8%	-1,1%
150	144,0	3,2%	4,2%	144,77	0,4%	0,5%
				korekcija		
				-0,0593		
				0,0345		
				Yi: Merilni rezultat pred korekcijo sistematičnega pogreška		
				Ykor: Merilni rezultat po korekciji sistematičnega pogreška		



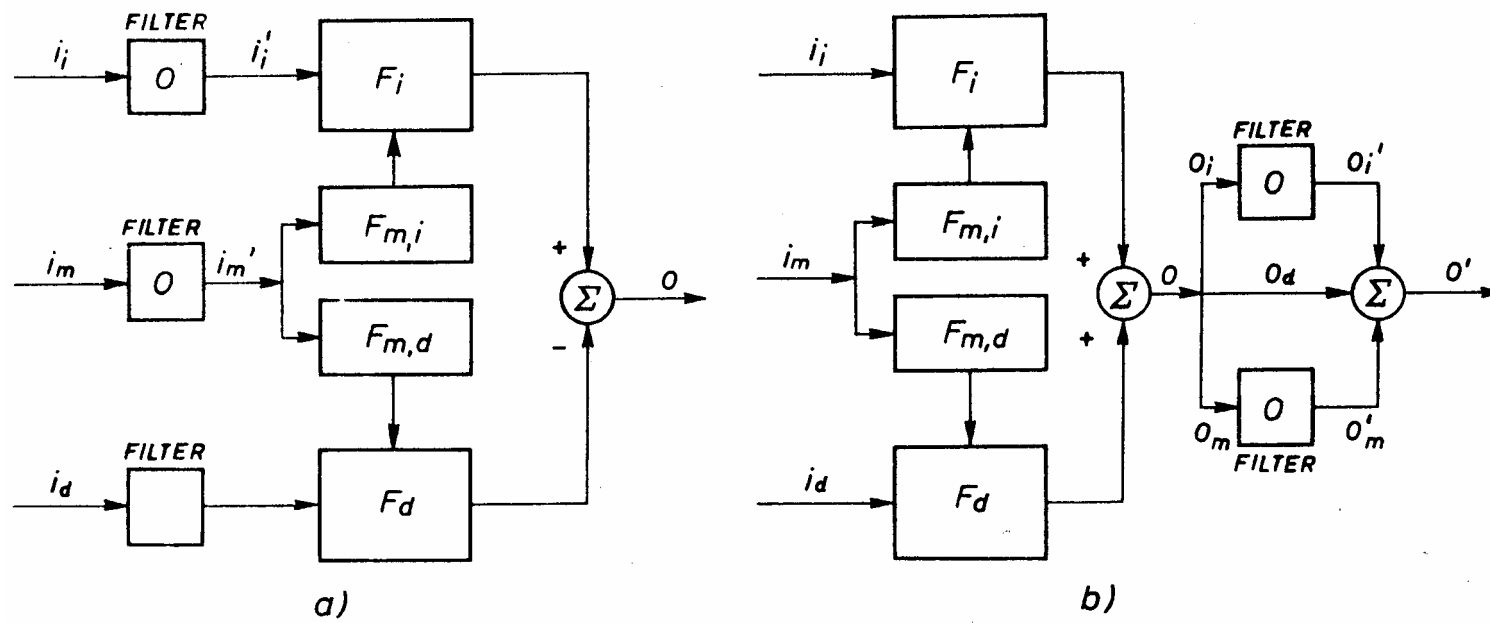
$$e_i = Y_i - Y_R$$

$$e_k(Y) = e(e_i, Y_i)$$

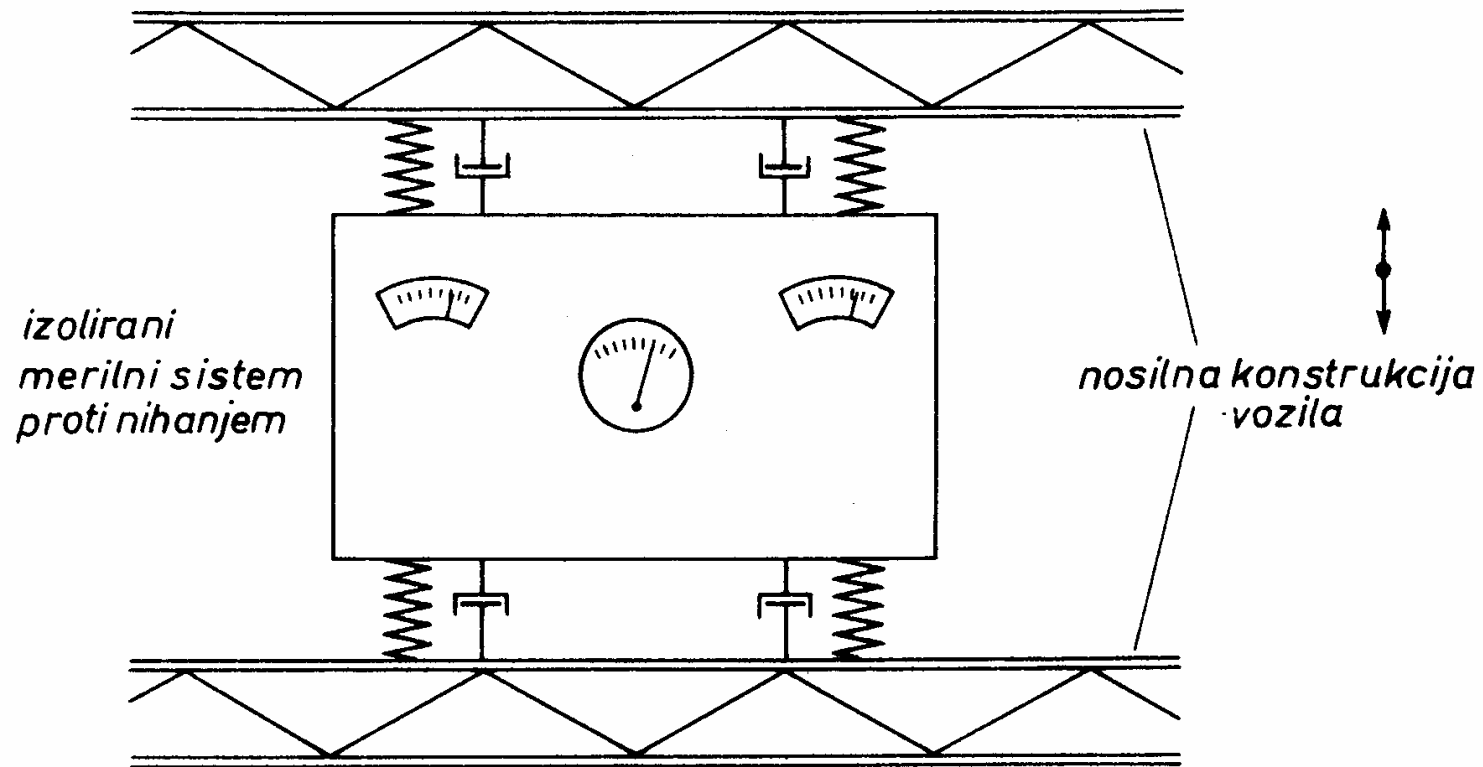
$$Y_{KOR} = Y - e_k(Y)$$

$$Y_{KOR} = Y_d + e - e_k(Y) \approx Y_d$$

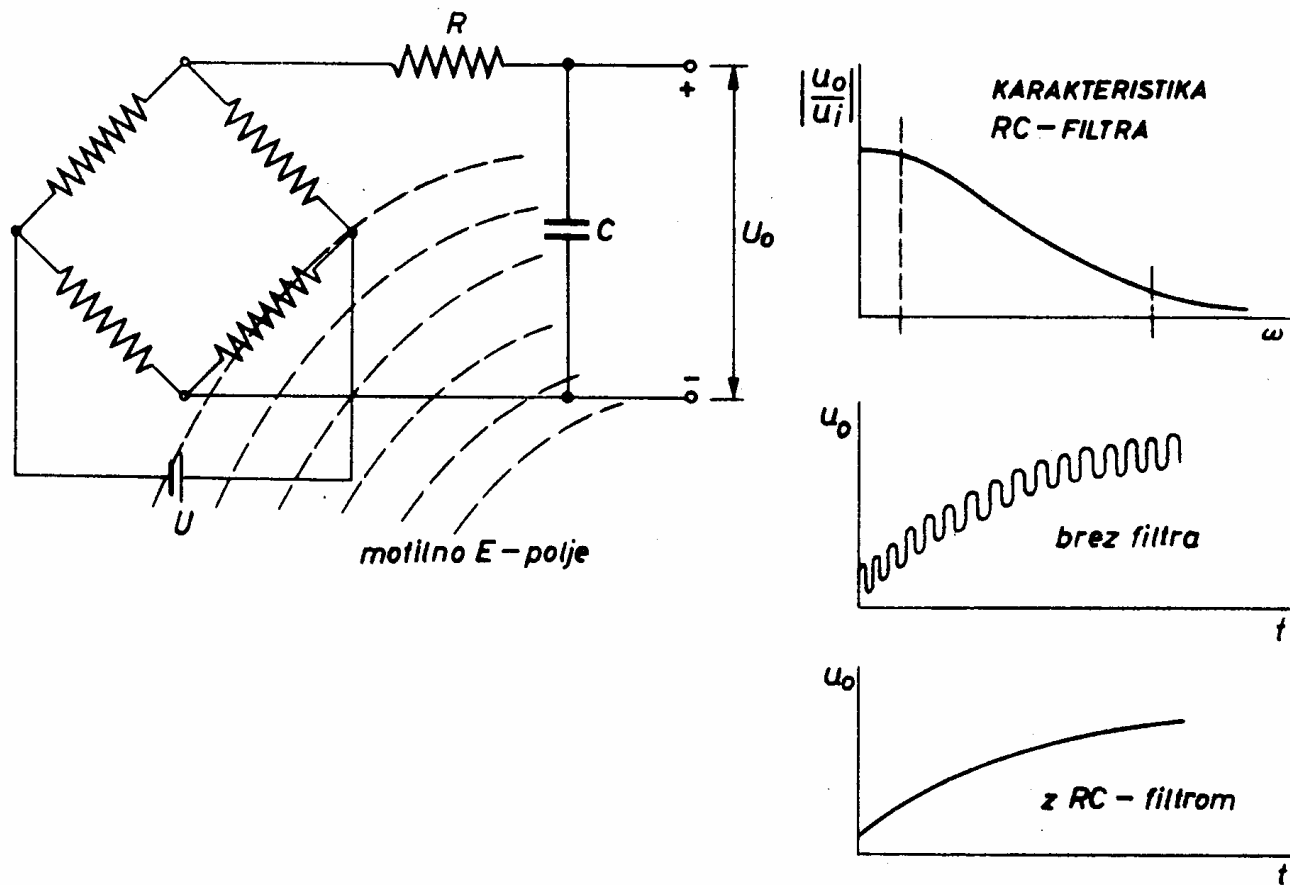
Splošni principi filtriranja signalov na inputu oziroma outputu (filtriranje signalov)



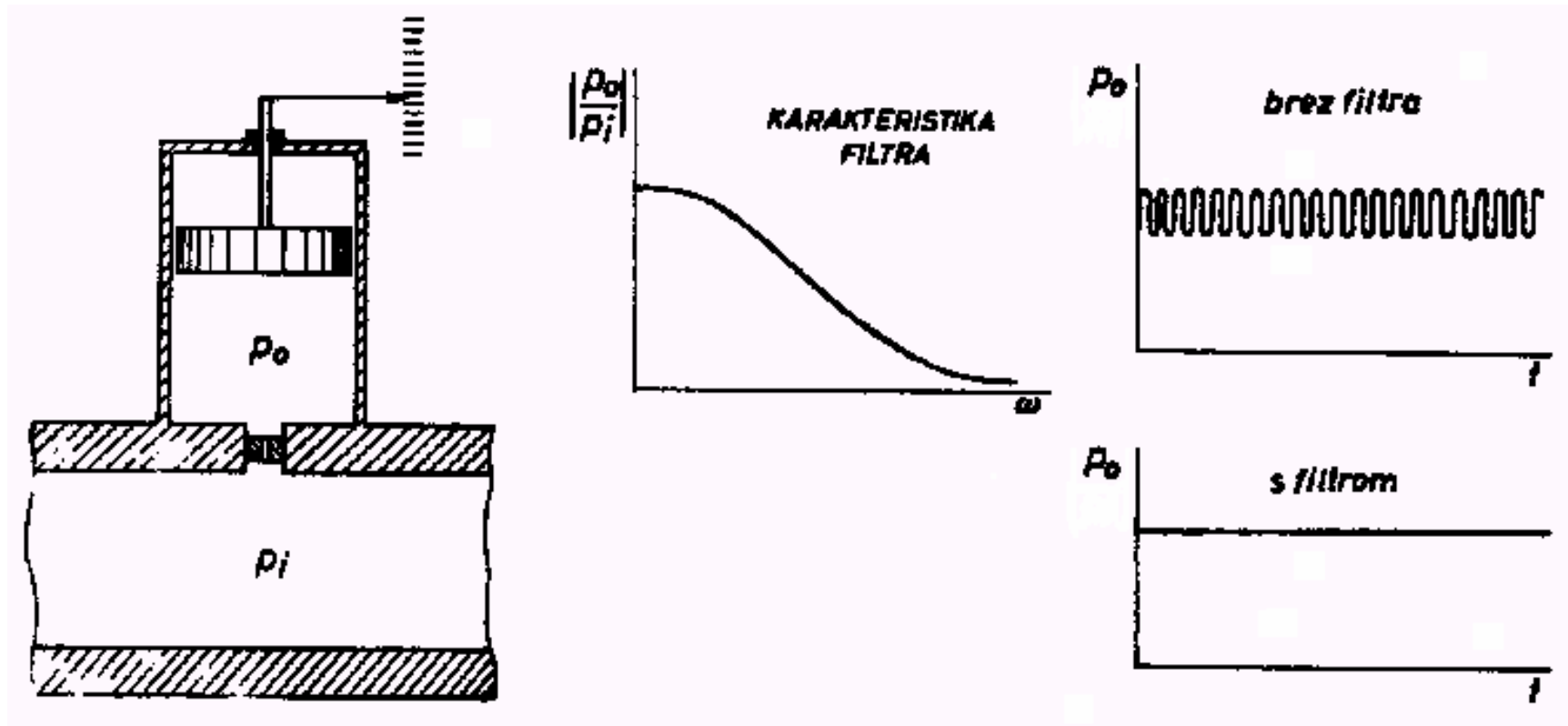
Mehanski filter proti nihanjem: izoliranje merilnega sistema



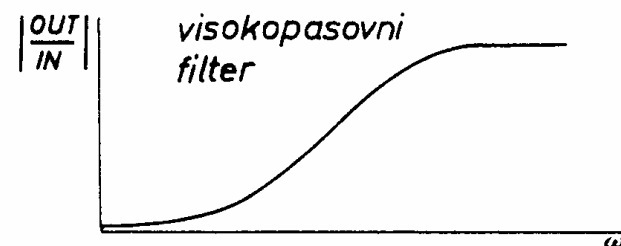
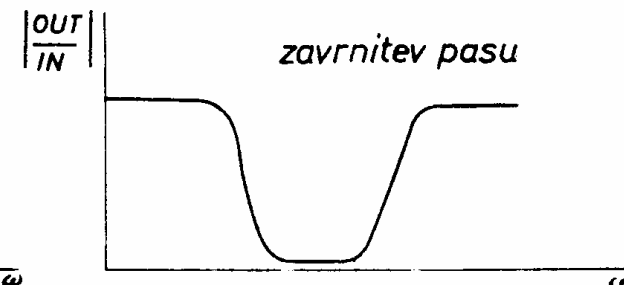
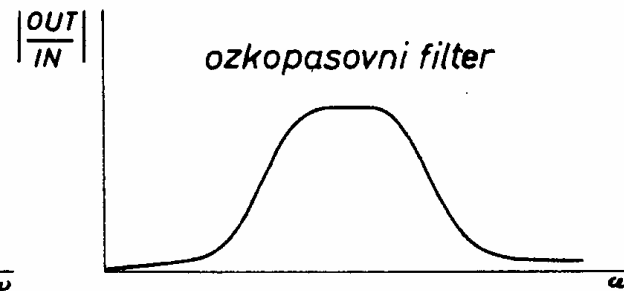
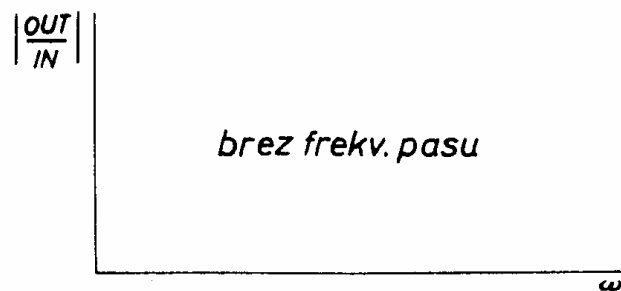
Električni RC-filter za preprečevanje vpliva motenj (motilnih inputov)



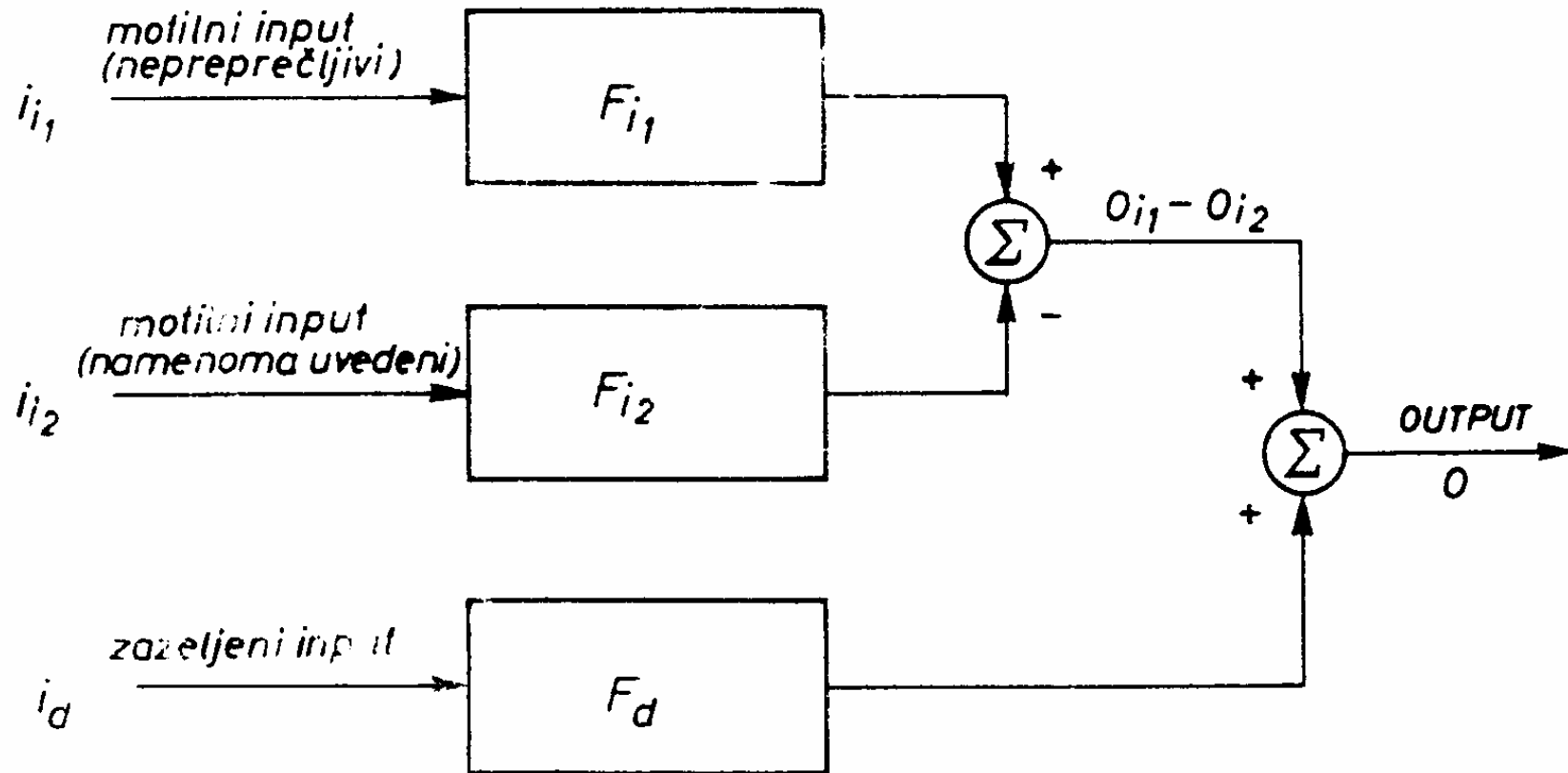
Pnevmatični filter pri merjenju tlakov



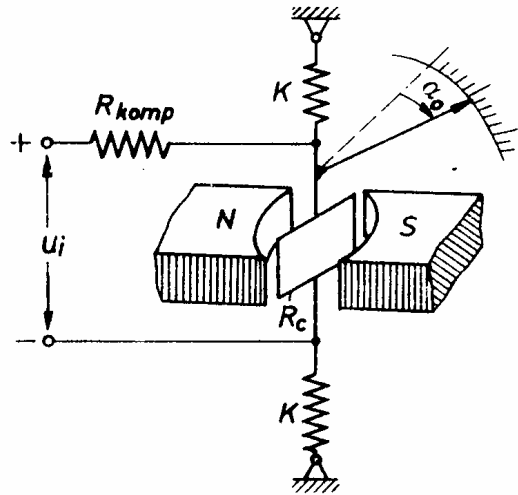
Osnovni tipi filtrov



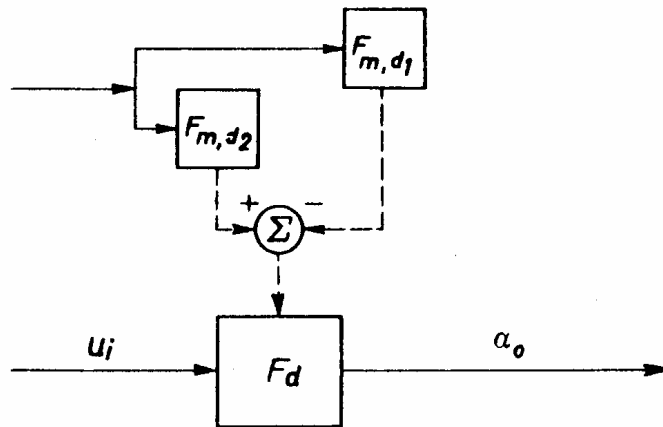
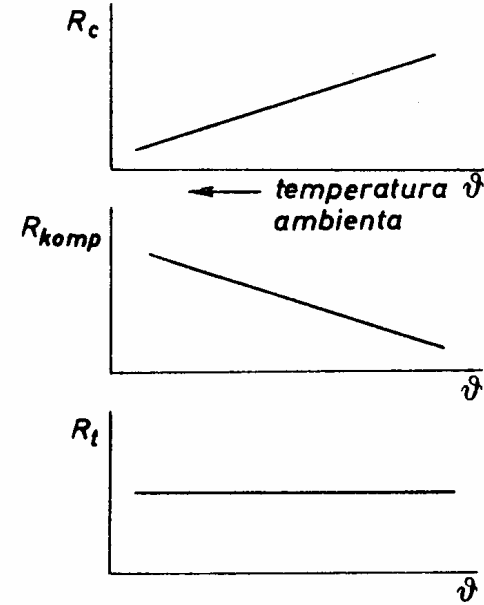
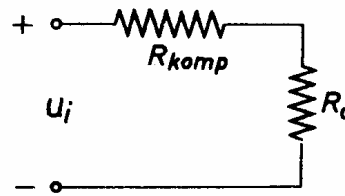
Metoda nasprotujočih se signalov



Metoda nasprotujočih se signalov



$$\alpha_0 = K_i = K \left[\frac{U_i}{R_c + R_{komp}} \right]$$



4. Lastnosti merilnih elementov / sistemov

**Merilni sistemi
I.del**

Karakteristike merilnih elementov/sistemov :

STATIČNE KARAKTERISTIKE

(občutljivost, nelinearnost, histereza, razločljivost)

DINAMIČNE KARAKTERISTIKE

(odgovor prehoda – časovni prostor; frekvenčna karakteristika – frekvenčni prostor)

ENERGETSKE KARAKTERISTIKE

(impedanca, obremenilni efekt)

4.1 Statične karakteristike merilnih sistemov

Merilni sistemi
I.del

Občutljivost (1)

Statični model idealnega linearnega merilnega sistema je izražen:

$$Y = K \cdot X$$

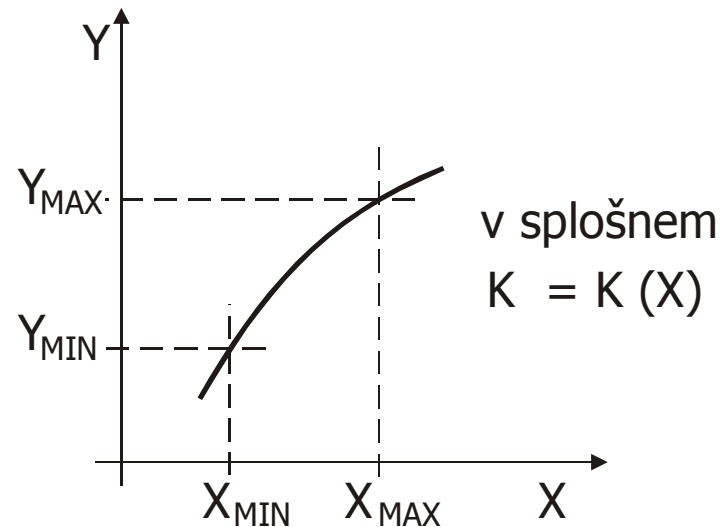
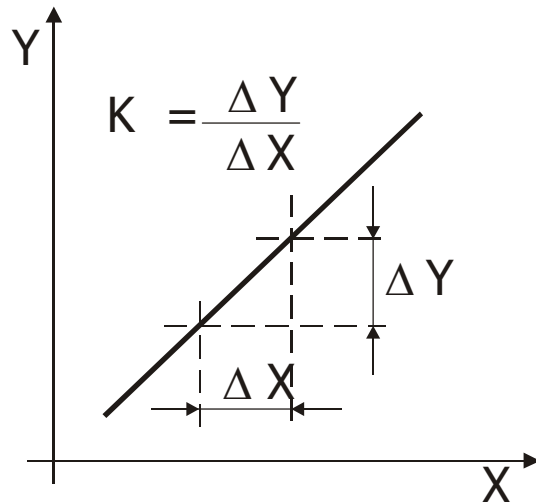
Občutljivost sistema oz. elementa, K , je opredeljena kot razmerje spremembe outputa in inputa.

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

V splošnem pa je občutljivost funkcija inputa v danem merilnem območju.

$$K = K(X)$$

Občutljivost (2)



Pri tem merilno območje, MO, pripišemo tako inputni in outputni veličini, kot sledi:

$MO_X: \{X_{\text{MIN}}, X_{\text{MAX}}\}$ (inputno merilno območje)

$MO_Y: \{Y_{\text{MIN}}, Y_{\text{MAX}}\}$ (outputno merilno območje)

MO je območje v katerem pričakujemo določene lastnosti merilnega sistema.

Vir: Peklenik

Občutljivost (3)

Primer: Termoelement

$$MO_X = \{ 100, 250 \text{ } ^\circ\text{C} \}$$

$$MO_Y = \{ 4, 10 \text{ mV} \}$$

Idealna karakteristika MS:

V splošnem je željeno, da je občutljivost sistema konstantna v merilnem območju.

$$Y = K \cdot X + a \quad \text{na intervalu } \{ X_{MIN}, X_{MAX} \}$$

pri čemer je občutljivost opredeljena z izrazom

$$K = \frac{Y_{MAX} - Y_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}},$$

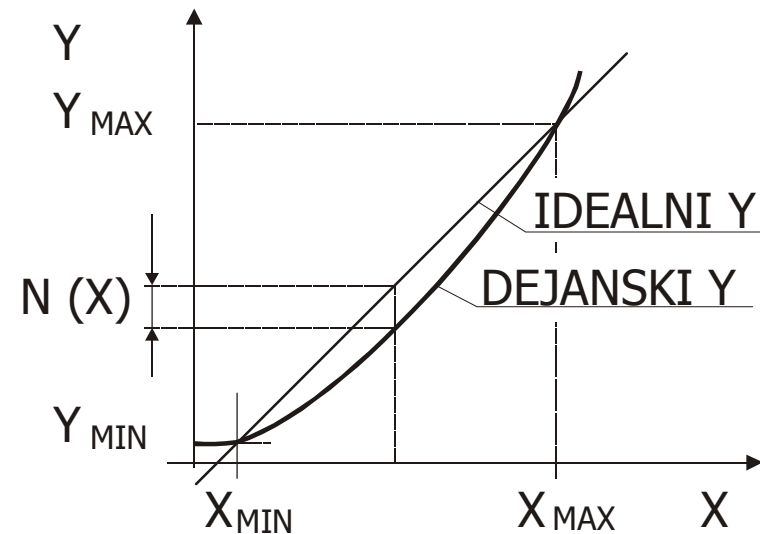
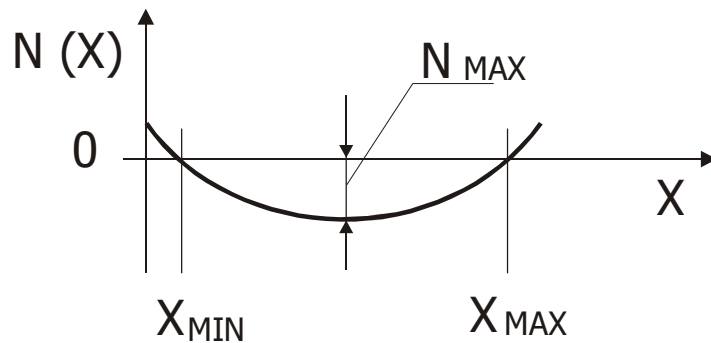
a pa predstavlja premik karakteristike iz ničlišča.

Nelinearnost

Zaradi vplivov nelinearnosti, dejanska karakteristika sistema odstopa od linearne karakteristike:

$$N(X) = Y(X) - (K \cdot X + a)$$

$$N\% = \frac{N_{MAX}}{Y_{MAX} - Y_{MIN}} \cdot 100$$



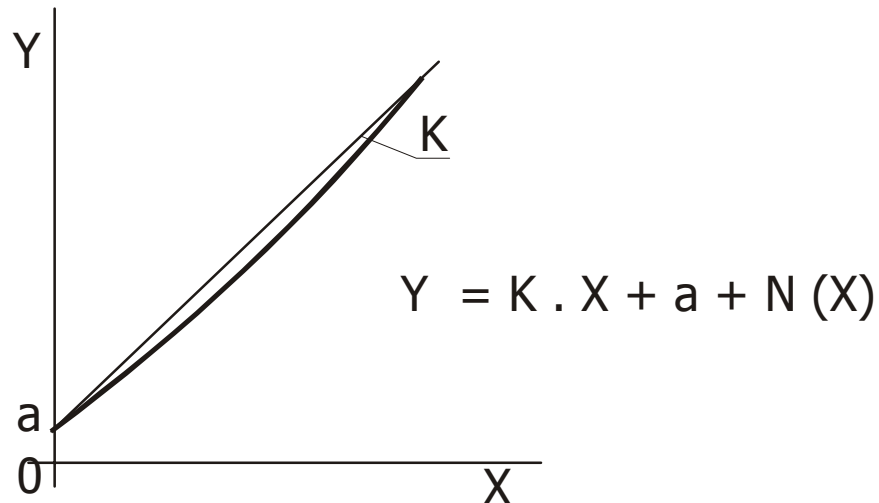
Nelinearnost merilnega sistema

Vir: Peklenik

Modifikacijski in motilni vplivi (1)

Modifikacijski vpliv:

1) vpliv na občutljivost: $K_M \cdot X_M$



2) vpliv na premik: $K_A \cdot X_A$

kjer sta K_M in K_A konstanti okolja in X_M modifikacijski input in X_A motilni input

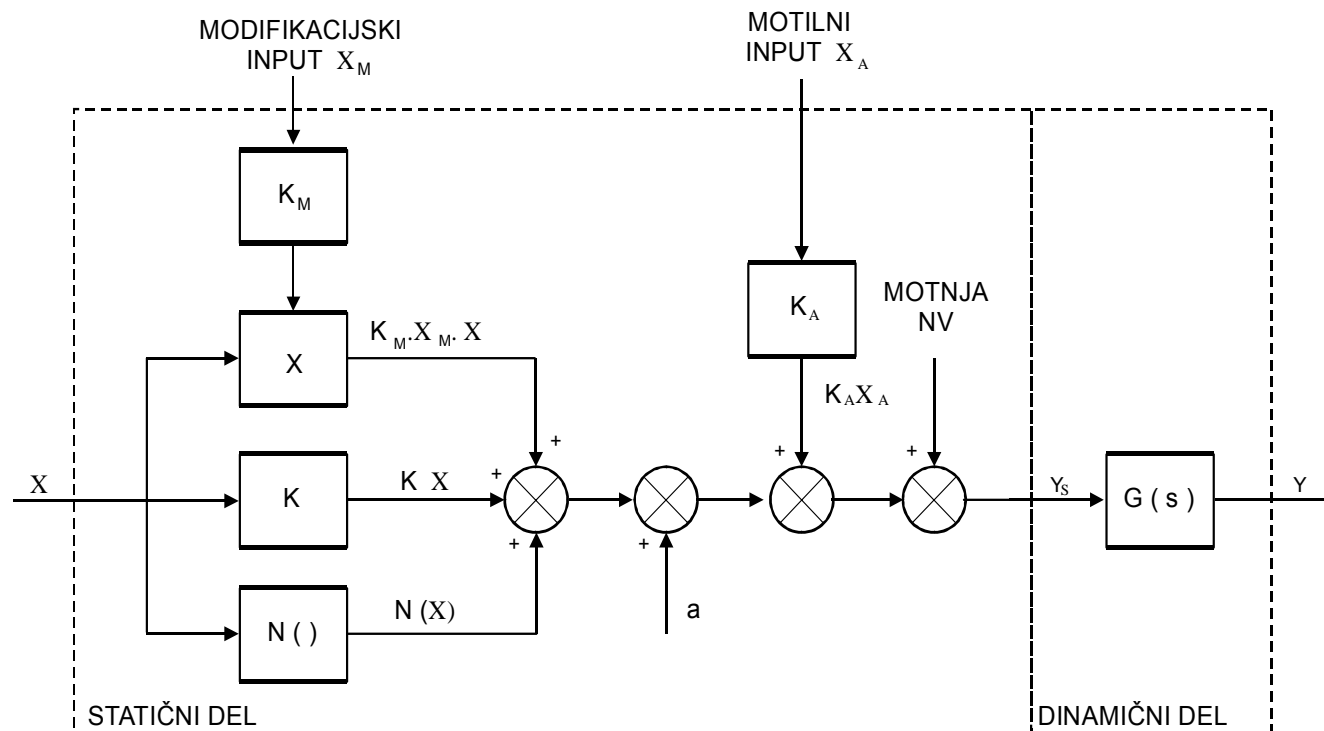
Vir: Peklenik

Modifikacijski in motilni vplivi (2)

Torej:

$$Y = K \cdot X + a + N(X) + K_M \cdot X_M \cdot X + K_A \cdot X_A$$

$$= (K + K_M \cdot X_M) \cdot X + a + K_A \cdot X_A + N(X)$$



Strukturno izoblikovanje outputa

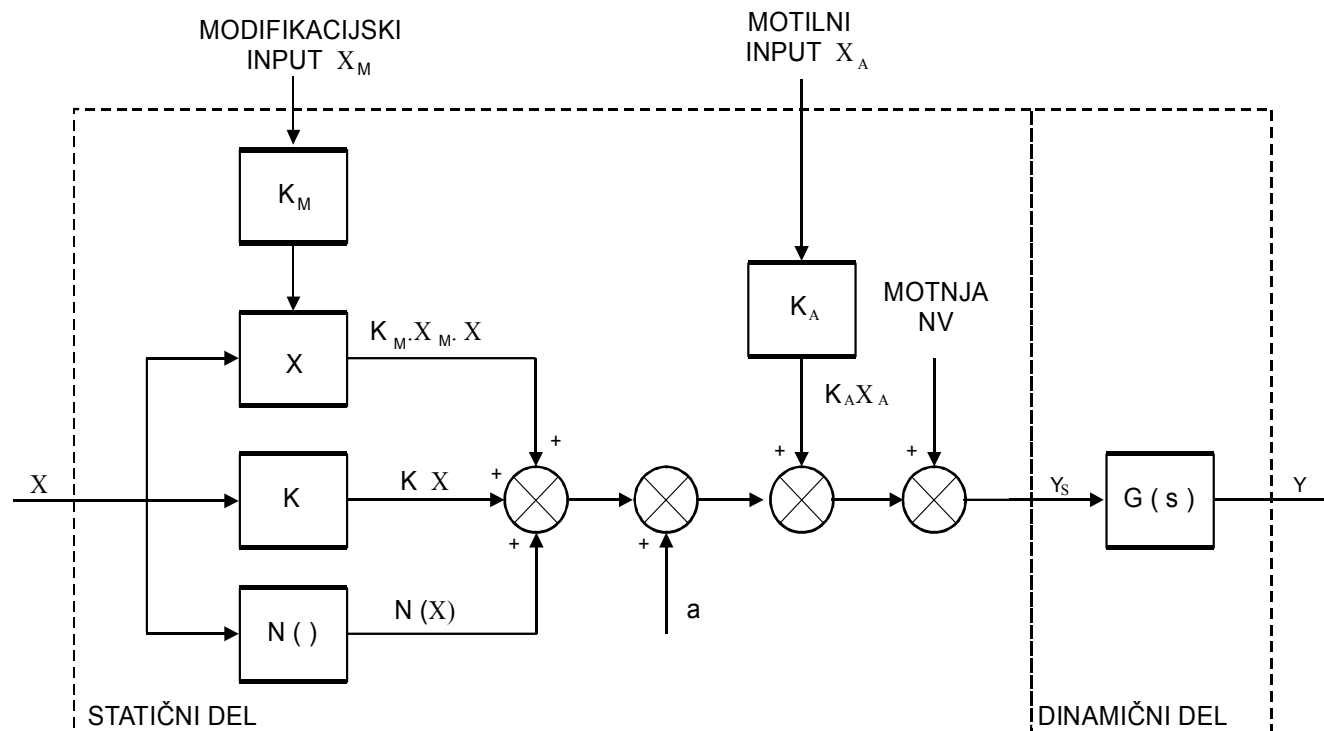
Vir: Peklenik

Modifikacijski in motilni vplivi (2)

Torej:

$$Y = K \cdot X + a + N(X) + K_M \cdot X_M \cdot X + K_A \cdot X_A$$

$$= (K + K_M \cdot X_M) \cdot X + a + K_A \cdot X_A + N(X)$$



Strukturno izoblikovanje outputa

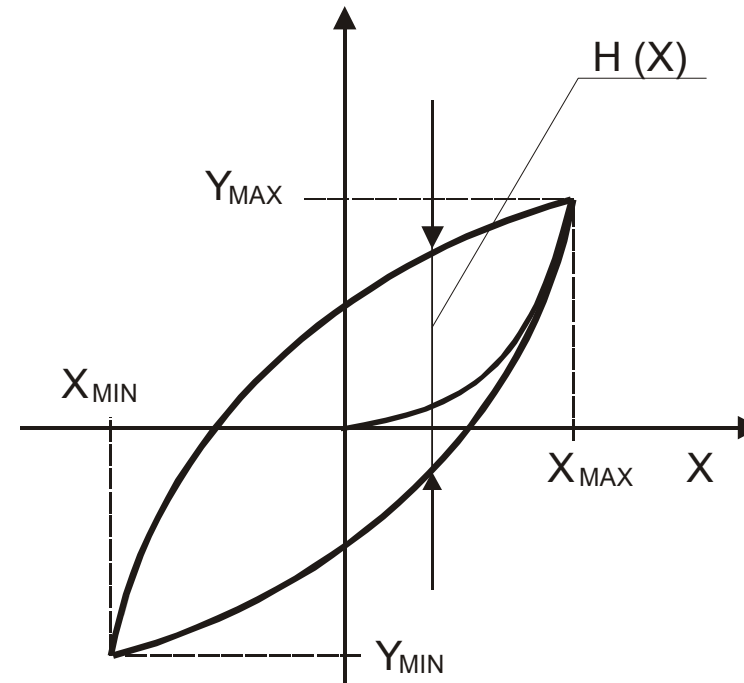
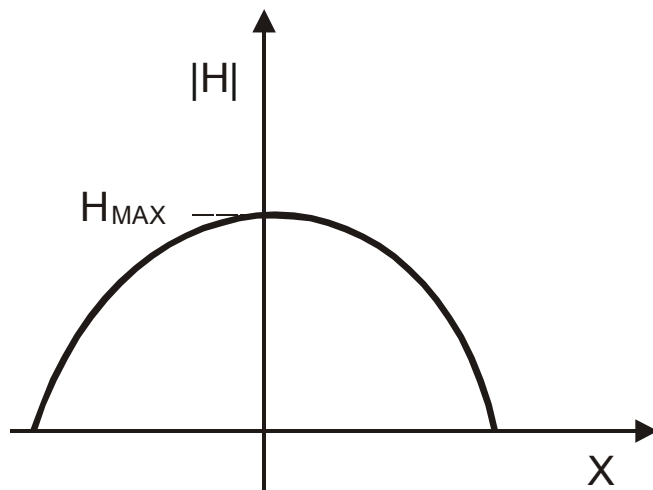
Vir: Peklenik

Histereza (ang. hysteresis)

$$H\% = \frac{H_{MAX}}{Y_{MAX} - Y_{MIN}} \cdot 100$$

$$H(X) = |Y(X \uparrow) - Y(X \downarrow)|$$

$$H_{MAX} = \max(H(X))$$



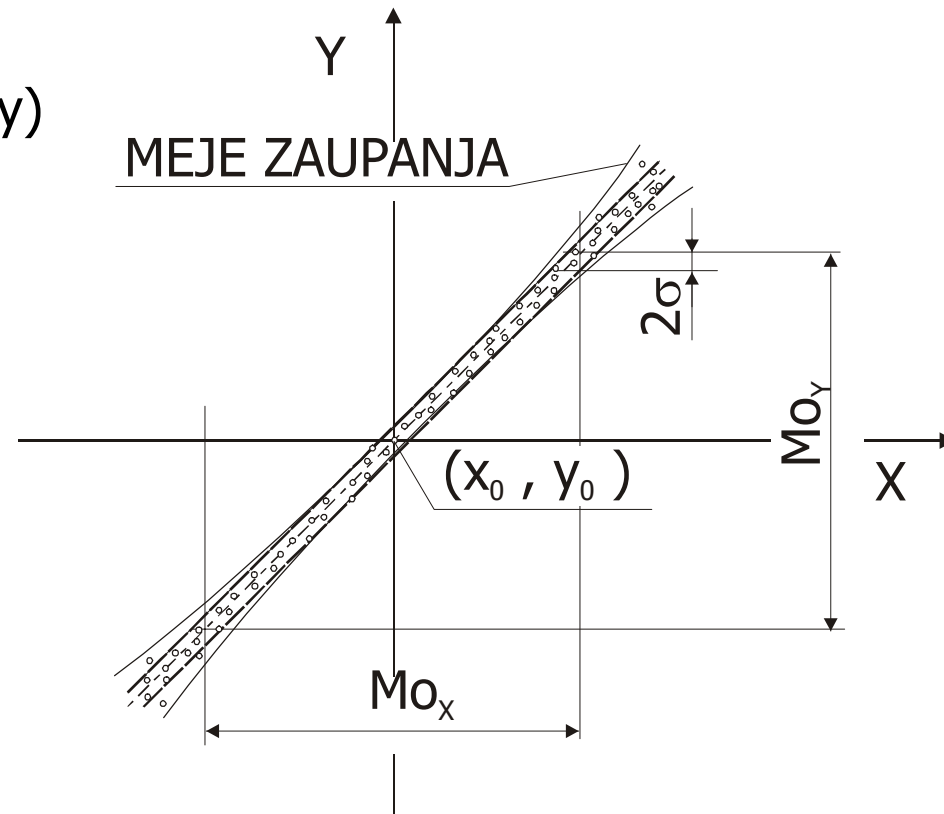
Histereza

Vir: Peklenik

Specifikacija linearitete (ang. linearity)

Ponovljivost:
(ang. repeatability, accuracy)

$$P\% = \frac{2\sigma}{MO_Y} \cdot 100$$



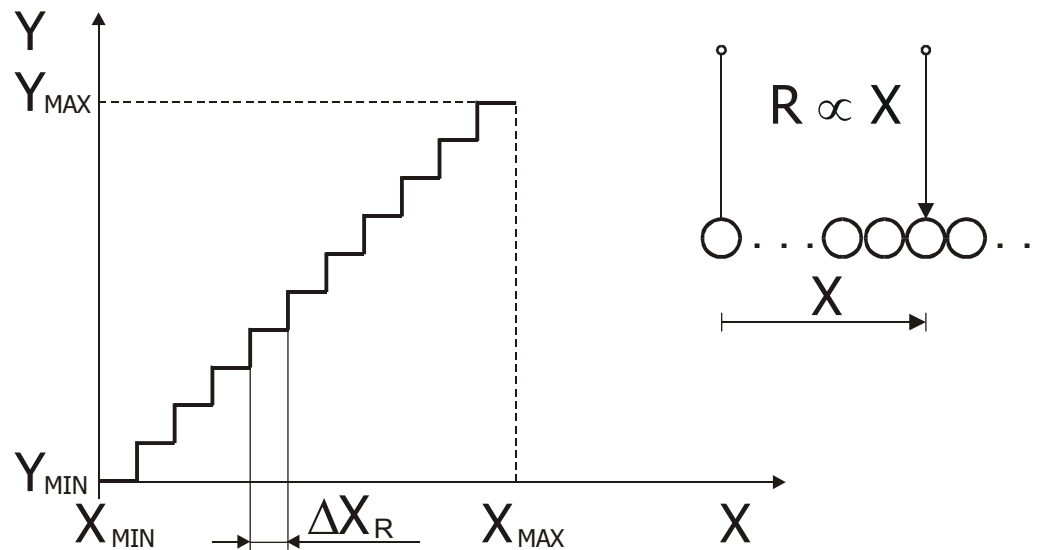
Lineariteta merilnega sistema

Vir: Peklenik

Razločljivost (ang. resolution)

$$R\% = \frac{\Delta X_R}{X_{MAX} - X_{MIN}} \cdot 100 = \frac{\Delta Y_R}{Y_{MAX} - Y_{MIN}}$$

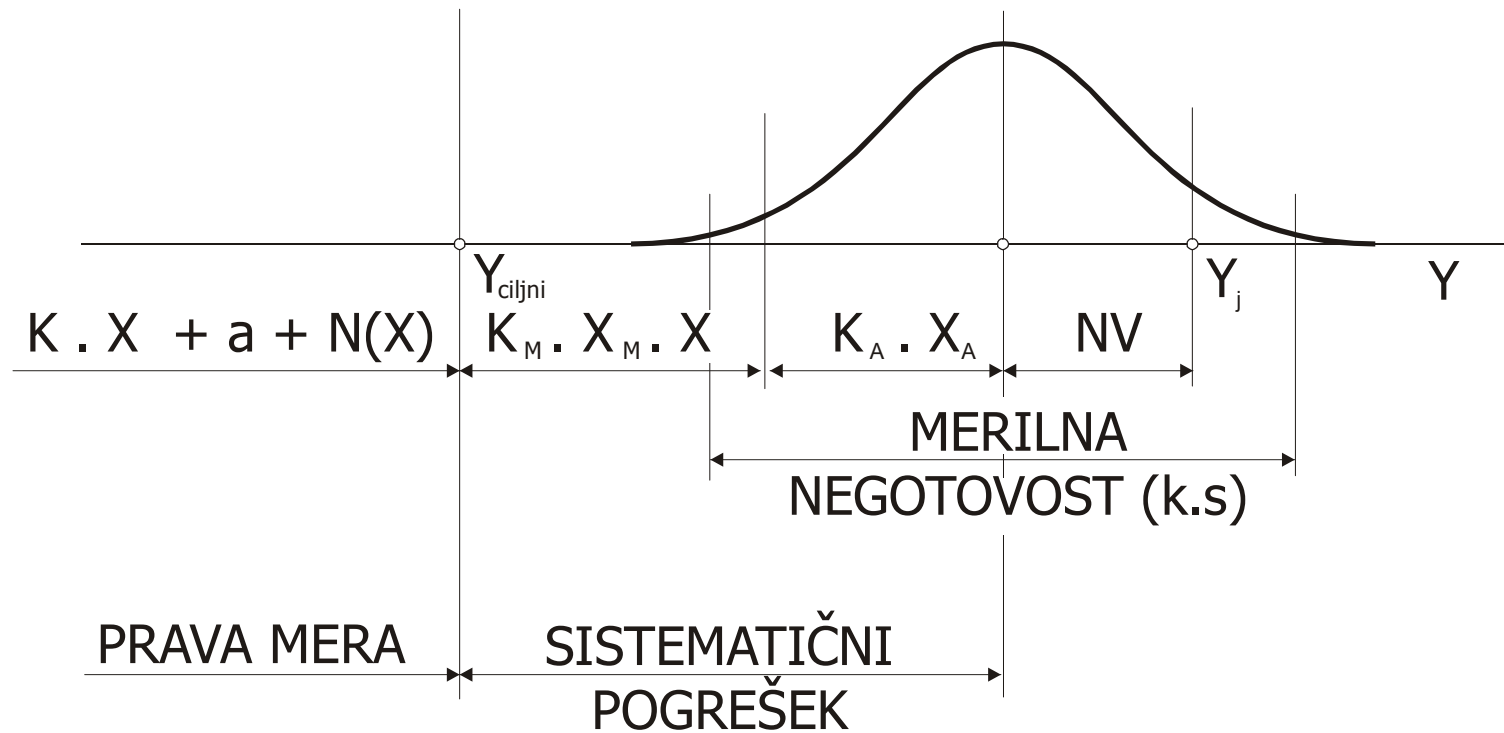
Resolucija (razločljivost) je izražena kot % MO. Dostikrat resolucijo izrazimo kar kot ΔX_R , ker je le ta neodvisna od X.



Vir: Peklenik

Merilna negotovost (ang. measurement uncertainty)

Merilni rezultat: Z merjenjem dobljena vrednost, pripisana merjeni veličini. Merilni rezultat je popoln, če ima podano pripadajočo merilno negotovost.



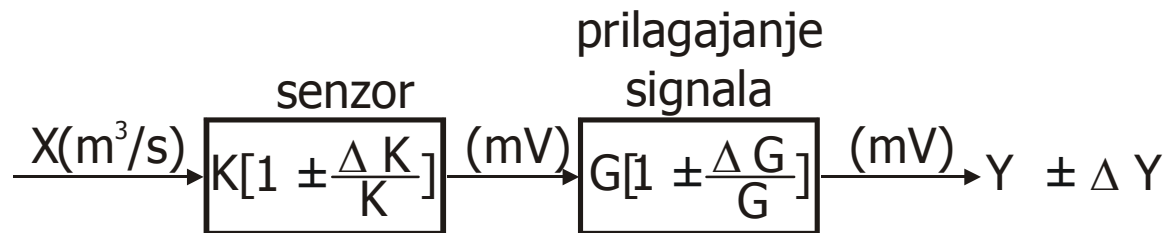
4.2 Merilna negotovost

**Merilni sistemi
I.del**

Neformalni pristop (1)

Neformalni pristop

Želimo določiti merilno negotovost sistema na sliki 1.



Negotovosti sistema za merjenje pretoka

Nominalna vrednost meritve je

$$Y = K \cdot G \cdot X$$

z opredeljenim odstopanjem kot sledi:

$$Y \pm \Delta Y = (K \pm \Delta K)(G \pm \Delta G)X$$

Neformalni pristop (2)

Možen način izraza merilne negotovosti je:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta Y}{Y} &= \frac{KGX}{Y} \pm \frac{GX\Delta K}{Y} \pm \frac{KX\Delta G}{Y} \pm \frac{\Delta K\Delta GX}{Y} - \frac{Y}{Y} = \\ &= \pm \left[\frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta G}{G} \right]\end{aligned}$$

Pri tem smo predpostavili, da je sta ΔK in ΔG majhni odstopanji in je zato njun zmnožek neznaten $\Delta K \cdot \Delta G \approx 0$.

PRIMER: Točnost merilnega sistema za merjenje pretoka (1)

Kakšna je točnost, ako je karakteristika senzorja

$$K \pm \frac{\Delta K}{K} = 10 \text{ mV} / (\text{m}^3 / \text{s}) \pm 1,5 \%$$

in karakteristika podsistema za prilagajanje oz. manipulacijo signala

$$G \pm \frac{\Delta G}{G} = 2 \text{ mA} / \text{mV} \pm 0,5 \%$$

PRIMER: Točnost merilnega sistema za merjenje pretoka (2)

Točnost merilnega sistema je torej izražena z

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \pm[0.015 + 0.005] = \pm 0,020 = \pm 2 \%$$

Prenosna funkcija in netočnost merilnega sistema je torej $20 \text{ mA}/(\text{m}^3/\text{s}) \pm 2\%$, oz. $20 \pm 0,4 \text{ mA}/(\text{m}^3/\text{s})$.

To so načeloma mejne vrednosti netočnosti (najslabši primer).

PRIMER: Točnost merilnega sistema za merjenje pretoka (3)

Če uporabimo statistično korektnější pristop, potem je sistemska točnost izražena z naslednjim izrazom:

$$\left[\frac{\Delta Y}{Y} \right]_{SD} = \left[(0.015)^2 + (0.005)^2 \right]^{1/2} = \pm 0.0158$$

Pri tem smo predpostavili, da so posamezne negotovosti izražene kot standardni odklon.

Tako je točnost tega sistema, okarakterizirana kot merilna negotovost, približno $\pm 1.6\%$.

Merilna negotovost označuje torej stopnjo točnosti v katero subjekt verjame, da je prisotna pri opravljanju meritve.

Seveda je analogna obravnava točnosti meritve, tudi ko posredno merimo neko veličino v mediju.

PRIMER: Meritev moči (1)

Merjenje moči P (posredno merjenje)

Ako izmerimo napetost in tok, potem lahko izračunamo moč kot sledi:

$$P = U \cdot I$$

Vprašanje je seveda, kako točno lahko izmerimo moč, če poznamo merilne negotovosti izmerkov U in I .

Npr. ako izmerimo U in I kot sledi:

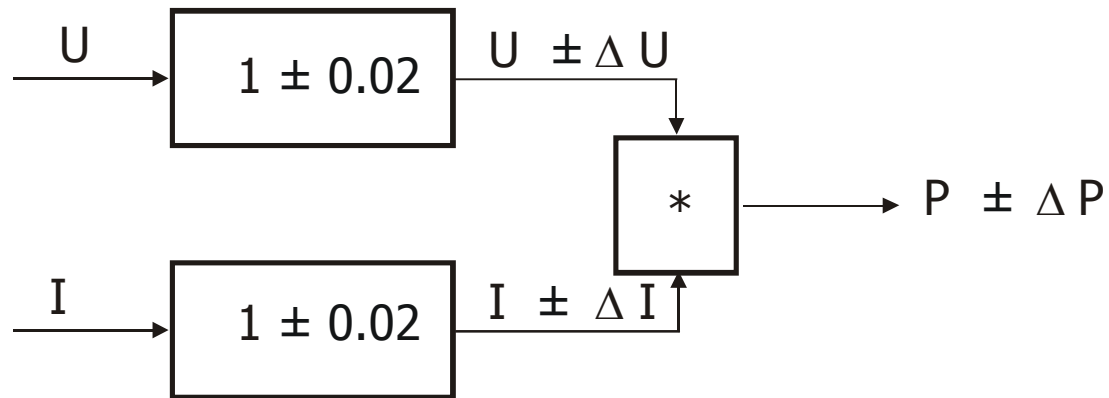
$$U = 100V \pm 2V \text{ in } I = 10A \pm 0.2A$$

$$\text{Tako je } \frac{\Delta P}{P} = \pm \left[\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right] = \pm(0.02 + 0.02) = \pm 4\%$$

Izmerjena moč leži v intervalu

$$P = U \cdot I \pm 4\% = 1000 \pm 40 = \{960W, 1040W\}.$$

PRIMER: Meritev moči (2)



Merilna negotovost pri merjenju moči

V splošnem želimo ocenjevati merilno negotovost rezultata na osnovi znanih merilnih negotovosti osnovnih elementov oz. v meritvah.

PRIMER: Meritev moči (3)

Manj neformalen pristop

Ako je rezultat, Y , dana funkcija neodvisnih spremenljivk (osnovne meritve) X_1, X_2, \dots, X_n lahko zapišemo:

$$Y = Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Merilna negotovost rezultata ΔY je opredeljena z:

$$\Delta Y = \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

PRIMER: Meritev moči (4)

Pri tem predpostavimo, da so posamezne negotovosti Δx_i izražene kot standardni odklon. Pri tako izraženi merilni negotovosti smo predpostavili, da je sistemski odstopek znan po smeri in velikosti. Sistemski odstopek praviloma ocenimo v procesu umerjanja.

V primeru meritve moči ne bi bila negotovost 4% (merilna negotovost najslabšega primera), temveč:

$$\Delta P = \left[(I \cdot 2)^2 + (U \cdot 0.2)^2 \right]^{1/2} = \left[(10 \cdot 2)^2 + (100 \cdot 0.2)^2 \right]^{1/2} = 28.3W$$

in

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{28.3W}{1000W} = 0.0283 \text{ oz. } 2.83\%$$

PRIMER: Negotovost upora bakrene žice (1)

Upornost žice je izražena z enačbo:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - 20)]$$

pri čemer je znana upornost pri 20°C:

$$R_0 = 6\Omega \pm 0.3\%,$$

temperaturni koeficient upora žice:

$$\alpha = 0.004^\circ C^{-1} \pm 1\%,$$

temperatura žice

$$T = 30 \pm 1^\circ C.$$

PRIMER: Negotovost upora bakrene žice (2)

Določimo upornost žice in negotovost izračunane upornosti.

Nominalna upornost R je:

$$R = (6)[1 + (0.004)(30 - 20)] = 6.24\Omega$$

Posamezne člene merilne negotovosti izračunamo takole:

$$\frac{\partial R}{\partial R_0} = 1 + \alpha(T - 20) = 1 + (0.004)(30 - 20) = 1.04$$

$$\frac{\partial R}{\partial \alpha} = R_0(T - 20) = (6)(30 - 20) = 60$$

$$\frac{\partial R}{\partial T} = R_0\alpha = (6)(0.004) = 0.024$$

PRIMER: Negotovost upora bakrene žice (3)

Posamezne negotovosti so:

$$\Delta_{R_0} = (6)(0.003) = 0.018\Omega$$

$$\Delta_{\alpha} = (0.004)(0.01) = 4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\Delta_T = 1^{\circ}\text{C}$$

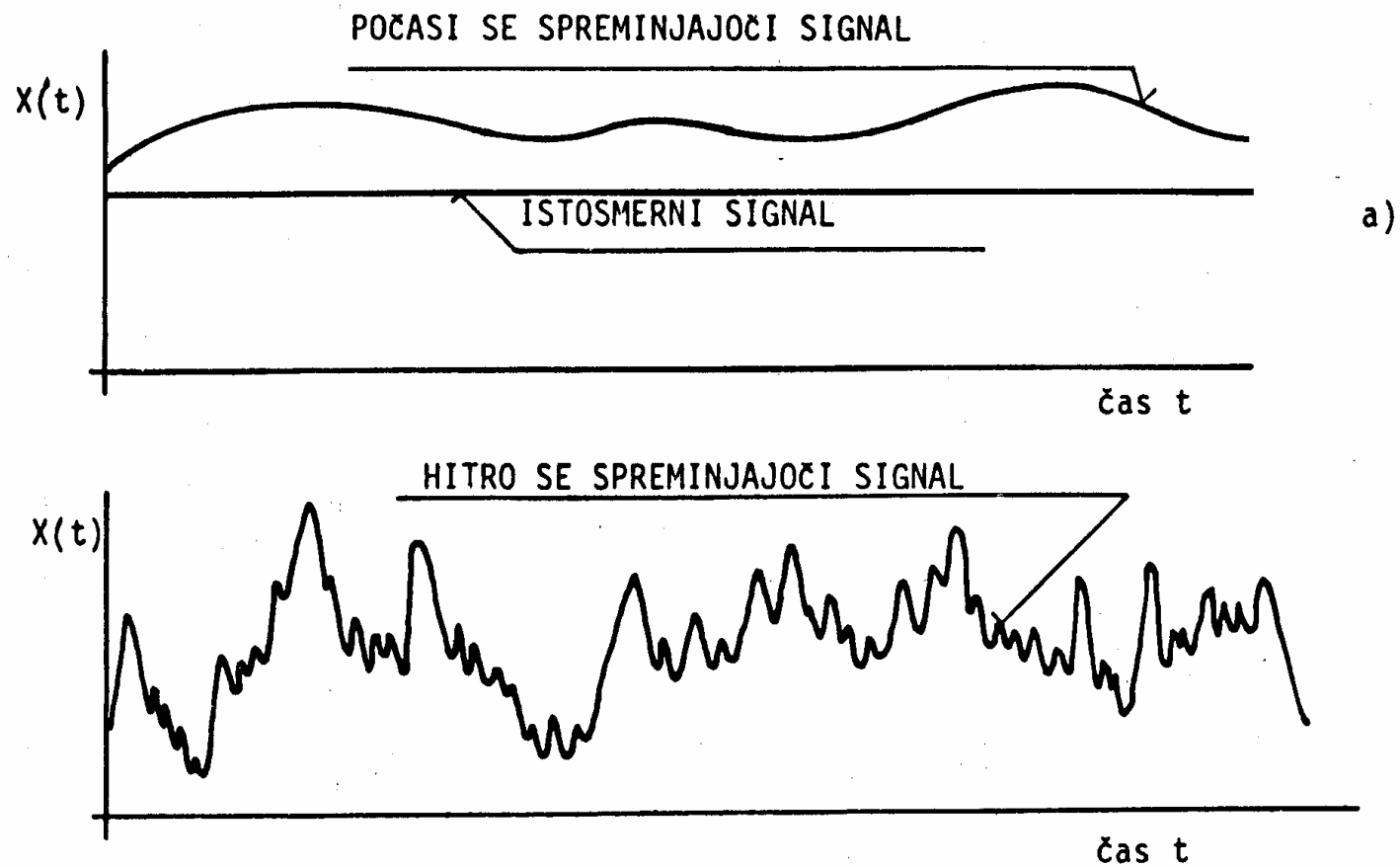
Tako je negotovost upornosti obravnavane žice:

$$\begin{aligned} \Delta_R &= \left[(1.04)^2 (0.018)^2 + (60)^2 (4 \cdot 10^{-5})^2 + (0.024)^2 (1)^2 \right]^{1/2} \\ &= 0.0305 \Omega \text{ oz } \frac{0.0305 \Omega}{6.2450} = 0.0049 (0.49 \%). \end{aligned}$$

4.3 Dinamične karakteristike merilnih sistemov

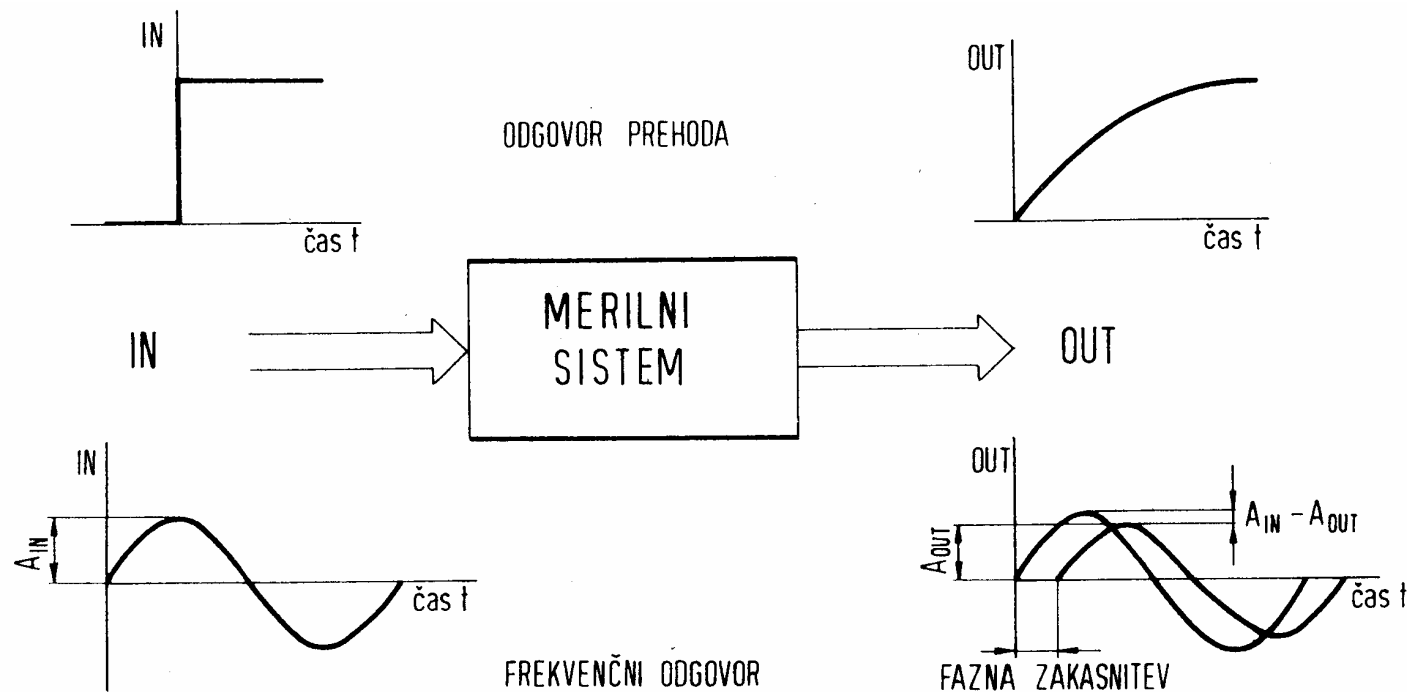
**Merilni sistemi
I.del**

Signal z različno frekvenčno vsebino



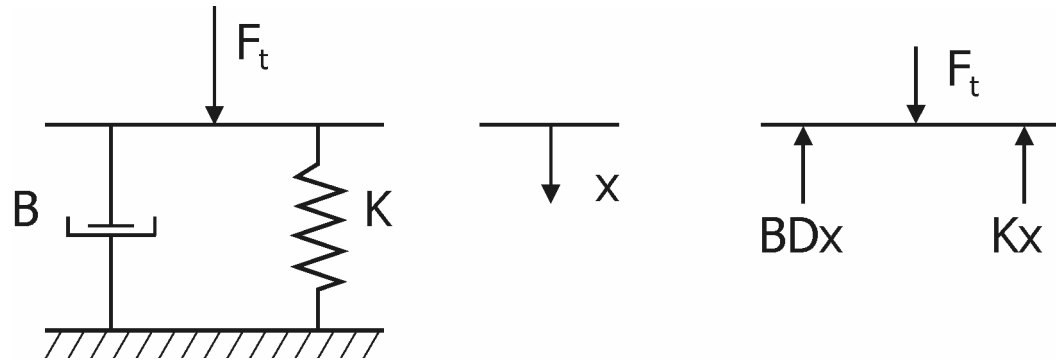
Dinamične karakteristike

- odgovor prehoda časovni prostor (impulzni odgovor)
- frekvenčni odgovor ... frekvenčni prostor



Vir: Peklenik

Sistemi 1. reda (1)



$$B\dot{x} + Kx = F_t \quad / : K$$

$$\tau \dot{x} + x = \frac{F_t}{K}$$

τ – časovna konstanta

$$\tau = \frac{B}{K}$$

Sistemi 1. reda (2)

Odgovor prehoda je koračni input (naslednja slika)

$$F_t = 0 \quad \text{pri } t < 0$$

$$F > 0 \quad \text{pri } t > 0$$

$$\tau Dx + x = \frac{F}{K} \quad (t > 0)$$

$$\int \text{ in upoštevamo da je pri } t = \infty \quad x = \frac{F}{K} = x_{ss}$$

Odgovor sistema 1. reda na koračni input (1)

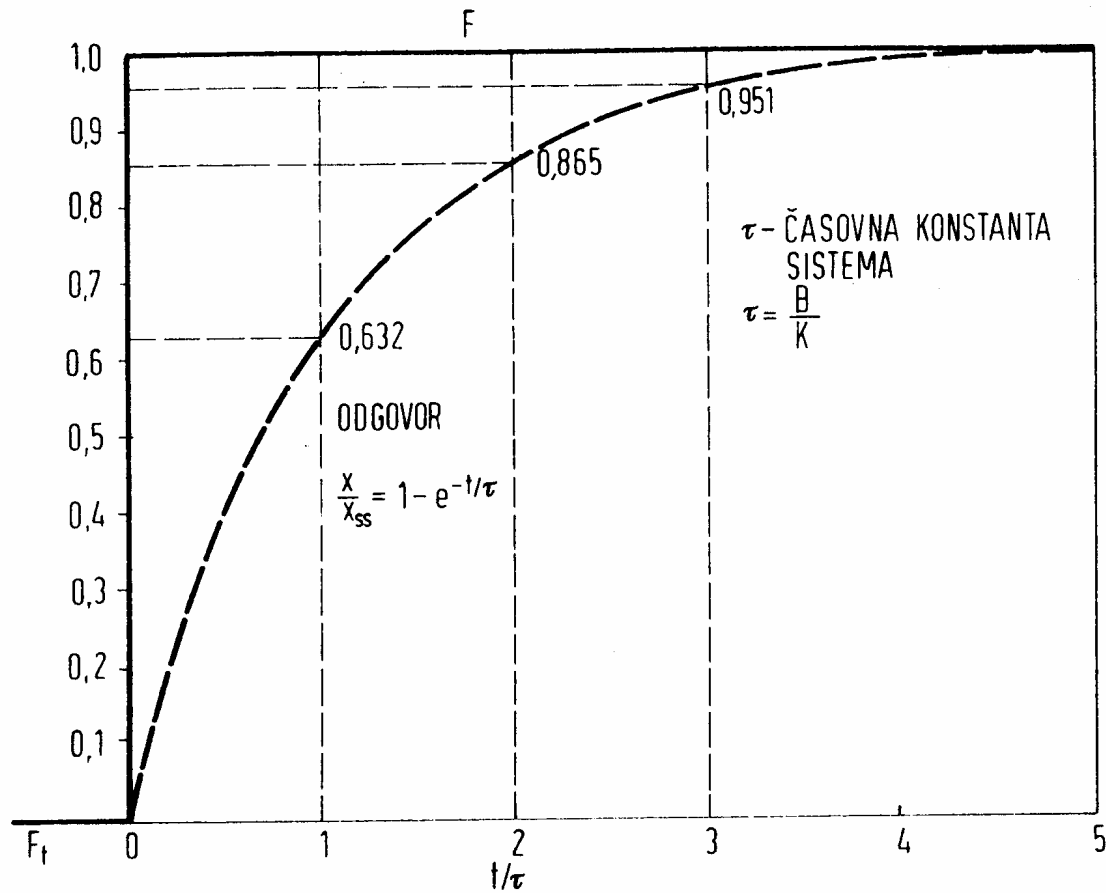
$$\frac{x}{x_{ss}} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{glej sliko})$$

Odgovor prehoda za enakomerni naraščajoči input (rampa) je kot sledi

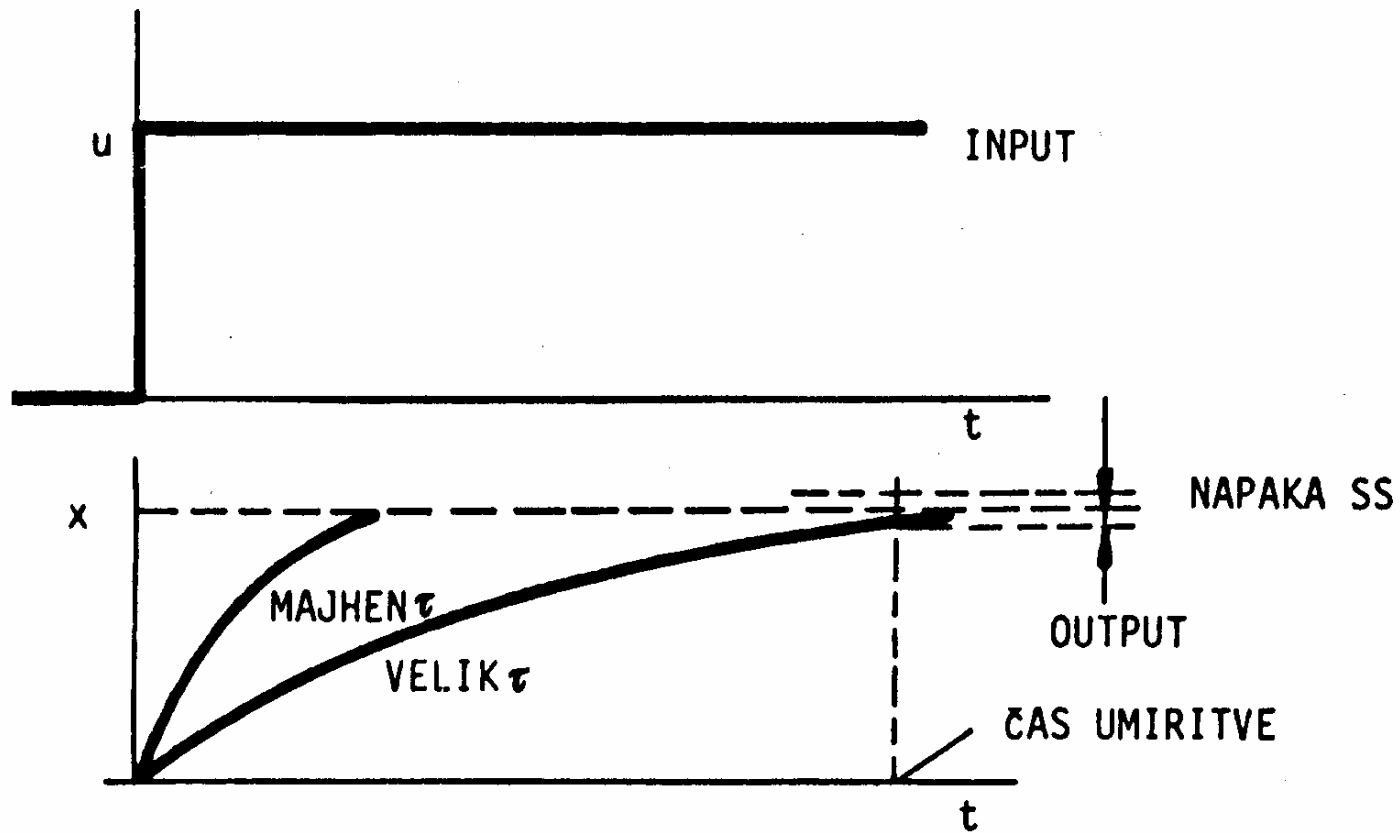
$$F_t = C_1 t$$

$$\frac{xK}{C_1 \tau} = \frac{t}{\tau} - \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

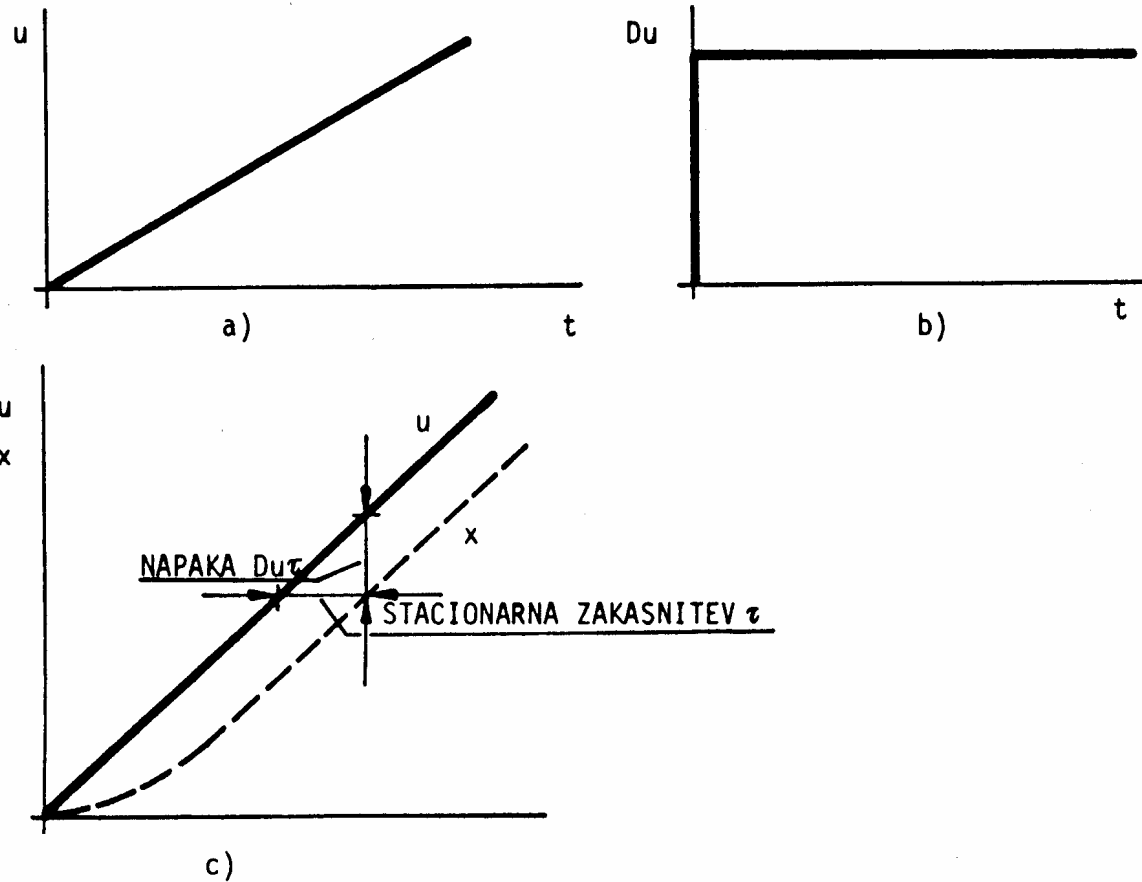
Odgovor sistema 1. reda na koračni input (2)



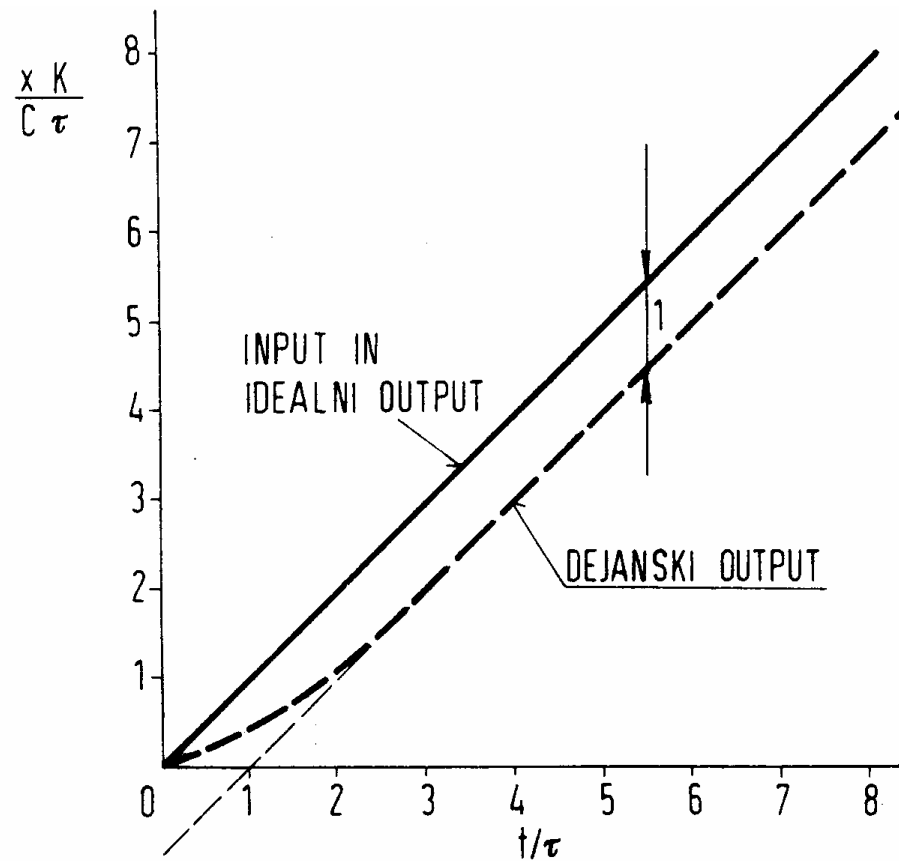
Odgovor sistema 1. reda na koračni input (3)



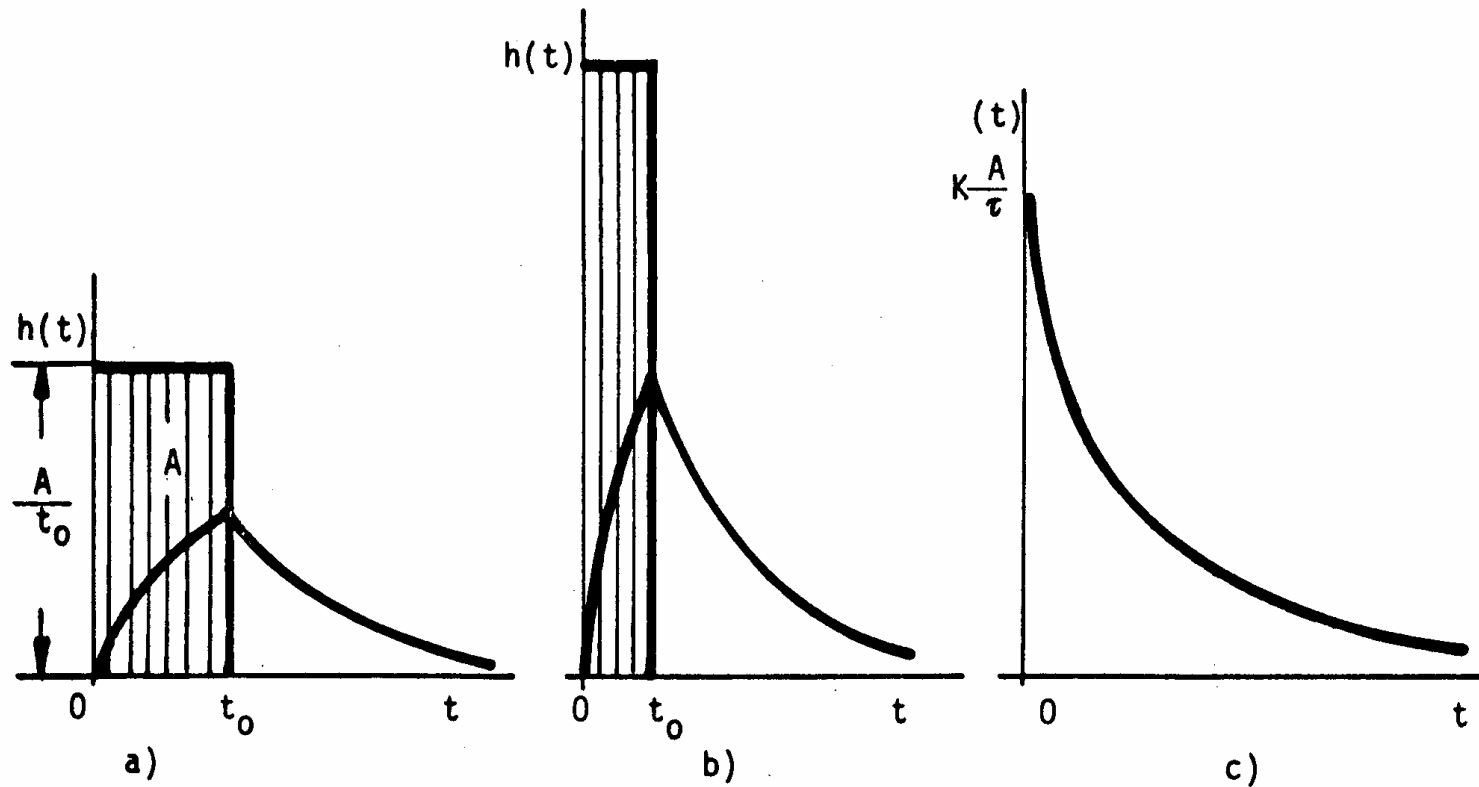
Odgovor sistema 1.reda na enakomerno naraščajoči input (4)



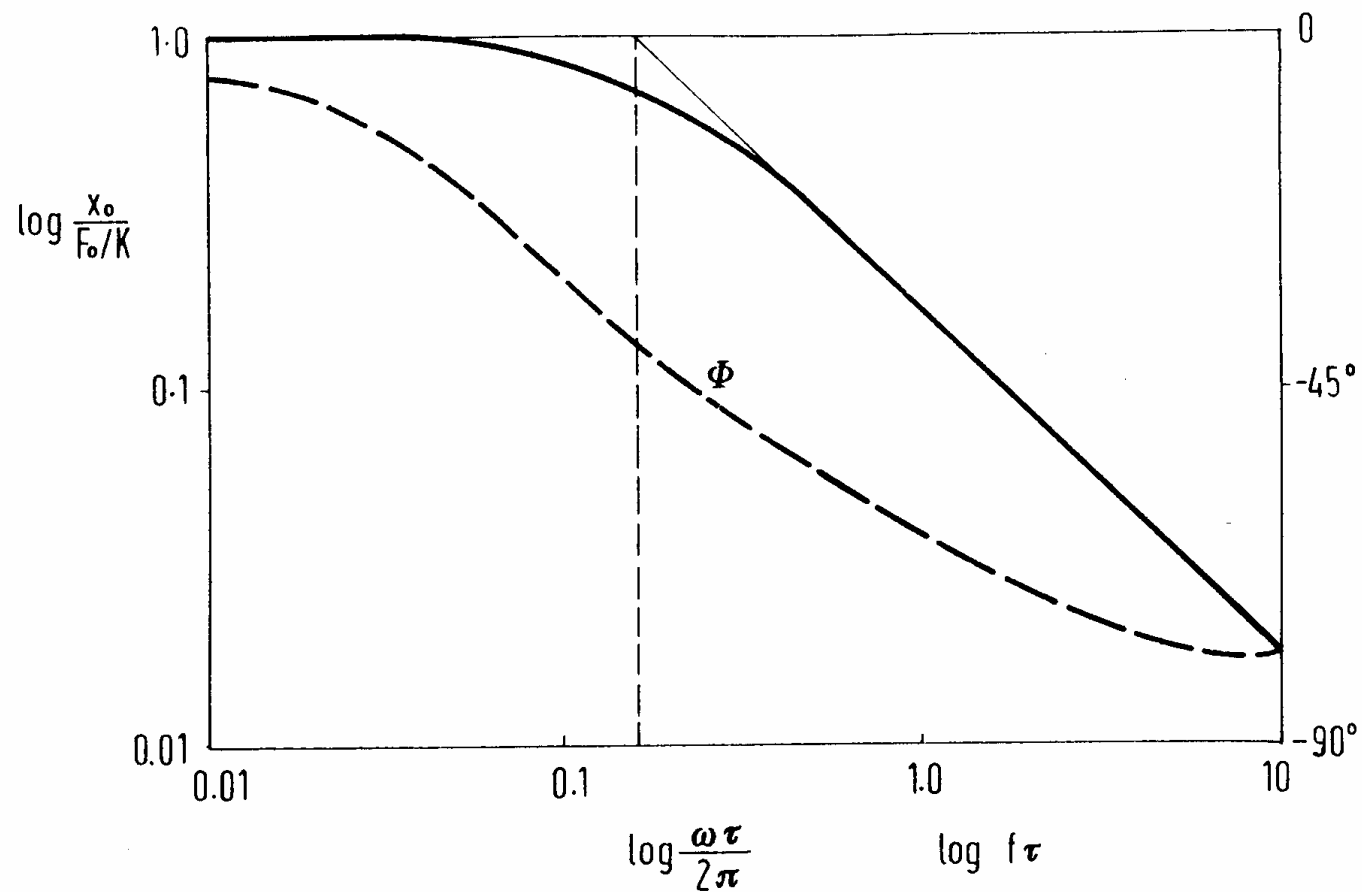
Odgovor sistema 1. reda na enakomerno naraščajoči input (5)



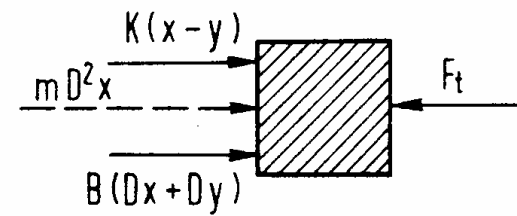
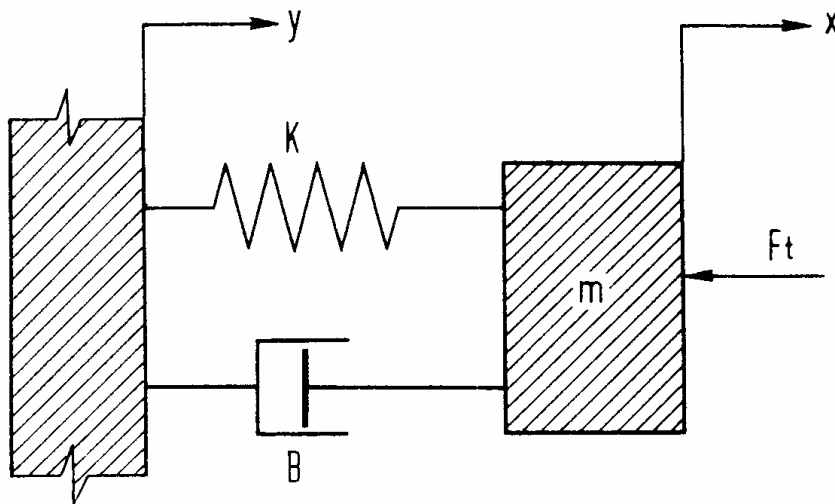
Impulzni odgovor sistema 1. reda



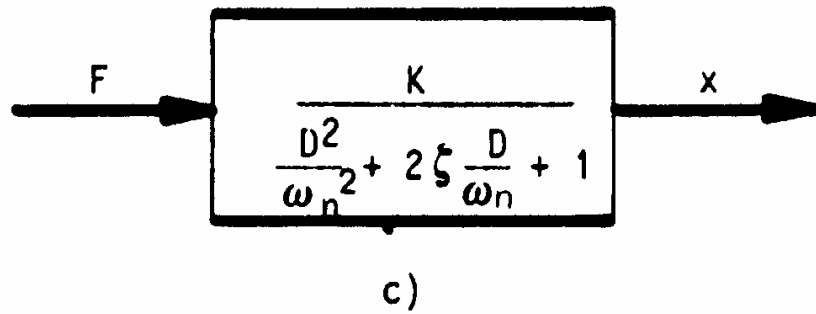
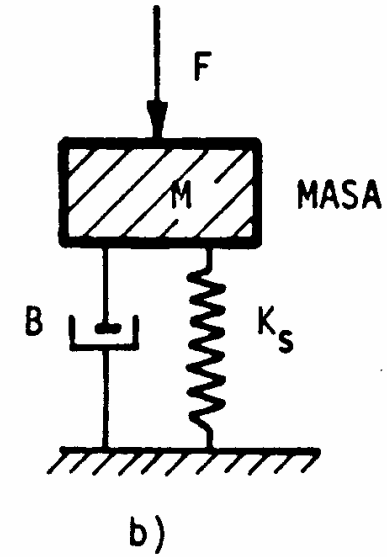
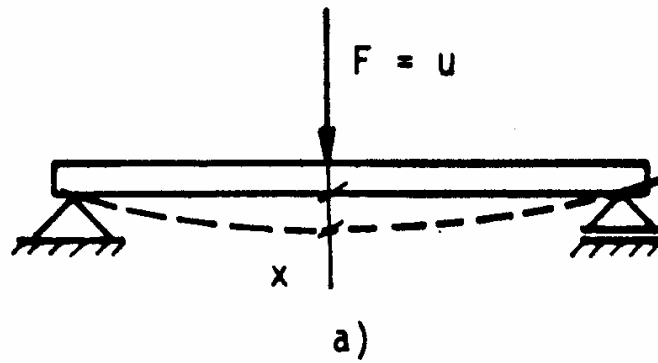
Frekvenčni odgovor sistema 1. reda (Bodejev diagram)



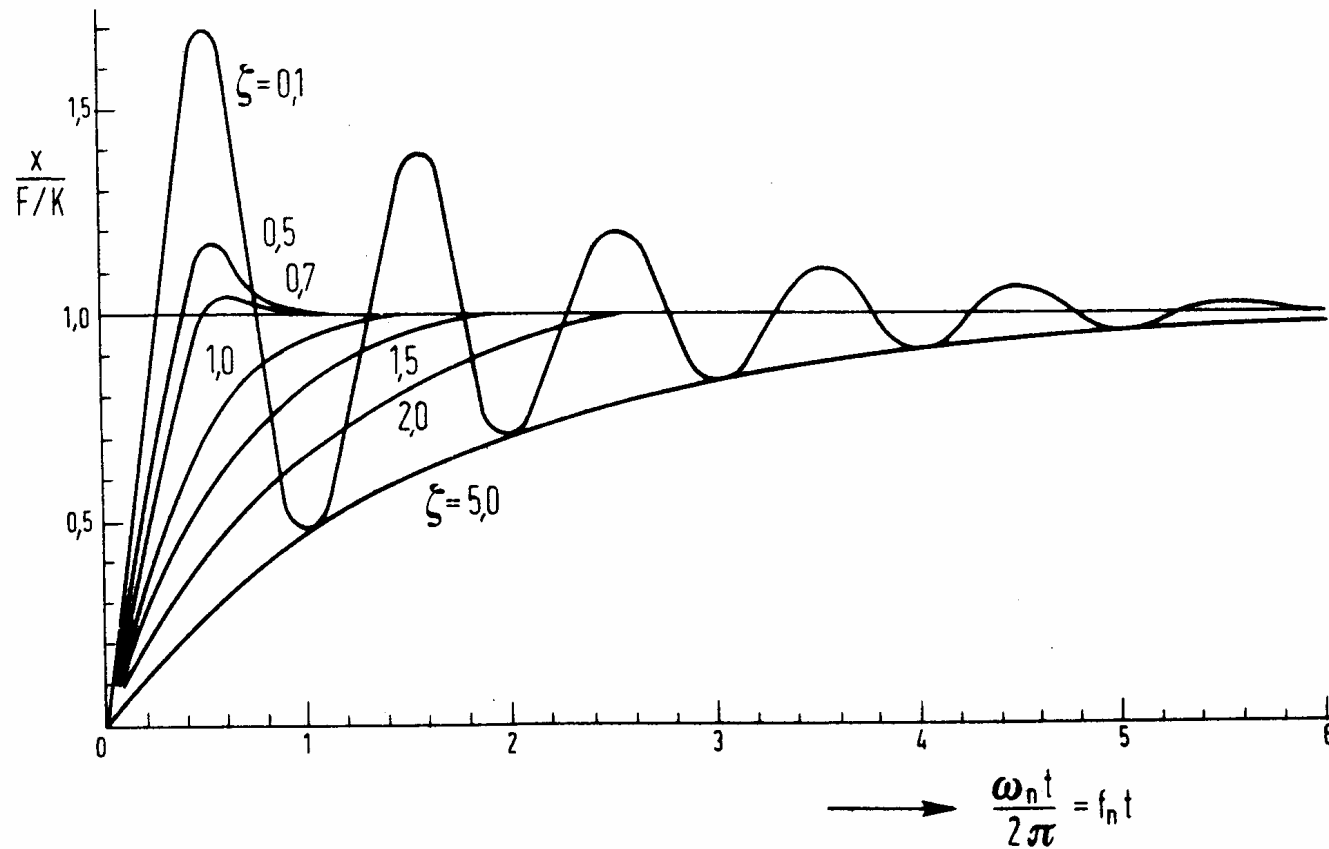
Sistemi 2. reda



Merilni sistem 2. reda



Odgovor sistema 2. reda na koračni input (1)



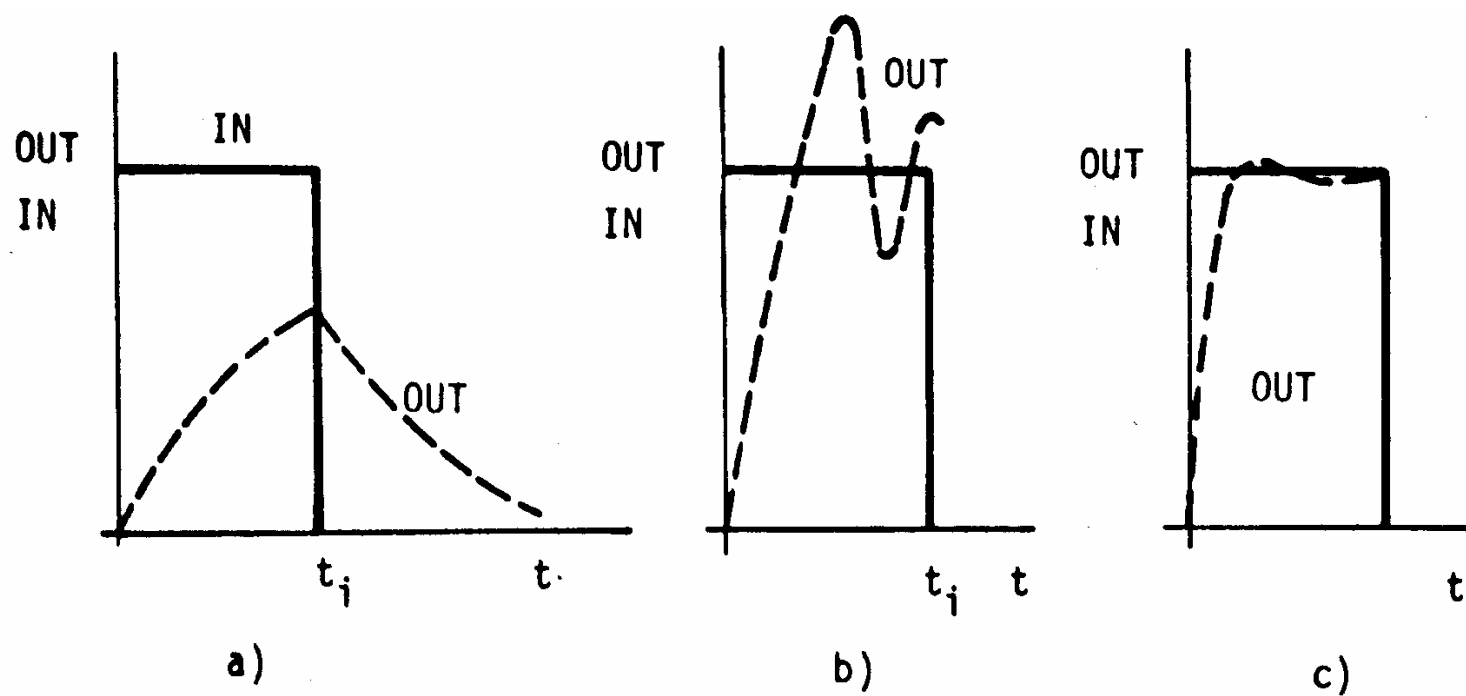
Odgovor sistema 2. reda na koračni input (2)

$$F_i - K_s x_0 - BDx_0 - MD^2 x_0 = 0$$

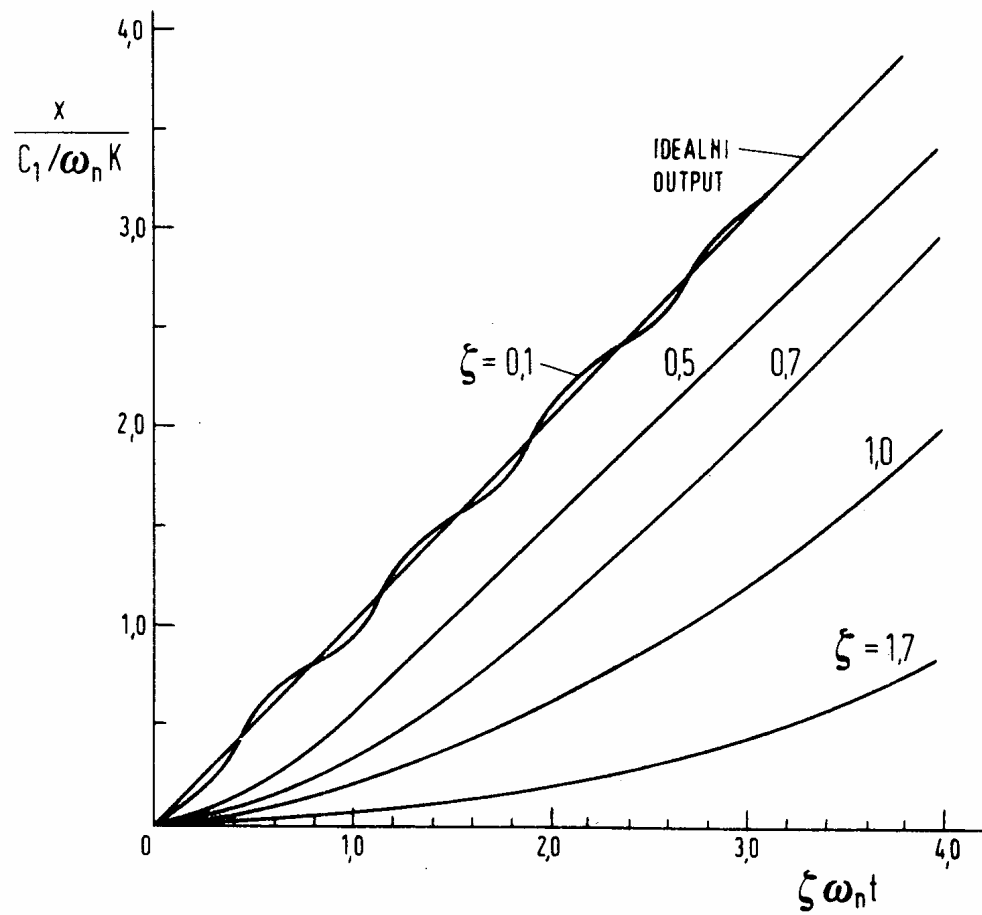
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{M}}, \quad \xi = \frac{B}{2\sqrt{K_s M}}, \quad K = \frac{1}{K_s}$$

$$\frac{x_0}{F}(D) = \frac{K}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + 2\xi \frac{D}{\omega_n} + 1}$$

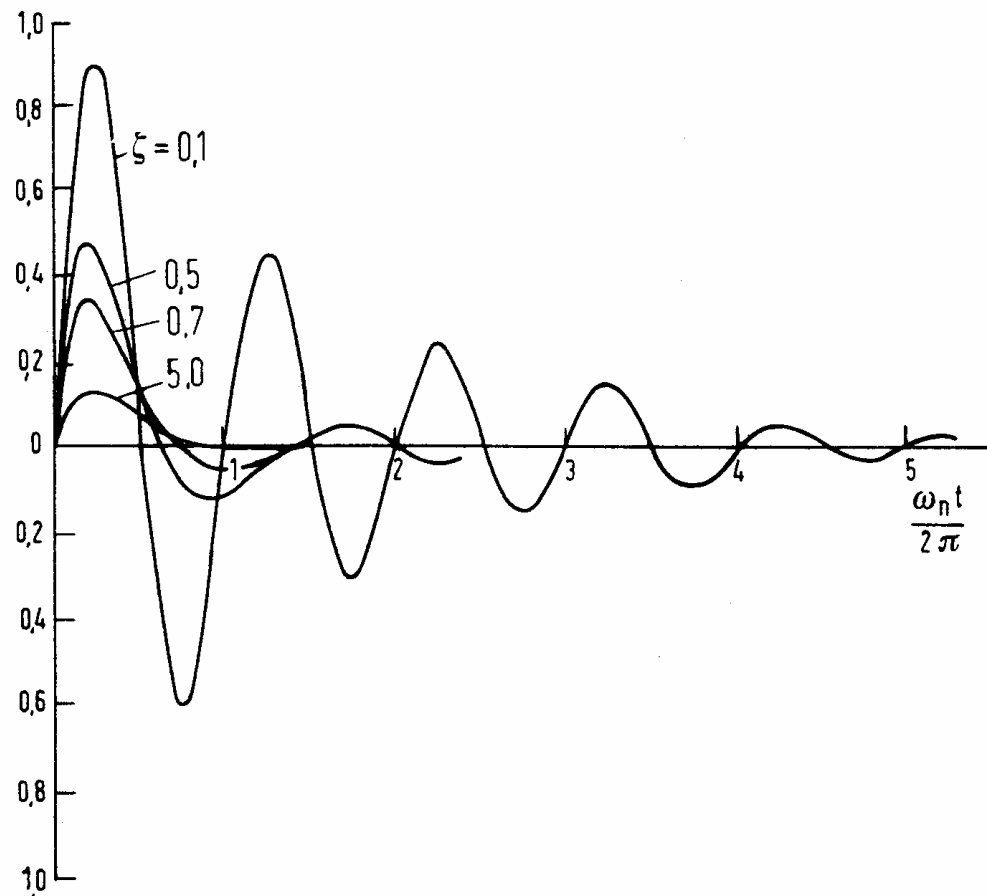
Odgovori prehoda sistema 2. reda pri različnih parametrih sistema (ω_n , ξ oz. K_S , M , B)



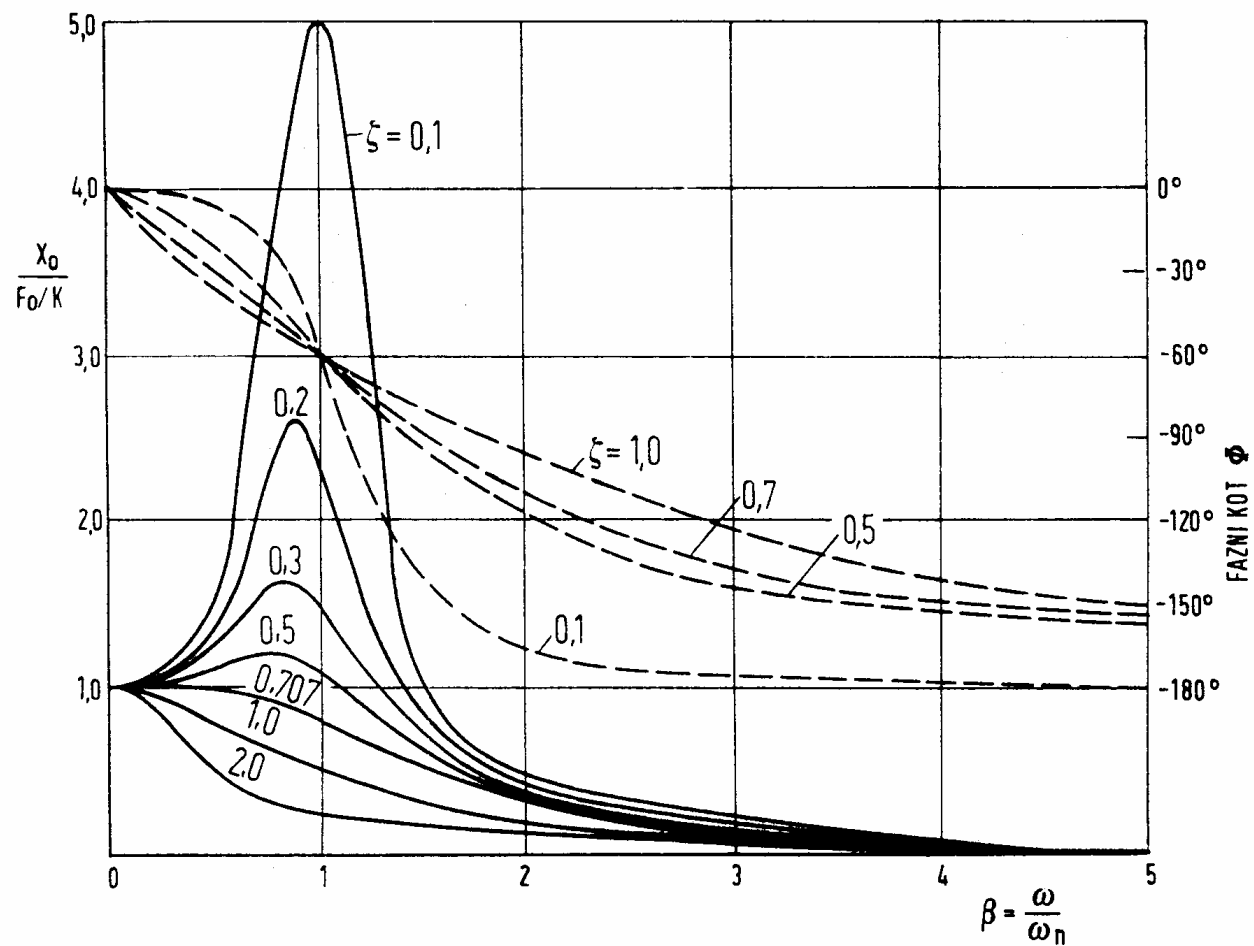
Odgovor sistema 2. reda na enakomerno naraščajoči input



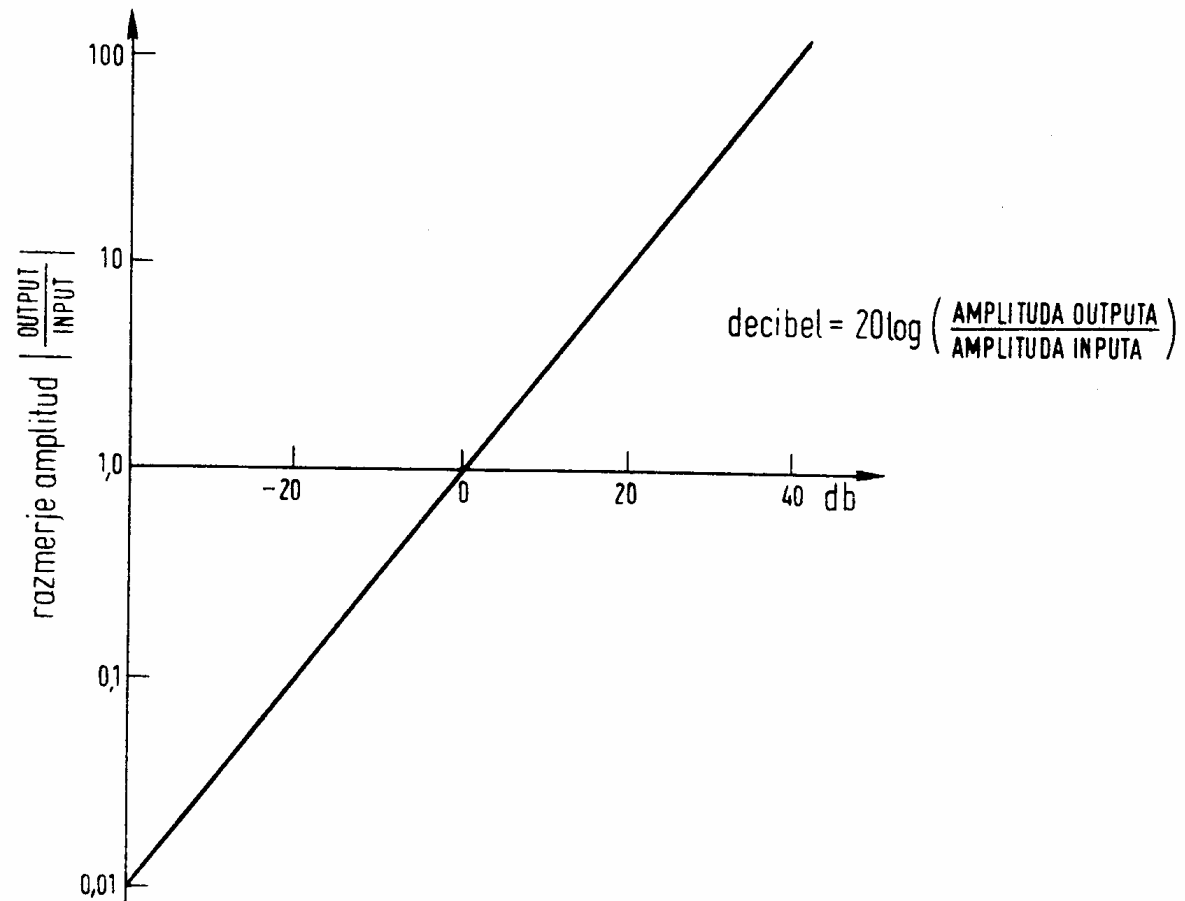
Odgovor sistema 2. reda na impulzni input



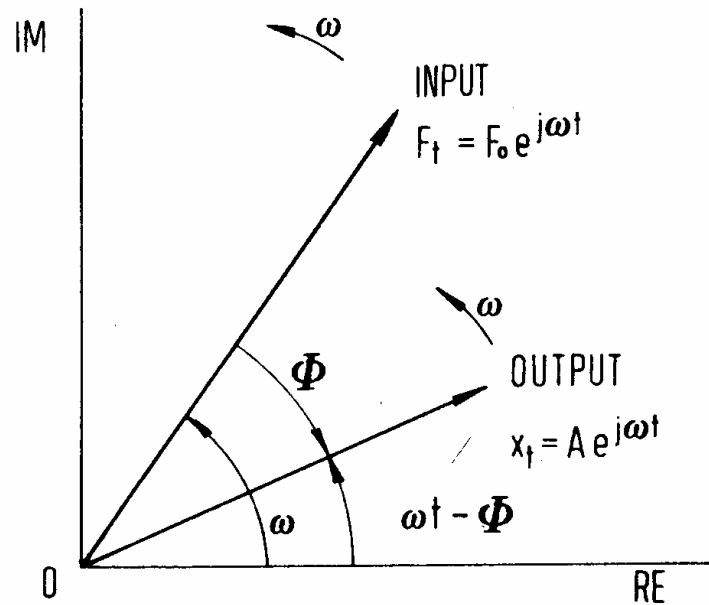
Odgovor sistema 2. reda na sinusni input s frekvenco ω



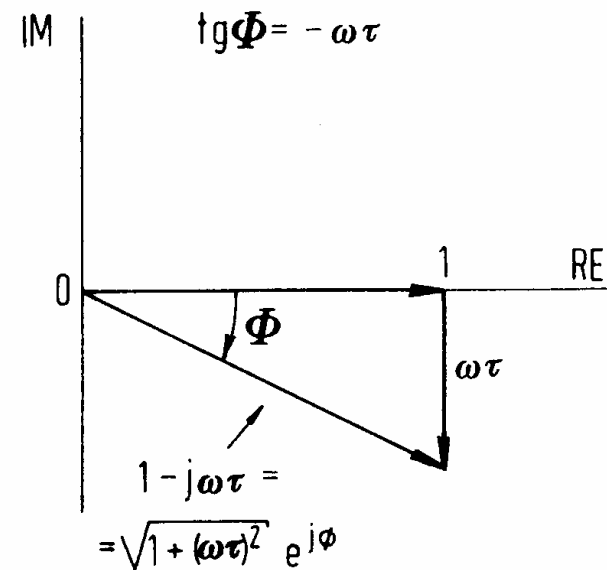
Razmerje med razmerjem amplitud in decibeli



Razmere pri vzbujanju sistema 1. reda s periodičnim signalom



MOŽEN ODGOVOR SISTEMA I. REDA
 NA SINUSNI INPUT



GRAFIČNI PRIKAZ ŠTEVCA

4.4 Energetske karakteristike merilnih sistemov

**Merilni sistemi
I.del**

Obremenilni efekti v merilnih sistemih

Obremenitev med elementi merilnega sistema

(obremenitev med elementi sistema lahko spremeni lastnosti sistema; npr. nek element spremeni karakteristiko predhodnega elementa, prav tako naslednji element spremeni karakteristiko tega (predhodnega) elementa)

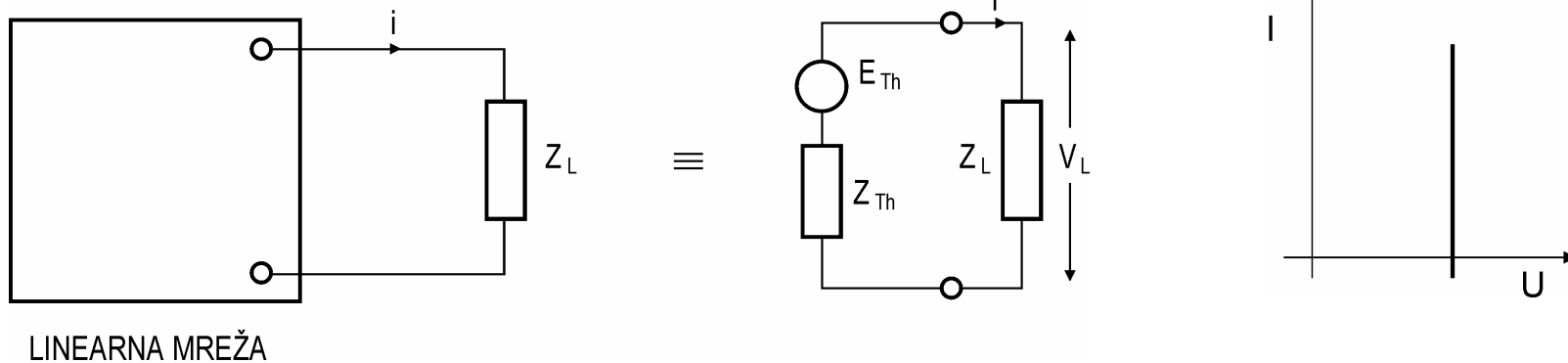
Obremenitev procesa

(vnos senzorskega elementa v proces/sistem vpliva na vrednost merjene veličine).

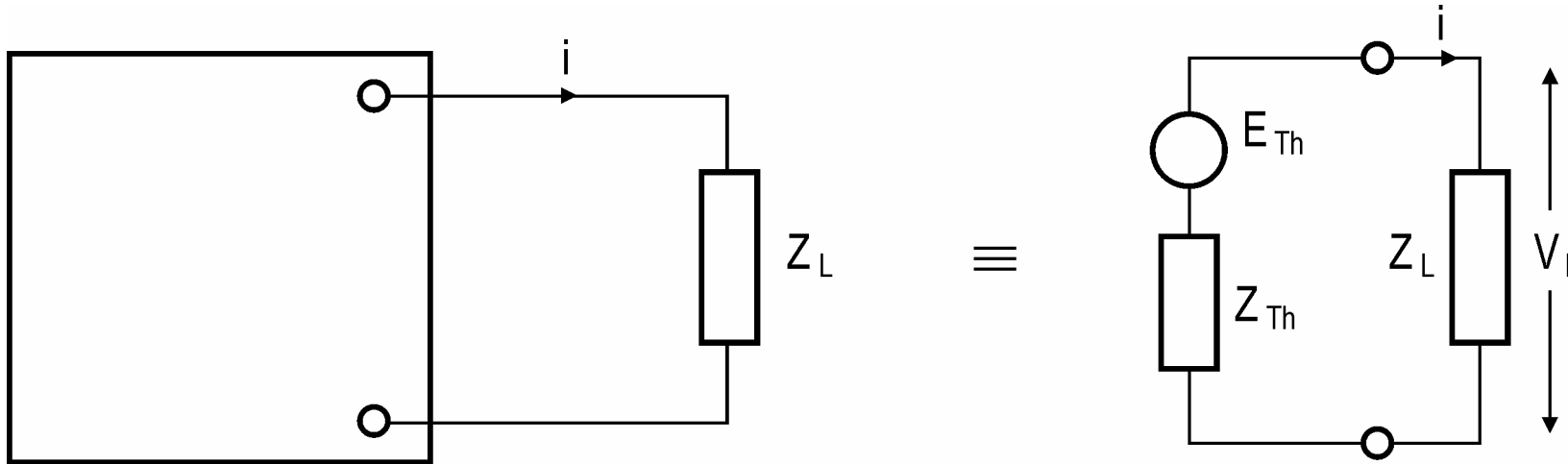
Električna obremenitev (1)

Theveninov ekvivalentni tokokrog:

Theveninov teorem pravi, da katerakoli mrežo, ki se sestoji iz linearnih impedanc in napetostnih izvorov, lahko nadomestimo z napetostnim izvorom E_{TH} in zaporedno impedanco Z_{TH} . Napetost na sponkah, ako linearna mreža ni obremenjena, je E_{TH} . Ako priklopimo upornost Z_L , preko nje steče tok, kar povzroči padec napetosti.



Električna obremenitev (2)



LINEARNA MREŽA

Primer:

Označimo $Z_L = R_m$; $Z_{TH} = R_{ab}$, ter $E_{TH} = U$ in

$V_L = R_m$.

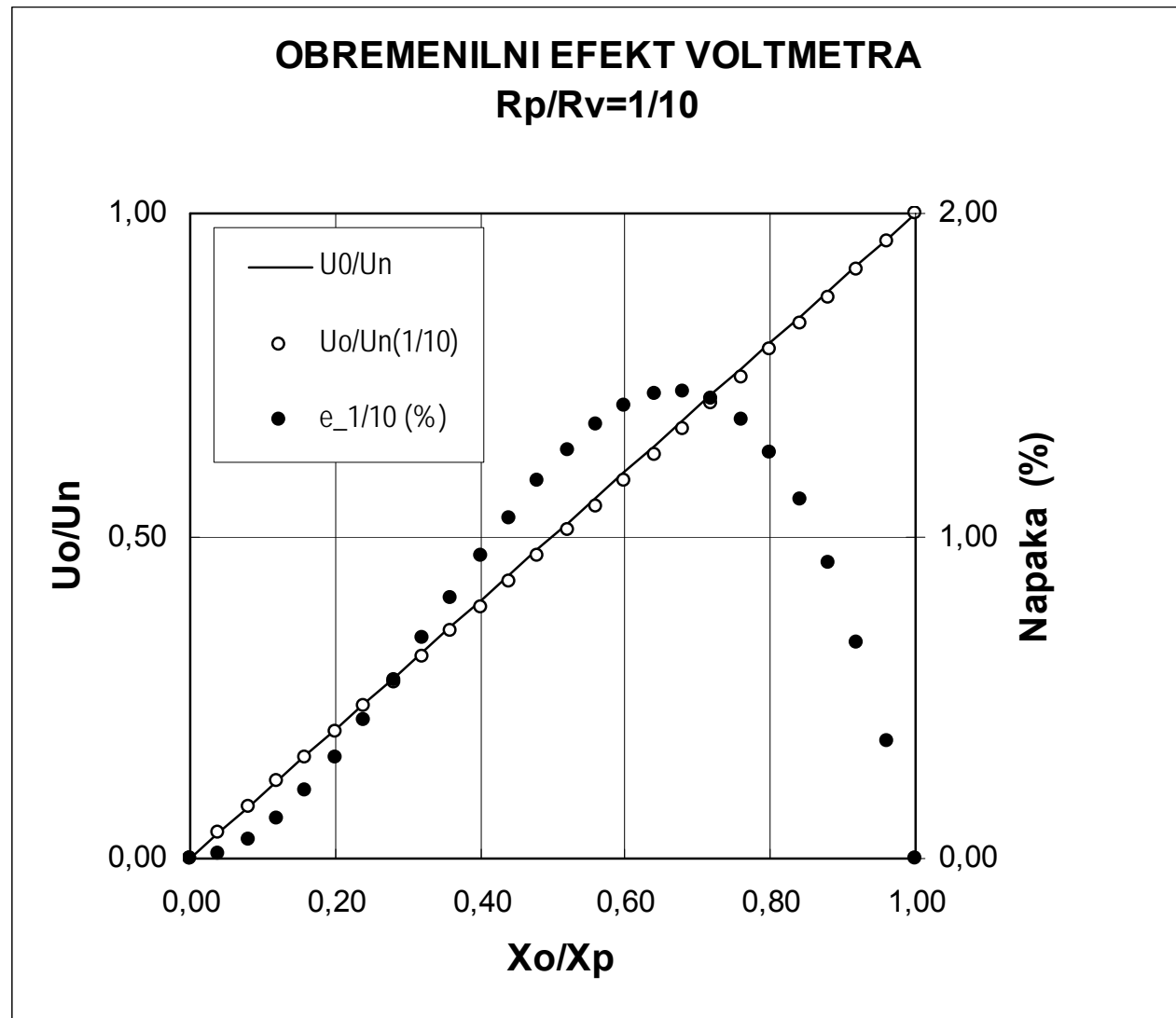
Sledi:

$$U_m = \frac{R_m}{R_{ab} + R_m} U$$

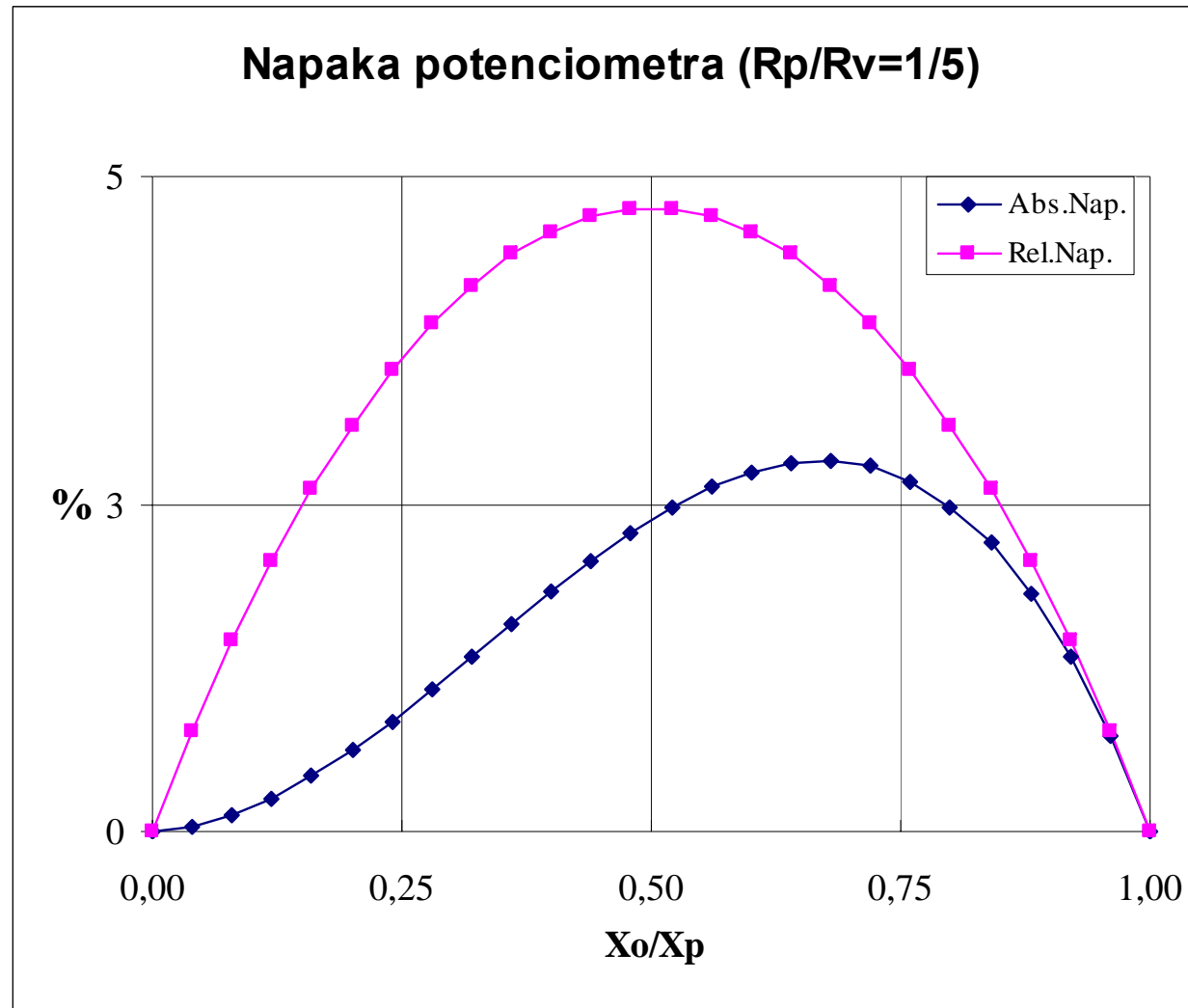
$$U_m = \frac{1}{1 + \frac{R_{ab}}{R_m}} U$$

$$U_m \cong U \text{ ako } R_m \gg R_{ab}$$

Obremenilni efekt voltmetra (1)



Obremenilni efekt voltmetra (2)

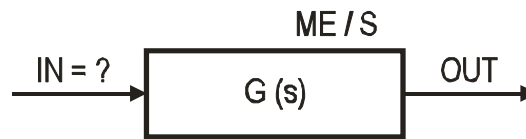


4.5 Umerjanje

**Merilni sistemi
I.del**

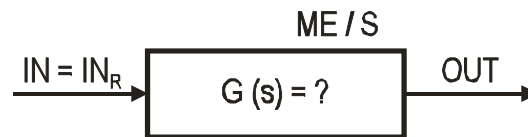
Merjenje in umerjanje

MERJENJE



Poznamo $G(s)$, odčitamo $OUT \rightarrow IN$

UMERJANJE



Poznamo IN_R , odčitamo $OUT \rightarrow G(s)$

Umerjanje

Umerjanje je sistematičen eksperimentalen postopek za ugotavljanje dejanske karakteristike merilnega sistema.

Umerjanje oz. kalibracija pomeni niz operacij za ugotavljanje povezave med vrednostmi, ki jih kaže merilni instrument ali merilni sistem, oziroma vrednostmi, ki jih predstavlja opredmetena mera ali referenčni material, oz. etaloni.

Rezultat umerjanja običajno predstavimo grafično. v graf nanašamo odstopke (y os) v odvisnosti od referenčne mere (x os). Odstopek (Odmik) je definiran kot razlika med izmerjeno mero in referenčno mero.

Prave (dejanske) mere v nobenem primeru ne vemo. Manjša ko je merilna negotovost, bolje se približamo oz. poznamo pravo vrednost. Vrednost, pripisana določeni veličini, ki je realizirana z referenčnim etalonom, se lahko na danem kraju vzame kot dogovorjena prava vrednost (veličine).

Umerjanje (1)

Umerjanje, kalibracija

Niz operacij za ugotavljanje povezave med vrednostmi, ki jih kaže merilni instrument ali merilni sistem, oziroma vrednostmi, ki jih predstavlja opredmetena mera ali referenčni material, in pripadajočimi vrednostmi, realiziranimi z etaloni, pod določenimi pogoji. Opombe: (1) Rezultat umerjanja omogoča bodisi pripis vrednosti merjenih veličin kazanju merilnega instrumenta bodisi določanje korekcij glede na kazanje. (2) Z umerjanjem je mogoče ugotoviti tudi druge meroslovne lastnosti, na primer učinek vplivnih veličin. (3) Rezultat umerjanja se lahko zapiše v listini, ki jo včasih imenujemo certifikat o umerjanju ali poročilo o umerjanju.

Naravnavanje, justiranje (merilnega instrumenta)

Postopek, s katerim se merilni instrument pripravi za delovanje, ki ustreza njegovi uporabi. Opomba: Naravnavanje je lahko avtomatsko, polavtomatsko ali ročno.

Etalon

Opredmetena mera, merilni instrument, referenčni material ali merilni sistem, katerega namen je, da definira, realizira, ohranja ali reproducira neko enoto ali eno ali več vrednosti veličine, tako da služi kot referenca.

Dogovorjena prava vrednost (veličine)

Vrednost, pripisana določeni veličini, ki je včasih z dogovorom sprejeta kot tista vrednost, ki ima za dani namen primerno negotovost. Opomba: na danem kraju se lahko kot dogovorjena prava vrednost vzame vrednost, ki je realizirana z referenčnim etalom.

Umerjanje (2)

Vzdrževanje etalona

Niz operacij, potrebnih za ohranitev meroslovnih značilnosti etalona v ustreznih mejah. Opomba: Te operacije ponavadi vključujejo občasno umerjanje, skladiščenje v ustreznih razmerah in previdnost pri uporabi.

Referenčni pogoji

Pogoji uporabe, ki so predpisani za preskušanje merilnega instrumenta ali za medsebojno primerjavo merilnih rezultatov. Opomba: Referenčni pogoji v splošnem vključujejo referenčne vrednosti ali referenčna območja za vplivne veličine, ki vplivajo na merilni instrument.

Sledljivost

Lastnost merilnega rezultata ali vrednosti etalona, ki omogoča navezavo na navedene reference, ponavadi nacionalne ali mednarodne etalone, skozi neprekinjeno verigo primerjav, ki imajo opredeljeno negotovost.

Overitev

Postopek, ki ga opravi zakonsko pooblaščen organ, s katerimi se ugotovi in potrdi, da merilo v celoti ustreza zahtevam meroslovnih predpisov.

Umerjanje (3)

Primarni etalon

Etalon, ki je izbran ali vesplošno priznan, da ima največjo meroslovno kakovost, in katerega vrednost je sprejeta brez sklicevanja na druge etalone iste veličine.

Opomba: Pojem primarnega etalona velja tako za osnovne kot za izpeljane veličine.

Mednarodni etalon

Etalon, ki je z mednarodnim dogovorom priznan, da se uporablja kot mednarodna podlaga za ugotavljanje vrednosti drugih etalonov zadevne veličine.

Nacionalni etalon

Etalon, ki je z državnim odlokom priznan kot podlaga za ugotavljanje vrednosti drugih etalonov zadevne veličine v državi.

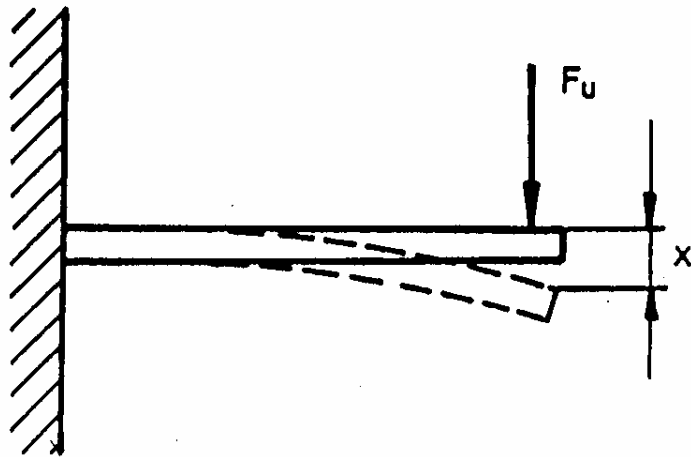
Posredniški etalon

Etalon, ki se uporablja kot posrednik pri primerjavi etalonov.

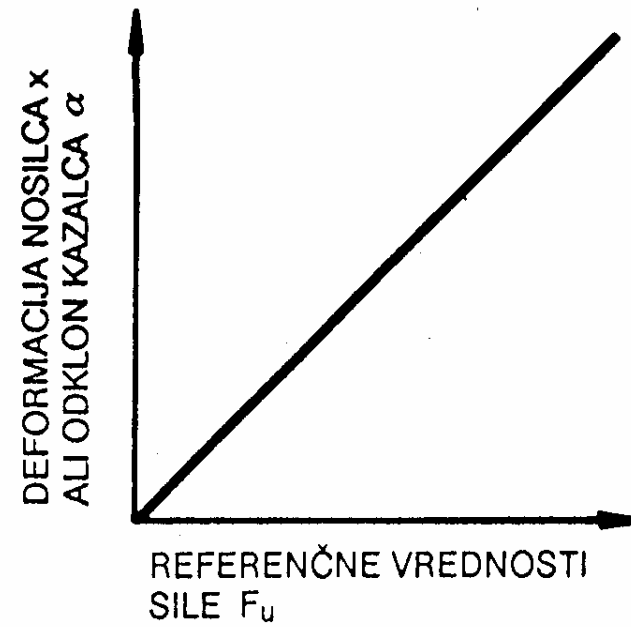
Referenčni etalon

Etalon, na splošno največje meroslovne kakovosti, ki je na voljo na danem kraju ali v dani organizaciji in je osnova za merjenje na tem mestu.

Umerjanje dinamometra

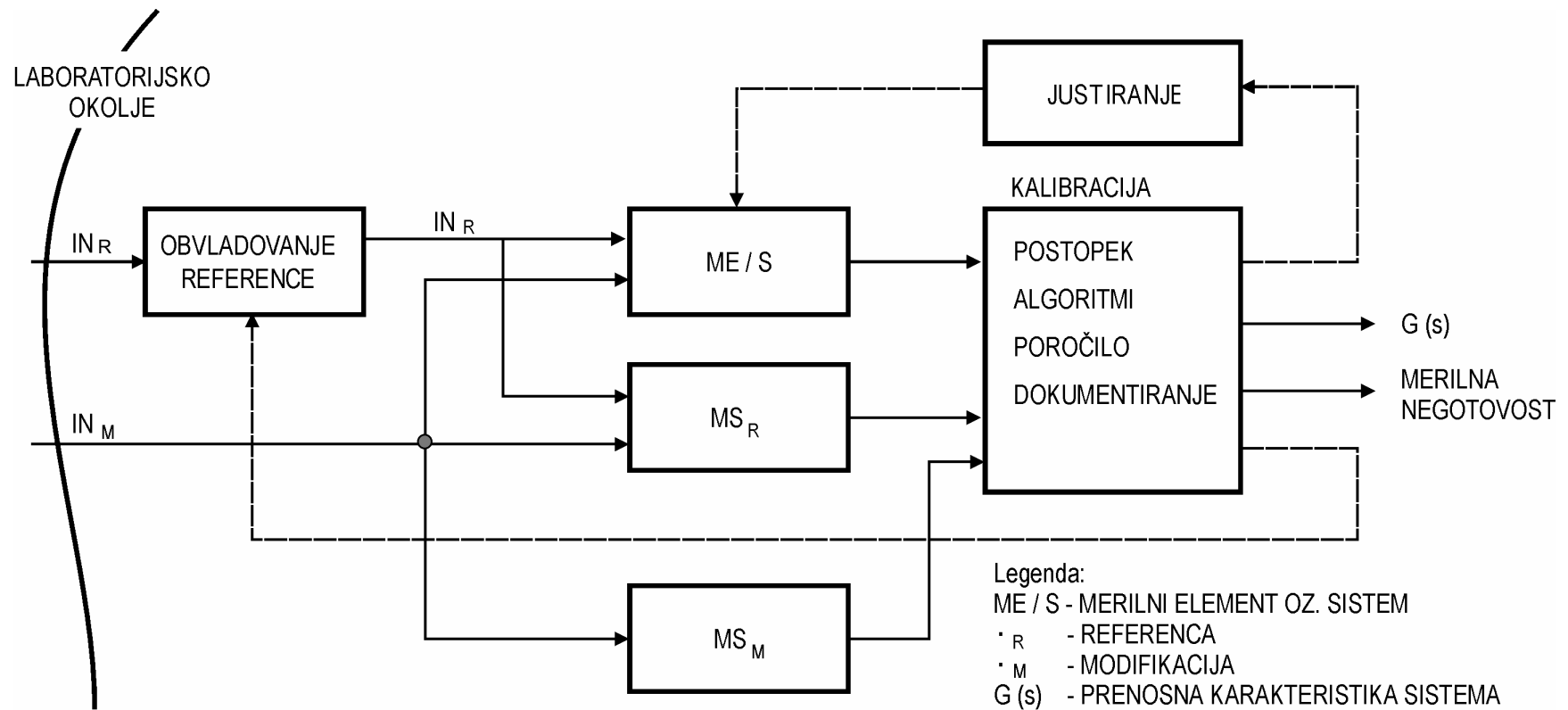


a)



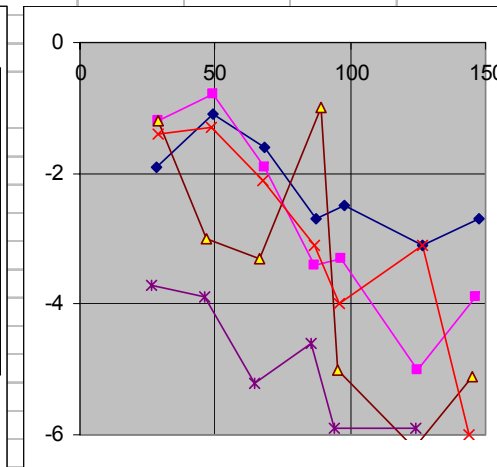
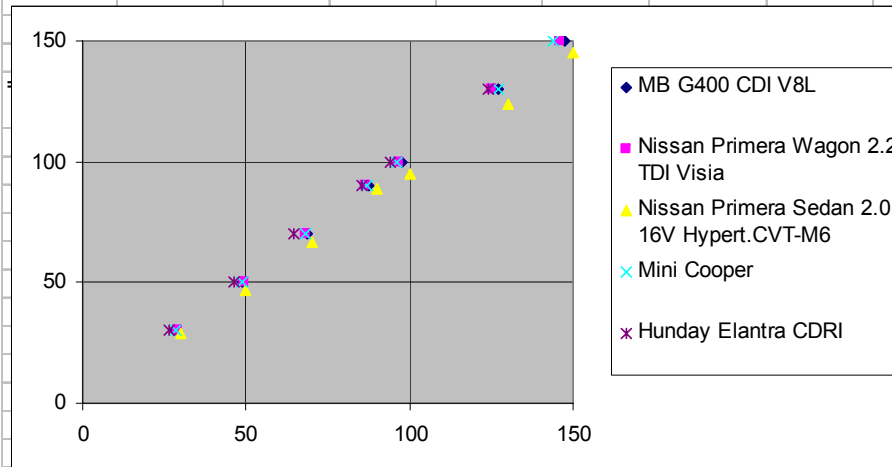
b)

Struktura sistema umerjanja

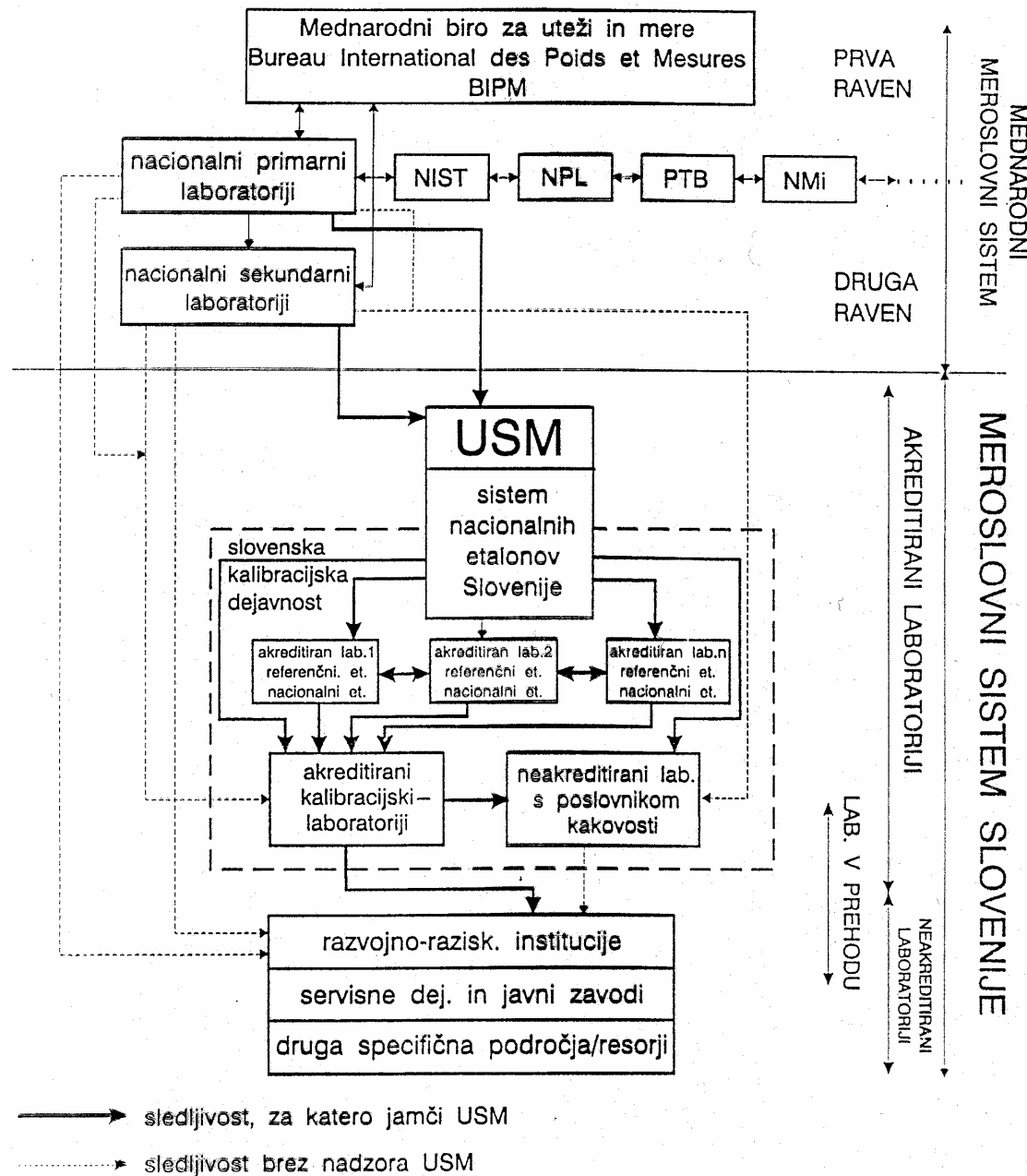


Umerjanje – primer: merilnik hitrosti

Merilniki hitrosti												
Vir, Avto Magazin 10/2002												
Izmerjena hitrost	Referenčna hitrost					Odstopki						
	MB G400 CDI V8L	Nissan Primera Wagon 2.2 TDI Visia	Nissan Primera Sedan 2.0 16V Hypert.C VT-M6	Mini Cooper	Hunday Elantra CDRI	MB G400 CDI V8L	Nissan Primera Wagon 2.2 TDI Visia	Nissan Primera Sedan 2.0 16V Hypert.C VT-M6 Acenta	Mini Cooper	Hunday Elantra CDRI		
30	28,1	28,8	28,8	28,6	26,3	30	-1,9	-1,2	-1,2	-1,4	-3,7	
50	48,9	49,2	47,0	48,7	46,1	50	-1,1	-0,8	-3,0	-1,3	-3,9	
70	68,4	68,1	66,7	67,9	64,8	70	-1,6	-1,9	-3,3	-2,1	-5,2	
90	87,3	86,6	89,0	86,9	85,4	90	-2,7	-3,4	-1,0	-3,1	-4,6	
100	97,5	96,7	95,0	96,0	94,1	100	-2,5	-3,3	-5,0	-4,0	-5,9	
130	126,9	125,0	123,8	126,9	124,1	130	-3,1	-5,0	-6,2	-3,1	-5,9	
150	147,3	146,1	144,9	144,0		150	-2,7	-3,9	-5,1	-6,0		

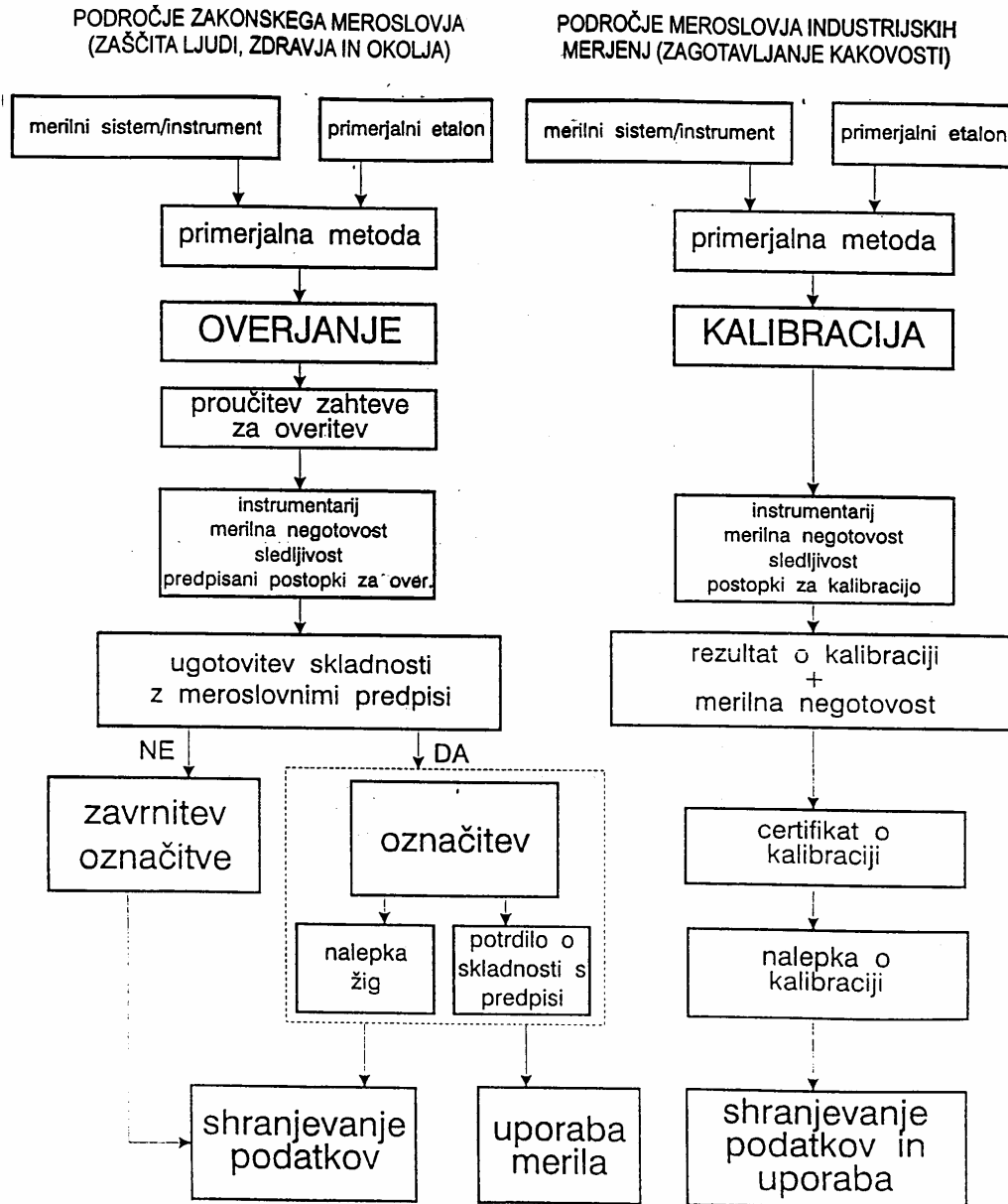


Sledljivostna shema meroslovnega sistema (industrijsko meroslovje za zagotavljanje kakovosti)



Vir: USM

Primerjava postopkov overjanja in kalibracije



Vir: USM

Metrološka funkcija v podjetju

Merilni pogrešek v shemi sledljivosti do primarnega etalona veličine dolžina za enoto m SI sistema

Tabela:

Etalon	Merilni pogrešek [μm], L [m]	Faktor meje zaupanja, K	Princip merjenja
Primarni etalon	0,02+0,03L	3	Valovna dolžina
Nacionalni etalon	0,05+0,5L	2	Laserski izvor, Avtokolimator
Laboratorijski etalon podjetja	0,1+1L	2	
Merilna naprava v operativi	0,2+1L	2	

V Sloveniji imamo za osnovne veličine SI sistema poleg nacionalnega etalona za dolžino, še etalone za temperaturo, Θ [K], maso, M [kg], električni tok, I [A] in čas, T [s].

Poleg etalonov osnovnih veličin imamo tudi nekaj etalonov izpeljanih veličin, npr. za frekvenco, f [Hz]. Skupaj je v pripravi za akreditacijo 35 etalonov izpeljanih veličin, npr. za kot, obliko, površino, tlak, silo, moment.

Podatki so veljavni za 1998.

Umerjanje - primeri za dolžino in maso

Primeri merilne negotovosti:

- Dolžina

Precizijski interferometer (PTB):

Merilna negotovost: $2,5 \cdot 10^{-10}$ (infrardeča svetloba)

$5,0 \cdot 10^{-11}$ (vidna svetloba)

V merilni tehniki:

Merilna negotovost mehanskih etalonov: $\pm 1 \mu\text{m} = 10^{-7}\text{m}$

Merilna negotovost interferometrov : $0,01 \mu\text{m} = 10^{-9}\text{m}$

- Masa

Precizijska (elektromagnetno kompenzirana) tehtnica (BIPM):

Relativni standardni pogrešek v zraku $5 \cdot 10^{-11}$ in v vakuumu: $4 \cdot 10^{-12}$

Prototipne tehtnice na nacionalnem nivoju: $s < 2 \cdot 10^{-8}$

Merilna negotovost v praksi (MO od 10^{-14} do 10^7):

pri MO 10^{-6}kg je $s(2\sigma) < 2 \cdot 10^{-4}$

pri MO 10^0kg je $s(2\sigma) < 5 \cdot 10^{-7}$

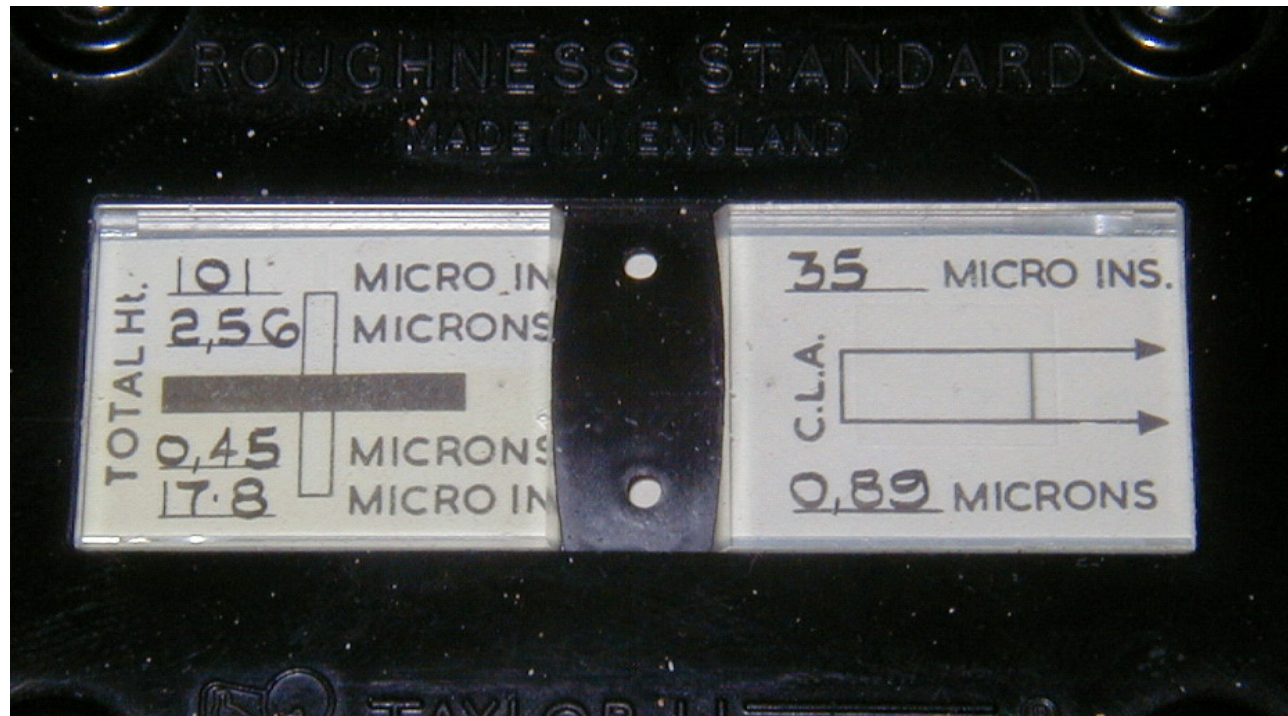
pri MO 10^3kg je $s(2\sigma) < 5 \cdot 10^{-6}$

Merjena veličina	Območje	Najboljša merilna zmogljivost ($k=2$)	Opombe
4.	DIMENZIONALNE VELIČINE		
4.1	DOLŽINA		
4.1.2	MERILA DOLŽINE		
	Mejna vzporedna dolžinska merila - merilne kladice (jeklene)	(0,5 do 100) mm (100 do 1000) mm	$0,05 \mu\text{m} + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$ $0,1 \mu\text{m} + 1 \cdot 10^{-6} \cdot L$
	Naprave za kalibracijo mejnih vzporednih dolžinskih meril	(0 do 100) mm	$0,03 \mu\text{m} + 0,002 \cdot 10^{-6} \cdot D$
	Merilne urice	(0 do 50) mm	$0,9 \mu\text{m} + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$
4.1.4	INSTRUMENTI ZA MERJENJE DOLŽINE		
	Dvotočkovna vijačna merila (zunanja in notranja)	(0 do 1000) mm	$1,5 \mu\text{m} + 4 \cdot 10^{-6} \cdot L$
	Pomična merila	(0 do 1000) mm	$7 \mu\text{m} + 7 \cdot 10^{-6} \cdot L$
4.1.5	PREMER		
	Tritočkovna vijačna merila (notranja)	(4 do 275) mm	$1,5 \mu\text{m} + 4 \cdot 10^{-6} \cdot L$
4.1.6	NAPAKA OBLIKE		
	Merilne plošče	2 m x 3 m	$0,6 \mu\text{m} + 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot L$
4.1.8	NAVOJNE VELIČINE		
	Navojni kalibrski trni	(1 do 300) mm	$\alpha=90^\circ: 2,5 \mu\text{m} + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$ $\alpha=60^\circ: 3,0 \mu\text{m} + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$ $\alpha=30^\circ: 4,0 \mu\text{m} + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$
	Navojni kalibrski obroči	(6 do 300) mm	$\alpha=90^\circ: 2,5 \mu\text{m} + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$ $\alpha=60^\circ: 3,0 \mu\text{m} + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$ $\alpha=30^\circ: 4,0 \mu\text{m} + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$
4.1.9	KOORDINATNE MERILNE NAPRAVE		
	1D naprave	(0 do 5) m	$0,1 \mu\text{m} + 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot L + 0,1 \cdot (L / L_{max}) \mu\text{m}$
	3D naprave	(0 do 1) m po osi	$1,0 \mu\text{m} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot L$ pravokotnost 5 "
4.2	KOT		
4.2.3	MERILNIKI NAGIBA		
		(-2 do 2) mm/m ($\pm 412,5$ ")	$1,3 \mu\text{m}/\text{m}$ (0,27 ")

**Akreditacija
FS MB L003**

Vir: USM

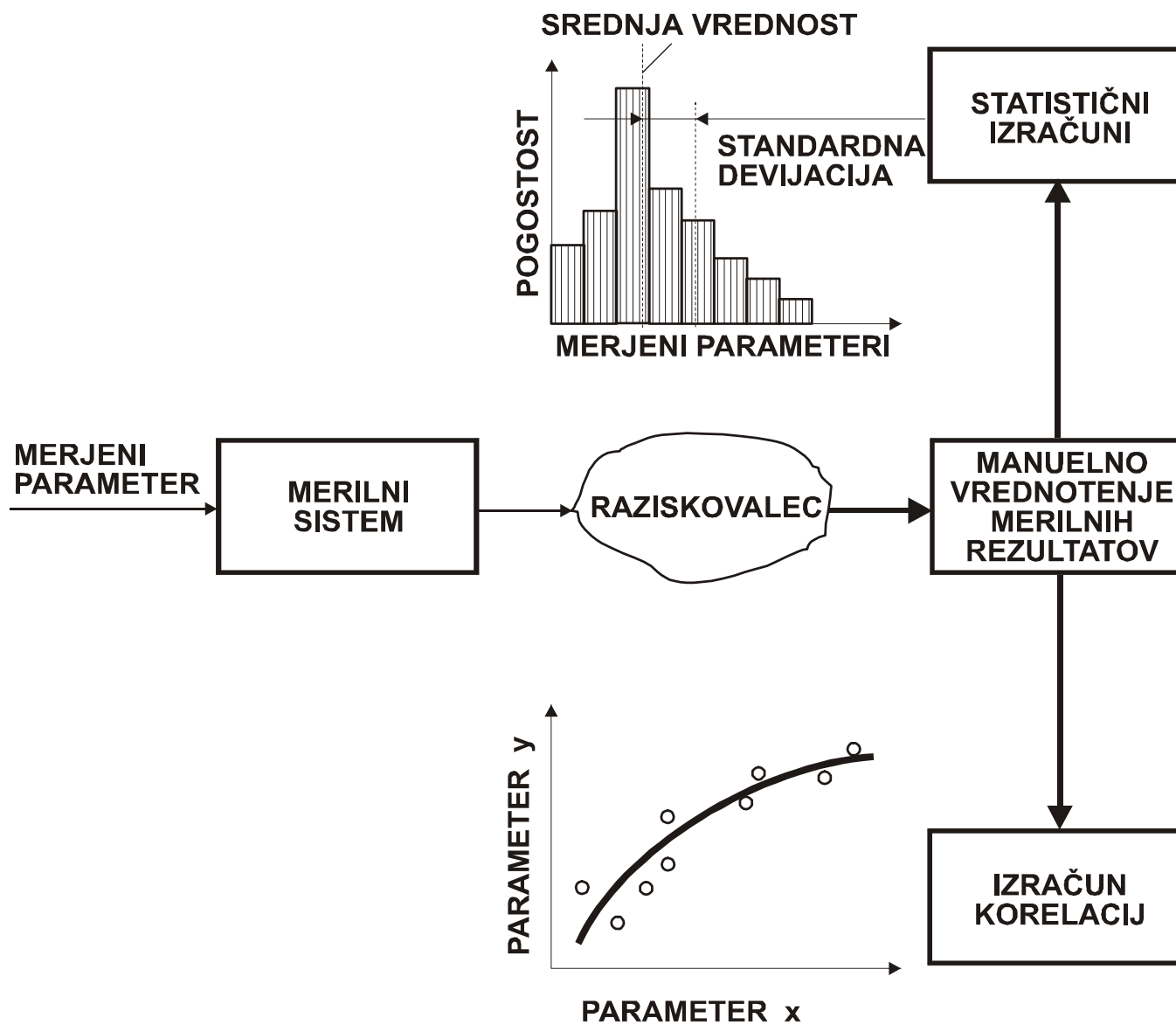
Etalon Talysurf za merilnik hrapavosti



5. Analiza merilnih signalov

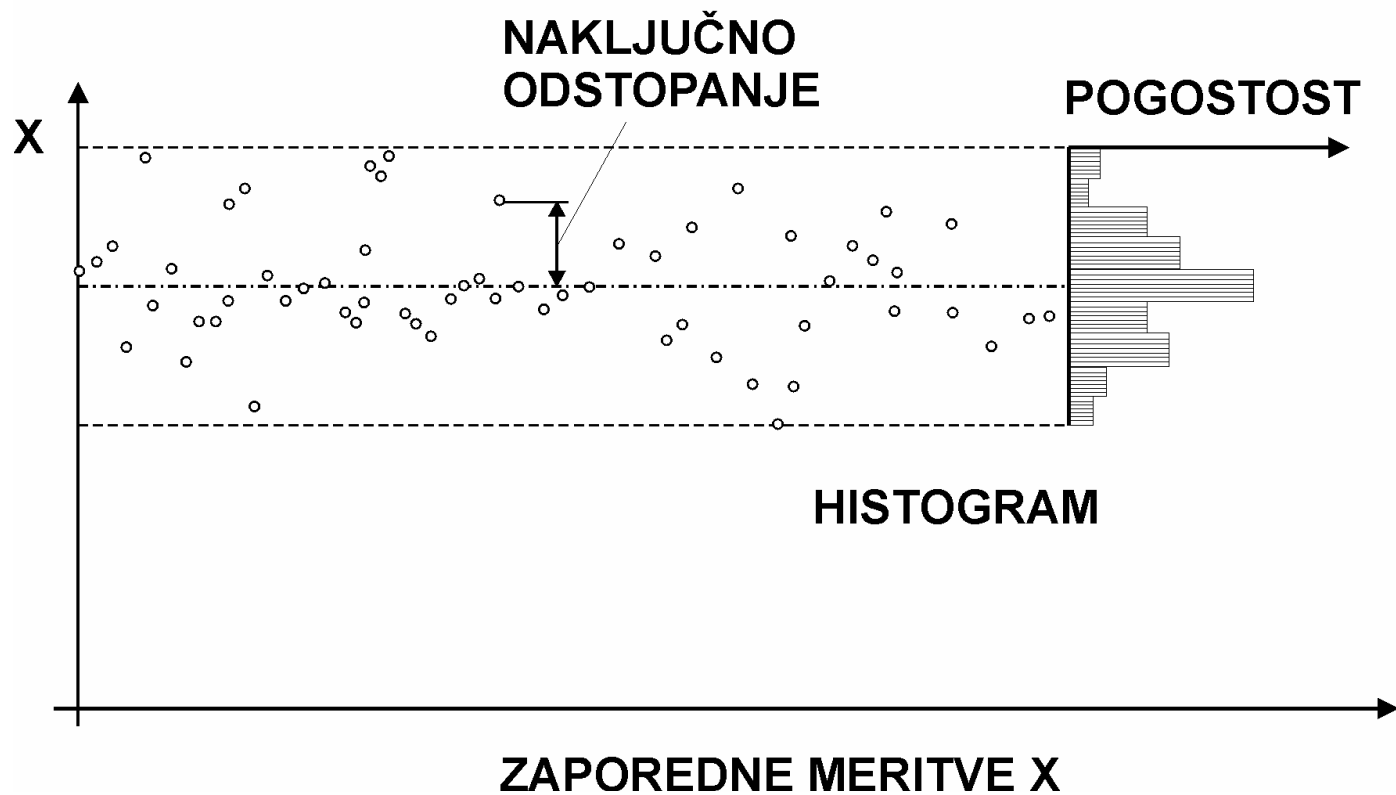
**Merilni sistemi
I.del**

Ročno vrednotenje merilnih rezultatov

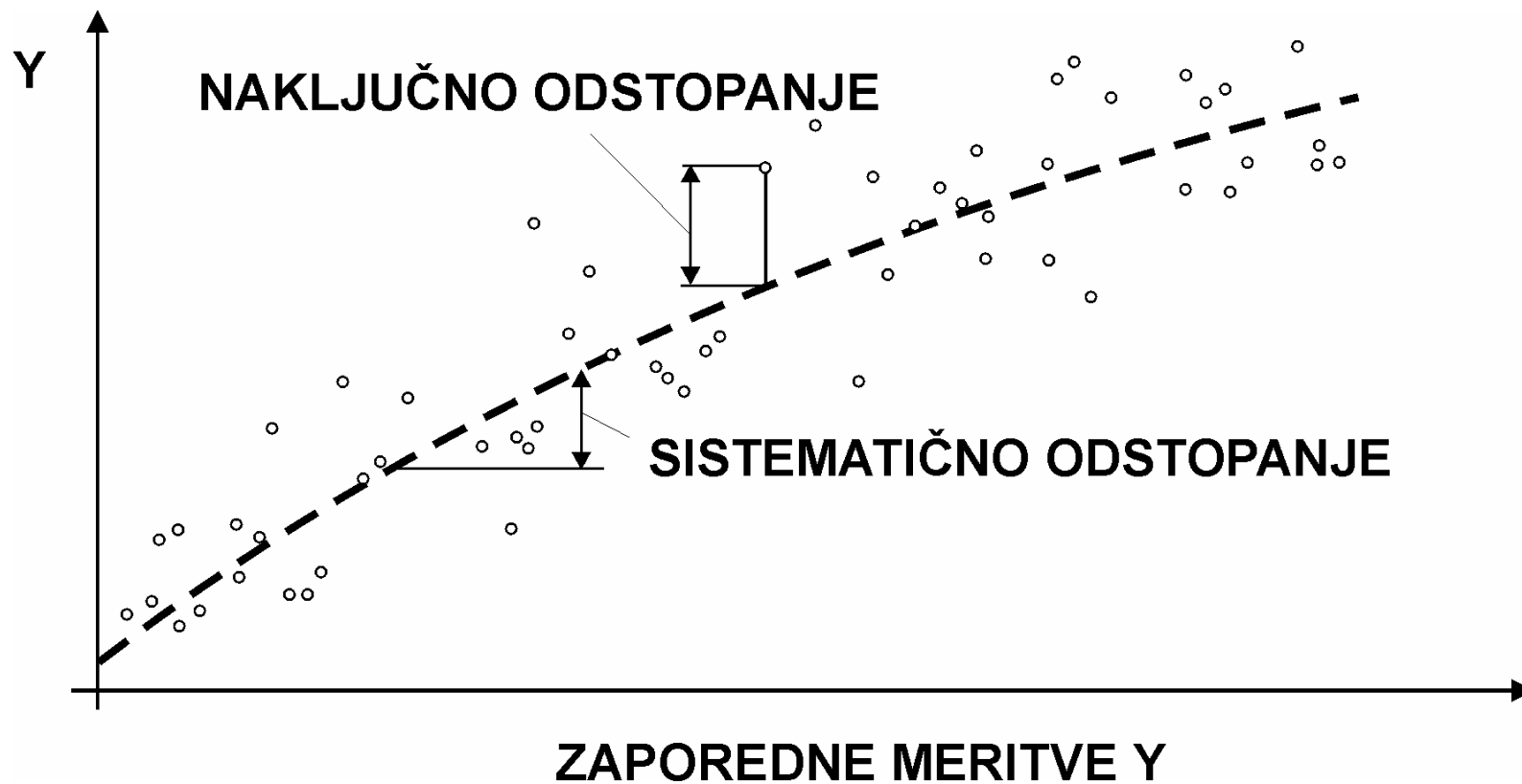


Meritev diskretnih vrednosti X (naključna odstopanja)

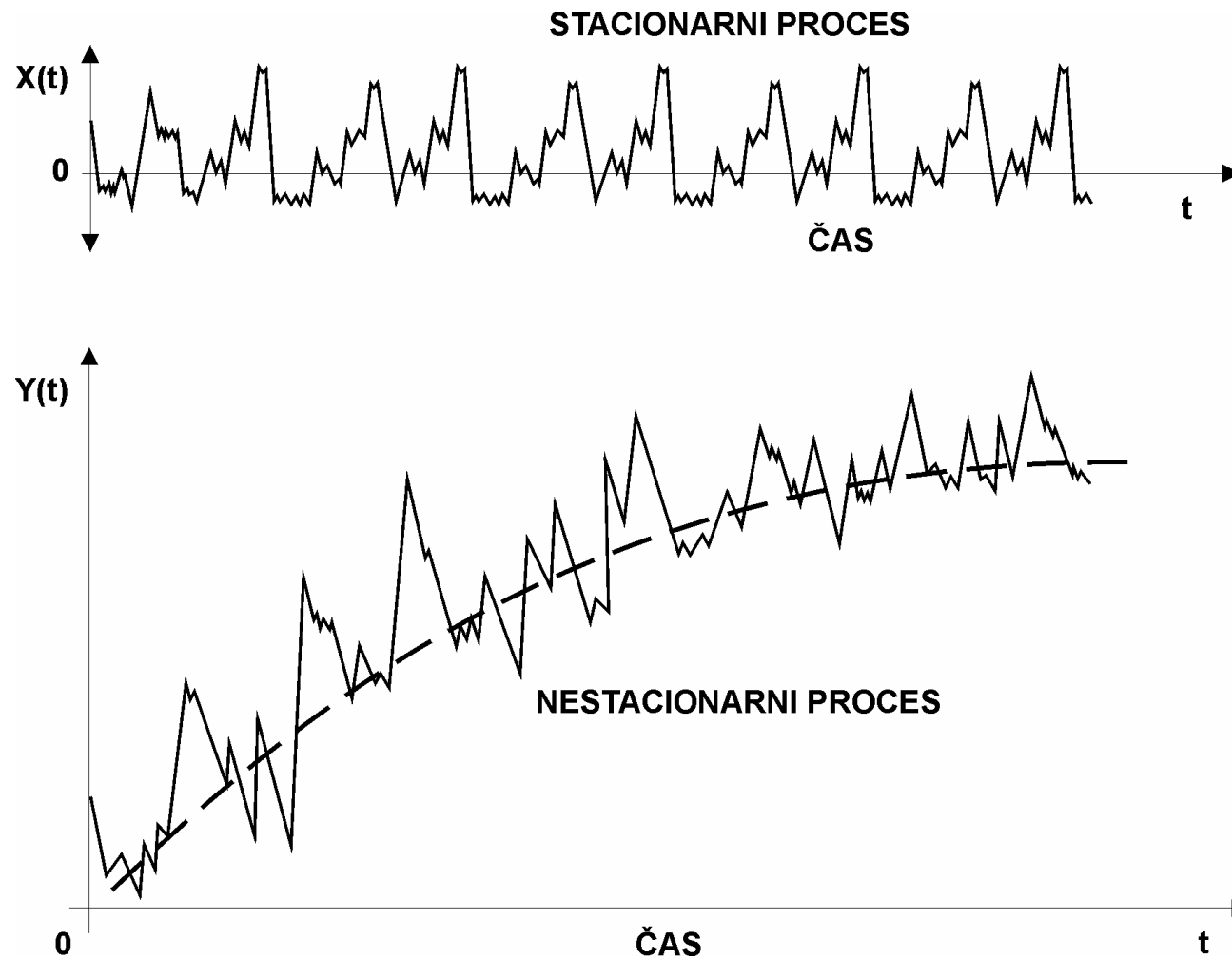
VREDNOTENJE MERITEV Z ENO NAKLJUČNO SPREMENLJIVKO X



Meritev diskretnih vrednosti parametra Y naključna in sistematična odstopanja



Stacionarna in nestacionarna naključna funkcija $X(t)$

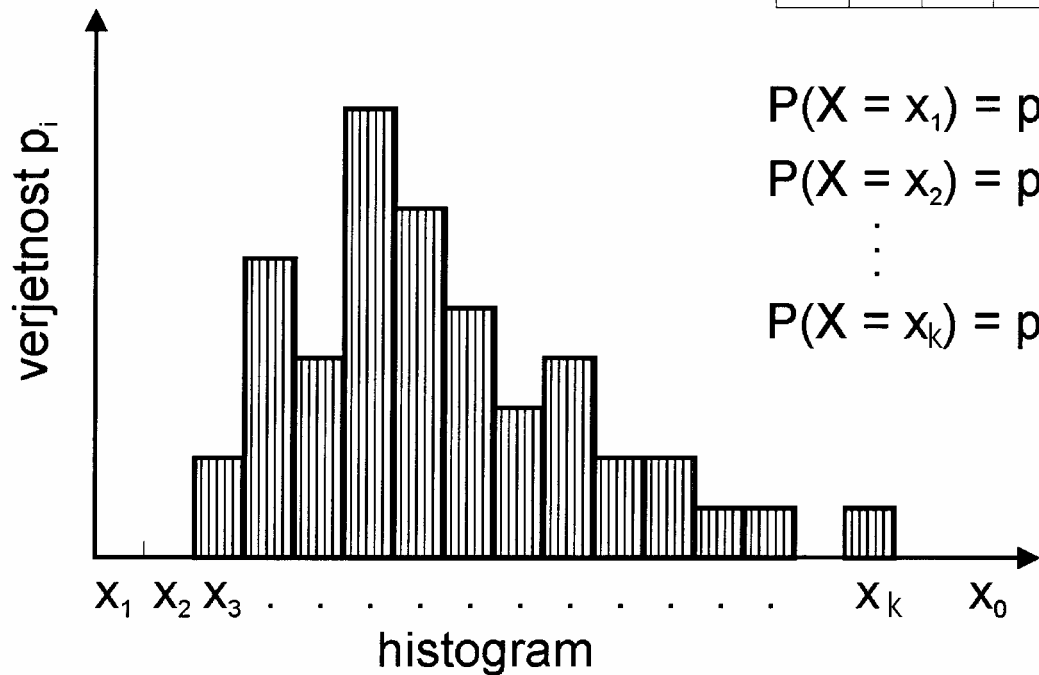


Naključna spremenljivka X

Porazdelitev in histogram spremenljivke

Vrsta razdelitve slučajnostnega parametra X

x_i	x_1	x_2	x_3	.	.	.	.	x_k
p_i	p_1	p_2	p_3	.	.	.	.	p_k



$$P(X = x_1) = p_1$$

$$P(X = x_2) = p_2$$

$$\vdots$$

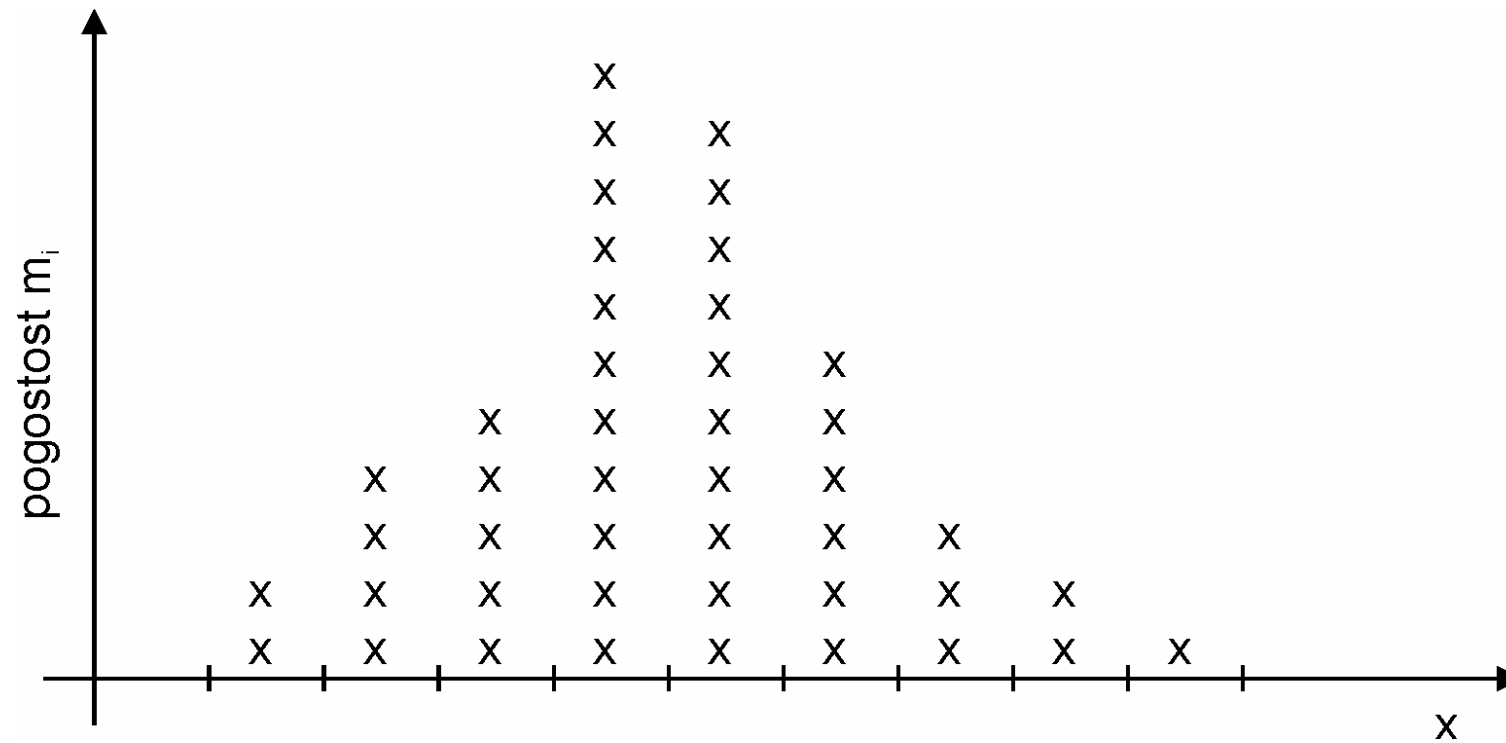
$$P(X = x_k) = p_k$$

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1$$

$$p_i := \frac{m_i}{n}$$

Legenda:
 n število meritev
 m_i število izidov v i-tem razredu
 k število razredov

Vrednotenje meritev (1) histogram



Vrednotenje meritev (2)

empirična porazdelitev spremenljivke X in njeni momenti

X_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_i	2	4	5	11	10	6	3	2	1
p_i	0,045	0,091	0,114	0,25	0,227	0,136	0,07	0,045	0,2023

$$n = 44, k=9$$

$$p_i = \frac{m_i}{n}$$

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1$$

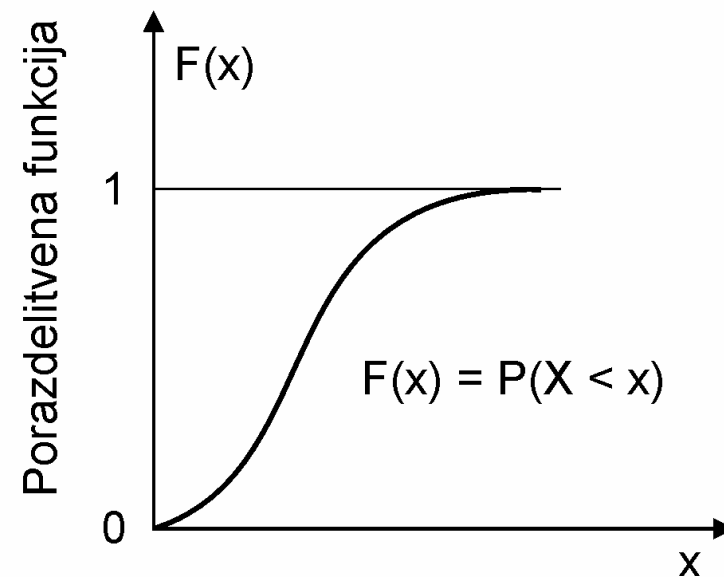
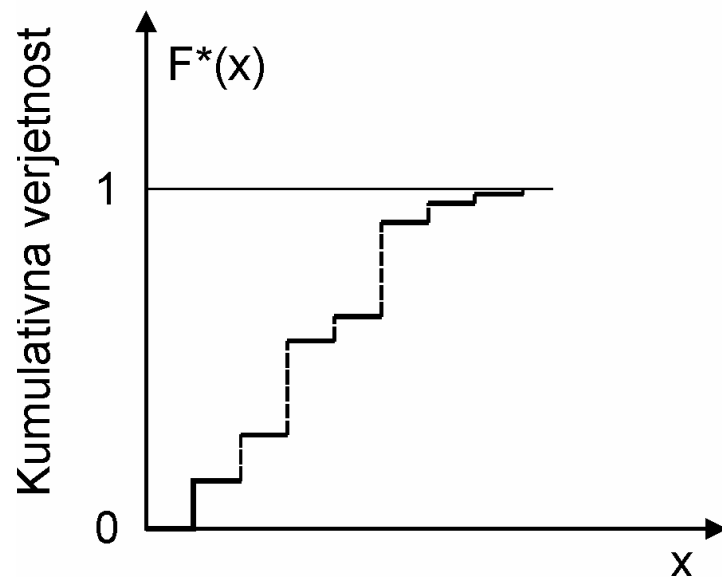
$$m_x = \sum_{i=1}^k x_i p_i \quad - \text{položajni moment}$$

$$\sum_{i=1}^k m_i = n$$

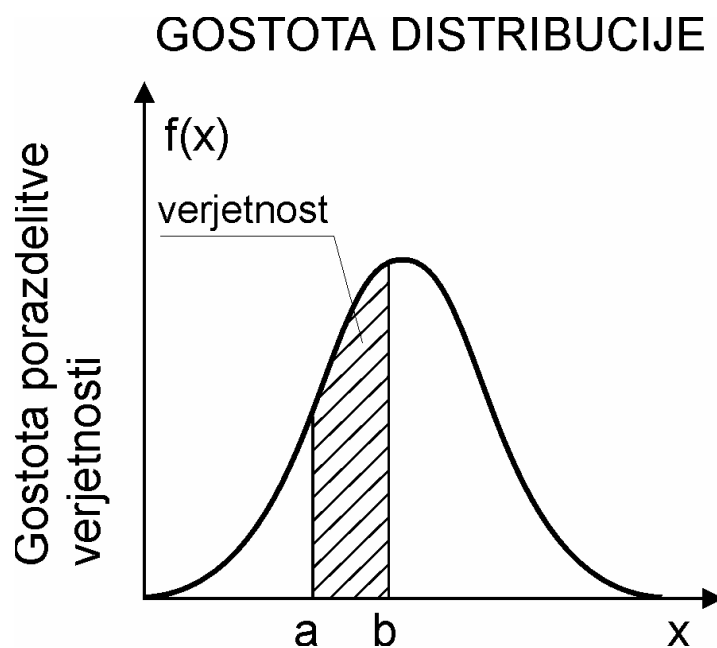
$$\mu_s = \sum_{i=1}^k (x_i - m_x)^s p_i \quad - \text{centralni momenti}$$

Porazdelitvena funkcija (1)

KUMULATIVNA DISTRIBUCIJA



Porazdelitvena funkcija in gostota verjetnosti (2)

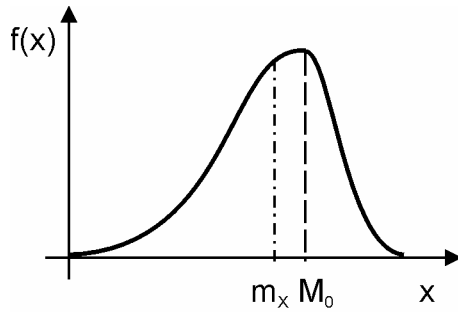


$$f(x) = F'(x)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx$$

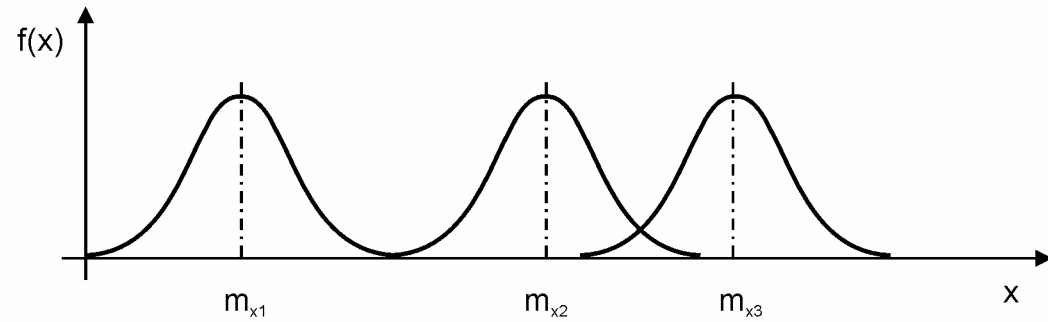
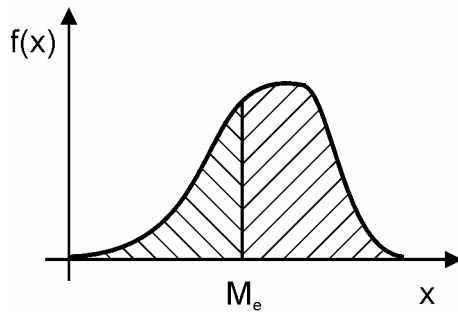
Položajne karakteristike



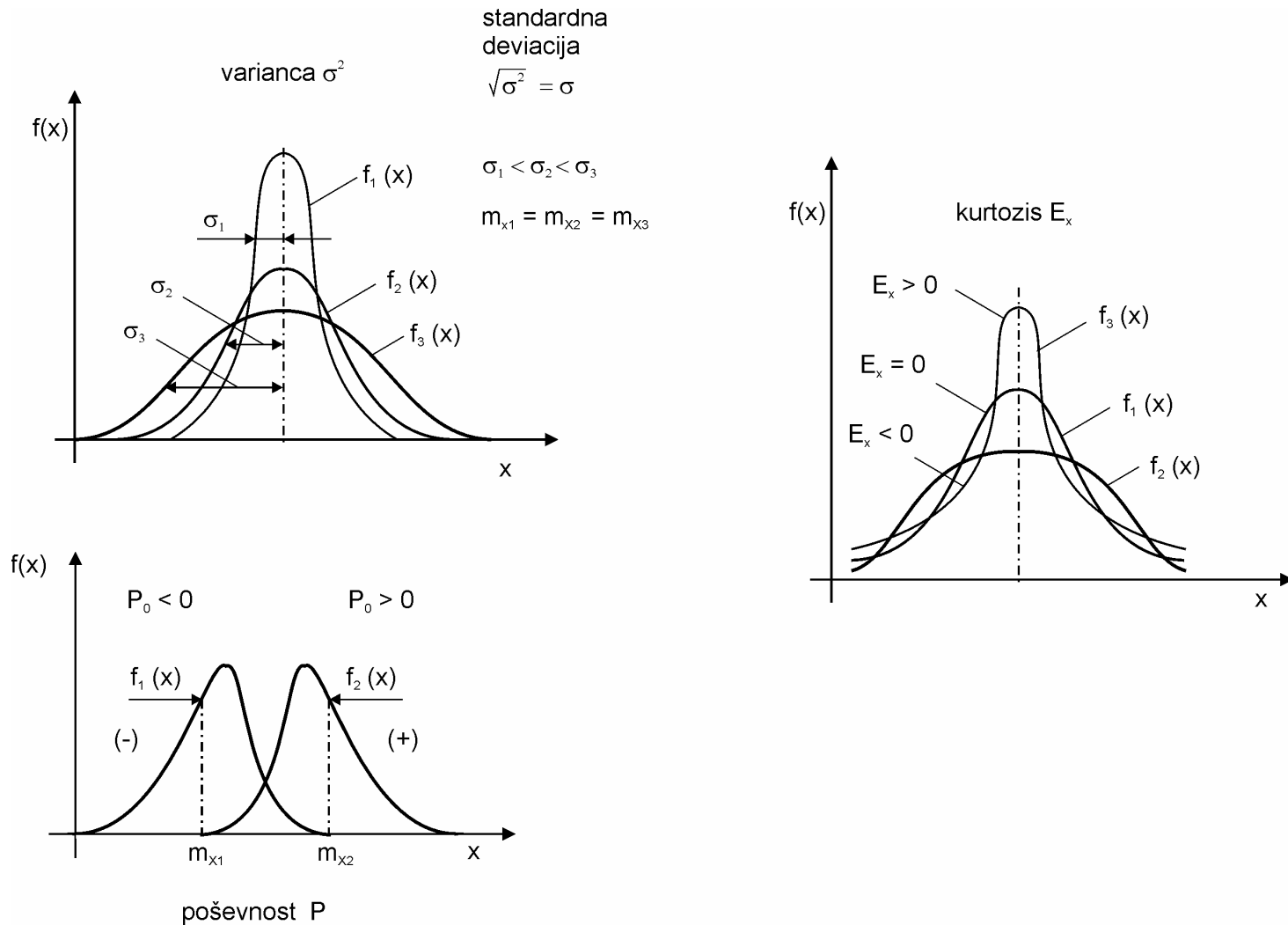
m_x - srednja vrednost $m_x = E[X]$

M_0 - najverjetnejša vrednost (modus)

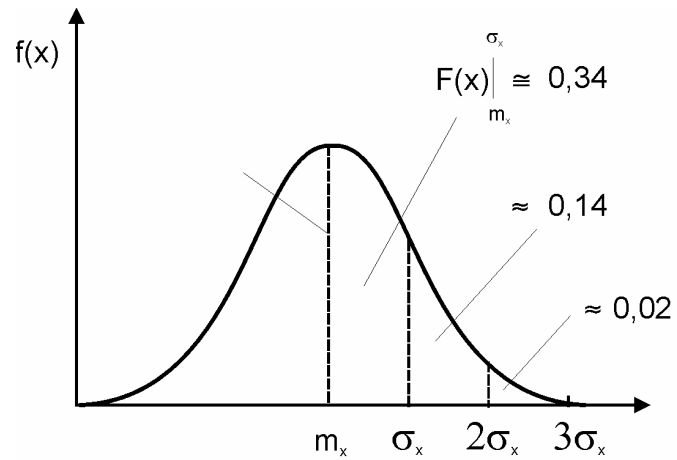
M_e - median $P(X < M_e) = P(X > M_e)$



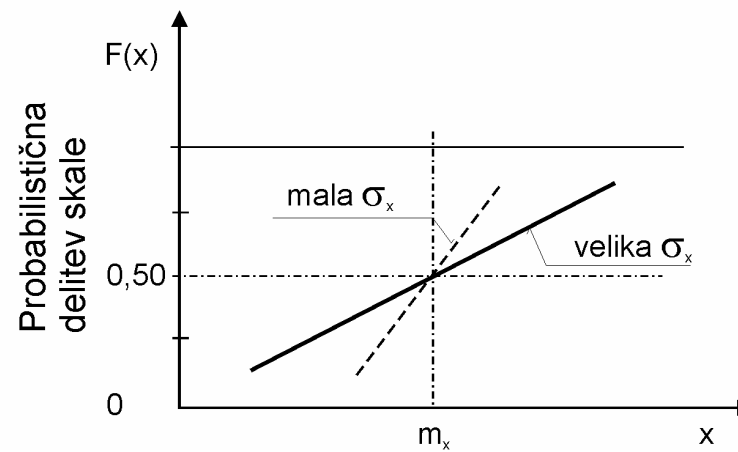
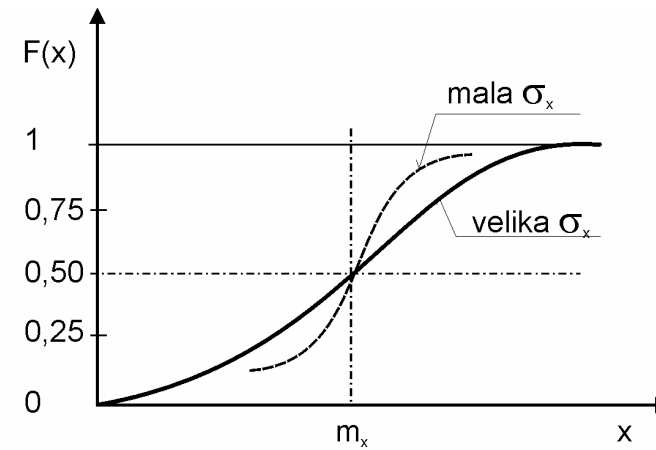
Centralni momenti spremenljivke X



Gaussova ali normalna porazdelitev



$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}}$$

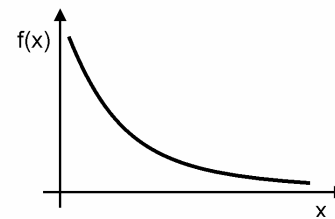
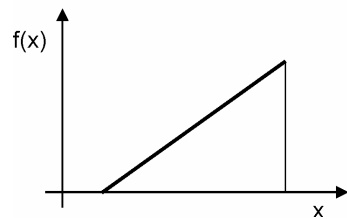
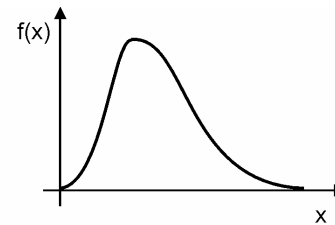
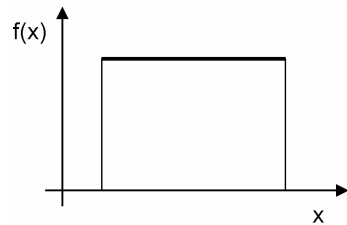
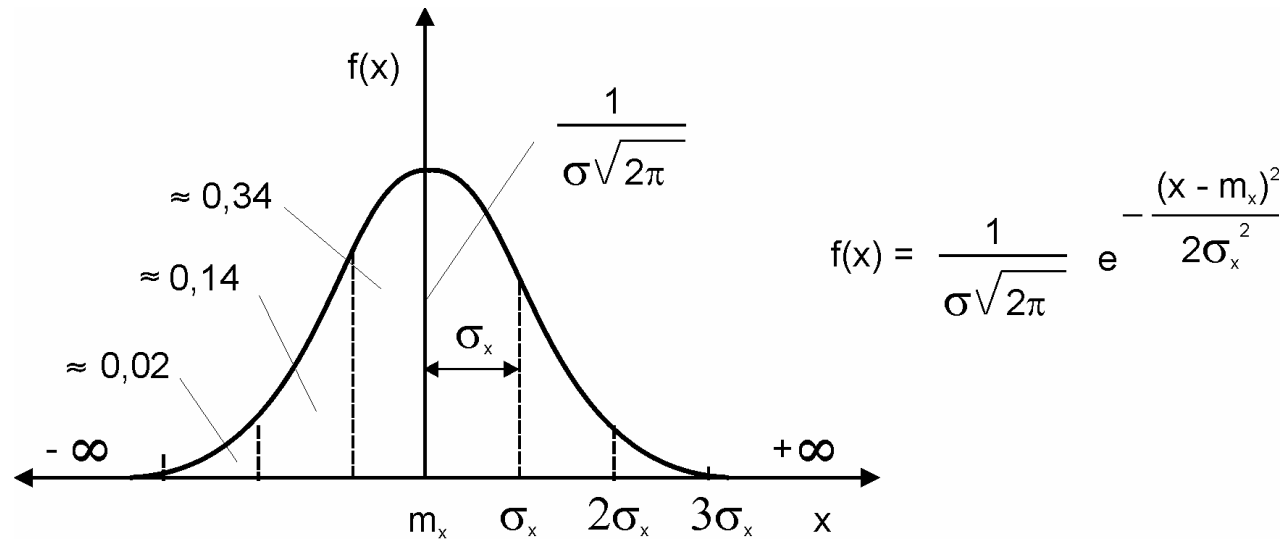


Statistične porazdelitve (1)

Nekatere porazdelitve:

- normalna ali Gaussova
- Enakomerna
- Weibullova
- Maxwelllova
- Distribucija diferenčnega modula
- Druge porazdelitve (Simpsova, eksponentna, gama, log-normalna, itd.)

Statistične porazdelitev (2)



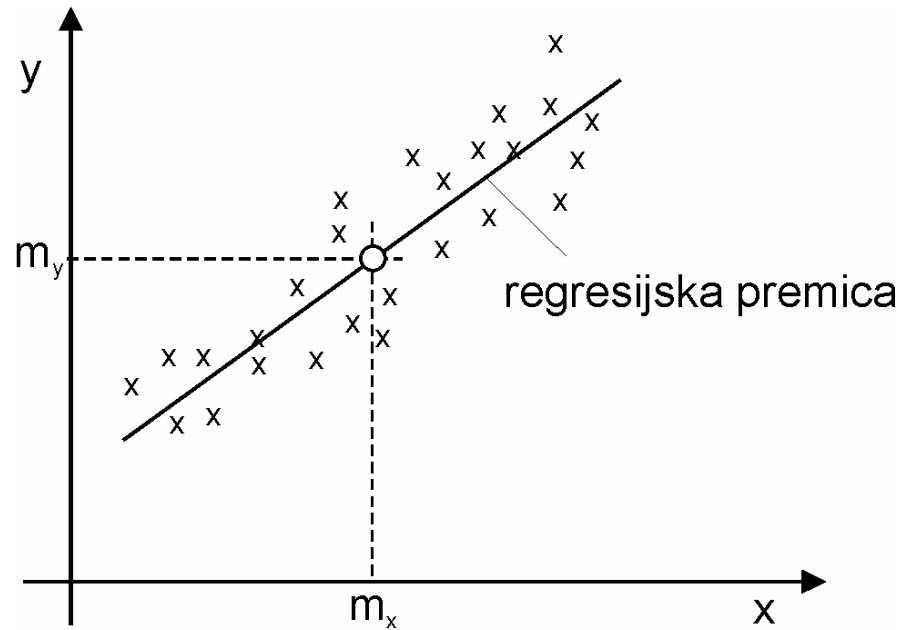
Položajne in centralne karakteristike spremenljivke $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ (1)

POLOŽAJNE KARAKTERISTIKE	
<p>ZA DISKRETNE VREDNOSTI X</p> <p>SPLOŠNO : $\alpha_s [X] = \sum_{i=1}^n x_i^s p_i$</p>	<p>ZA KONTINUIRANE VREDNOSTI $X(t)$</p> <p>SPLOŠNO : $\alpha_s [X] = \int_{-\infty}^{\infty} x^s f(x) dx$</p>
<p>SREDNJA VREDNOST m_x ($s = 1$)</p> <p>$s = 1$</p> $m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i$	<p>SREDNJA VREDNOST m_x ($s = 1$)</p> $m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$
CENTRALNE KARAKTERISTIKE	
<p>ZA DISKRETNE VREDNOSTI X</p> <p>SPLOŠNO: $\mu_s = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^s p_i$</p>	<p>ZA KONTINUIRANE VREDNOSTI $X(t)$</p> <p>SPLOŠNO: $\mu_s = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^s f(x) dx$</p>

Položajne in centralne karakteristike spremenljivke X (2)

SREDNJA ARITMETIČNA DEVIACIJA (s = 1)	
$\mu_1 = \sum_{i=1}^n |x_i - m_x| p_i$	$\mu_1 = \int_{-\infty}^{\infty} |x - m_x| f(x) dx$
VARIANCA (s = 2)	
$\mu_2 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i$	$\mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx$
STANDARDNA DEVIACIJA $\sigma_x = \sqrt{\mu_2}$	
POŠEVNOST (s = 3)	
$\mu_3 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^3 p_i$	$\mu_3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^3 f(x) dx$
POŠEVNOST (NORMIRANA) $P = \frac{\mu_3}{\sigma_x^3}$	
KURTOSIS (s = 4)	
$\mu_4 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^4 p_i$	$\mu_4 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^4 f(x) dx$
KURTOSIS (NORMIRANA) $E_X = \frac{\mu_4}{\sigma_x^4} - 3$	
$E_X = 3$ ZA GAUSSOVO DISTRIBUCIJO	

Vrednotenje merilnih rezultatov dveh naključnih spremenljivk X in Y



$$\overset{o}{x} = x - m_x$$

$$\overset{o}{y} = y - m_y$$

Položajni moment

$$\alpha_{KS} = E[x^K y^S]$$

Centralni moment

$$\mu_{KS} = E \begin{bmatrix} \overset{o}{x}^K & \overset{o}{x}^K \overset{o}{y}^S \\ \overset{o}{x} & \overset{o}{y} \end{bmatrix}$$

V praksi uporabljeni osnovni momenti

$$m_x = \alpha_{1,0} = E[x^1 y^0] = E[x]$$

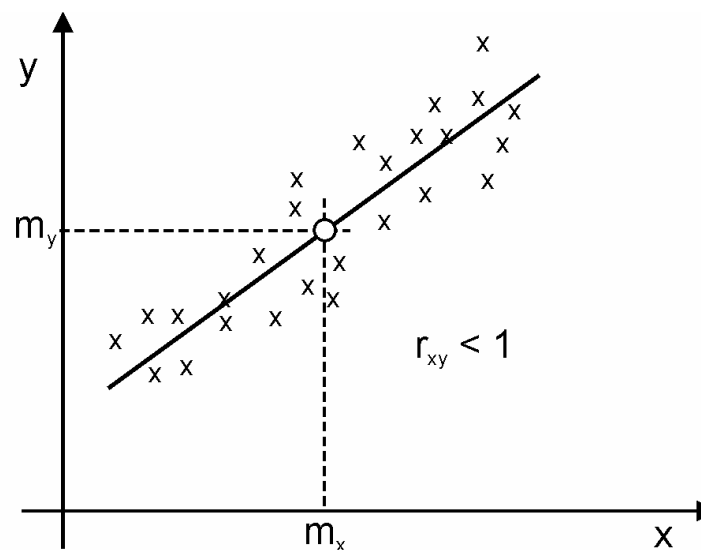
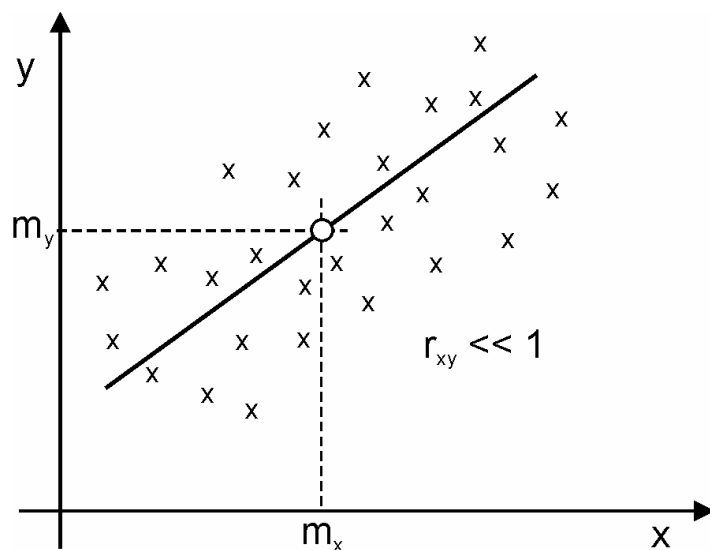
$$m_y = \alpha_{0,1} = E[x^0 y^1] = E[y]$$

$$\mu_{11} = K_{xy} = E \begin{bmatrix} o^1 & o^1 \\ x & y \end{bmatrix} = E[(x - m_x)(y - m_y)]$$

Za izračun:

m_x in m_y ter σ_x in σ_y se izračunavajo kot momenti pri eni spremenljivki

Interpretacija korelacije dveh ali več spremenljivk (1)



korelacijski koeficient

$$-1 < r_{xy} < 1$$

regresijska premica

$$y = m_y + b(x_i - m_x); \quad b = r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

Interpretacija korelacije dveh ali več spremenljivk (2)

za izračun regresijske premice določimo

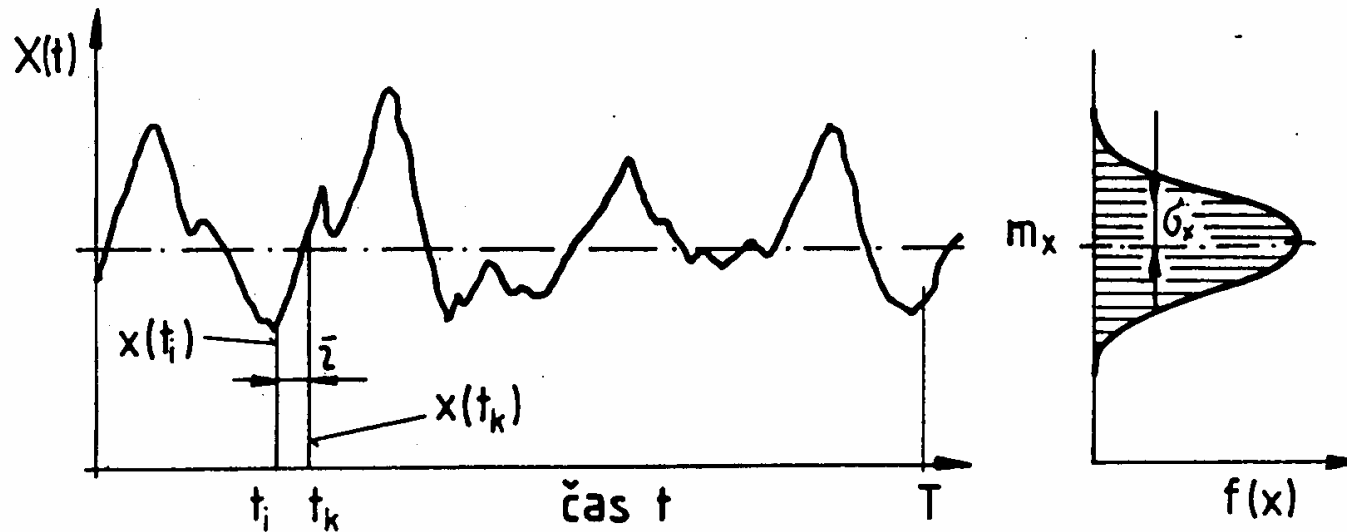
$$m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_{x_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad m_y = \sum_{i=1}^n y_i p_{y_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2, \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2$$

$$K_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)$$

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Vrednotenje stacionarnih naključnih procesov $X(t)$ (1)



$$\tau = t_k - t_i \quad \tau = \{\tau_{\min}; 0, 1T\}$$

naključni proces ocenimo v dveh smereh in sicer

- v smeri ordinate $x(t)$, ter
- v časovni osi $t \quad 0 \leq t < T$

Vrednotenje stacionarnih naključnih procesov $X(t)$ (2)

- a) izračunamo položaj m_x in varianco D_x oziroma standardno deviacijo σ_x
b) izračunamo korelacijsko funkcijo $K_x(\tau)$ in energijski spekter $S_x(\omega)$

ad a)

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i)$$

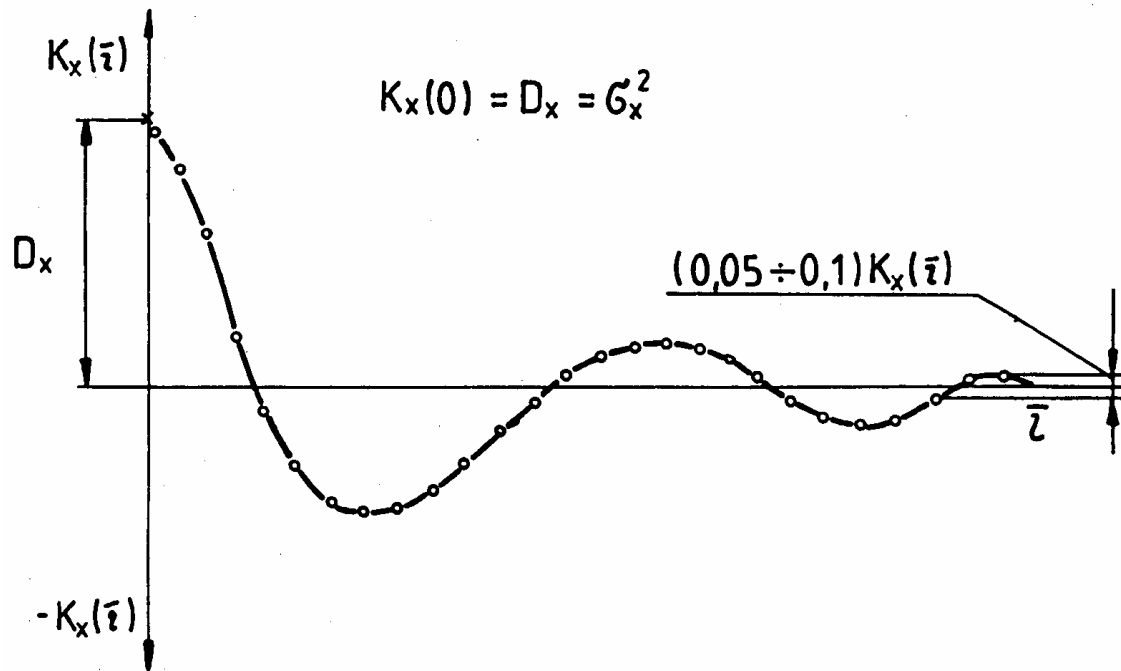
$$D_x = \sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x(t_i) - m_x]^2$$

ad b)

korelacijsko funkcijo $K_x(\tau)$ računamo za diskretne vrednosti korelacijskih momentov, pri čemer spreminjamo vrednost τ :

$$K_x(\tau) = K_x(t_i, t_i + \tau) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x(t_i) - m_x][x(t_i + \tau) - m_x]$$

Vrednotenje stacionarnih naključnih procesov $X(t)$ (3)



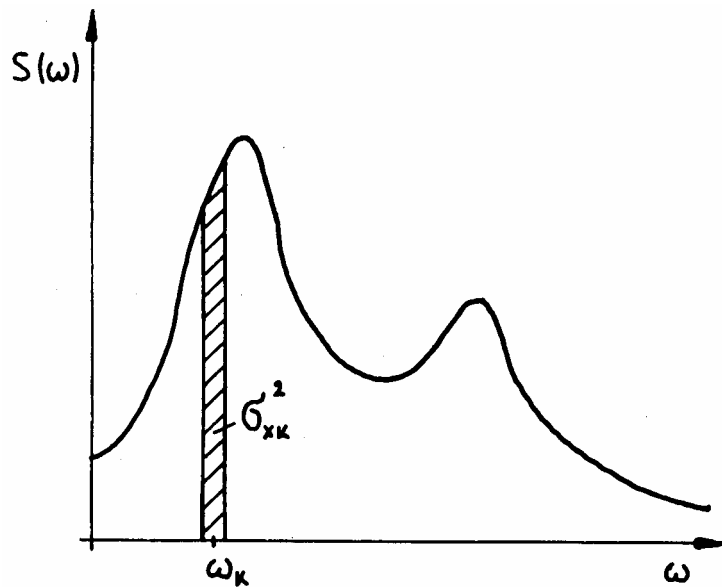
po izračunu točk korelacijskih momentov, povežemo te med seboj in dobimo korelacijsko funkcijo. Točka $K_x(0)$ na ordinati grafa (t.j. pri $\tau = 0$) odgovarja vrednosti variance $D_x = K_x(0) = \sigma_x^2$.

Vrednotenje stacionarnih naključnih procesov $X(t)$ (4)

Normirano korelacijsko funkcijo $k(\tau)$ dobimo tako, da delimo korelacijsko funkcijo $K(\tau)$ z varianco D_x .

$$k_x(\tau) = \frac{K_x(\tau)}{\sigma_x^2}.$$

S fourierjevo transformacijo korelacijske funkcije $k_x(\tau)$ izračunamo energijski spekter $s(\omega)$ naključnega procesa.



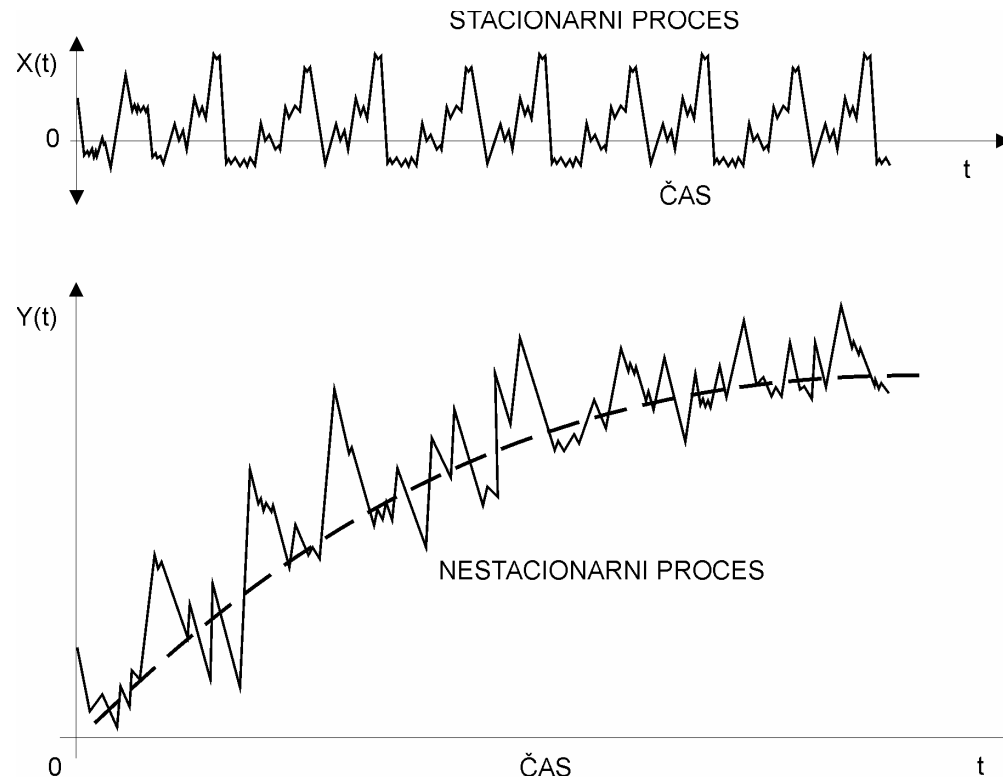
$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} k_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau$$

velja tudi:

$$D_x = \sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

$$\sigma_{xk}^2 = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_k - \Delta}^{\omega_k + \Delta} S(\omega) d\omega$$

Digitalizacija signalov (1)



za računalniško vrednotenje analognih signalov je potrebno te digitalizirati. V merilni tehniki signale digitaliziramo običajno s pomočjo analogno-digitalnih pretvornikov (A/D pretvorniki).

Digitalizacija signalov (2)

pri tem postopamo takole:

- iz zapisa signala ocenimo najkrajšo periodo t_k , ki v signalu nastopa
- nadalje ocenimo najdaljšo periodo t_1 v signalu
- dopustna napaka pri digitalizaciji znaša $\delta = 0,01 \dots 0,02$ izmerjene vrednosti

iz teh podatkov določimo:

1. najkrajši čas vzorčenja (t.j. čas med dvema vzorčnima točkama)
 Δt_{\min} , ki mora zadostiti pogoju dopustne napake δ
2. dolžino signala T oziroma število vzorcev signala N .

Digitalizacija signalov (3)

ad 1.

iz ocenitve časa najkrajše periode t_k izračunamo najvišjo frekvenco ω_k , ki nastopa v signalu

$$\omega_k = \frac{2\pi}{t_k}$$

z upoštevanjem Nyquistovega kriterija določimo čas vzorčenja

$$\Delta t_{\min}$$

$$\Delta t_{\min} = \frac{2\pi}{10\omega_k} = 0,1t_k.$$

Digitalizacija signalov (4)

ad 2

iz ocenitve časa najdaljše periode t_1 izračunamo najnižjo frekvenco ω_1 , ki nastopa v signalu

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{t_1}$$

ter nato izračunamo dolžino signala T po enačbi

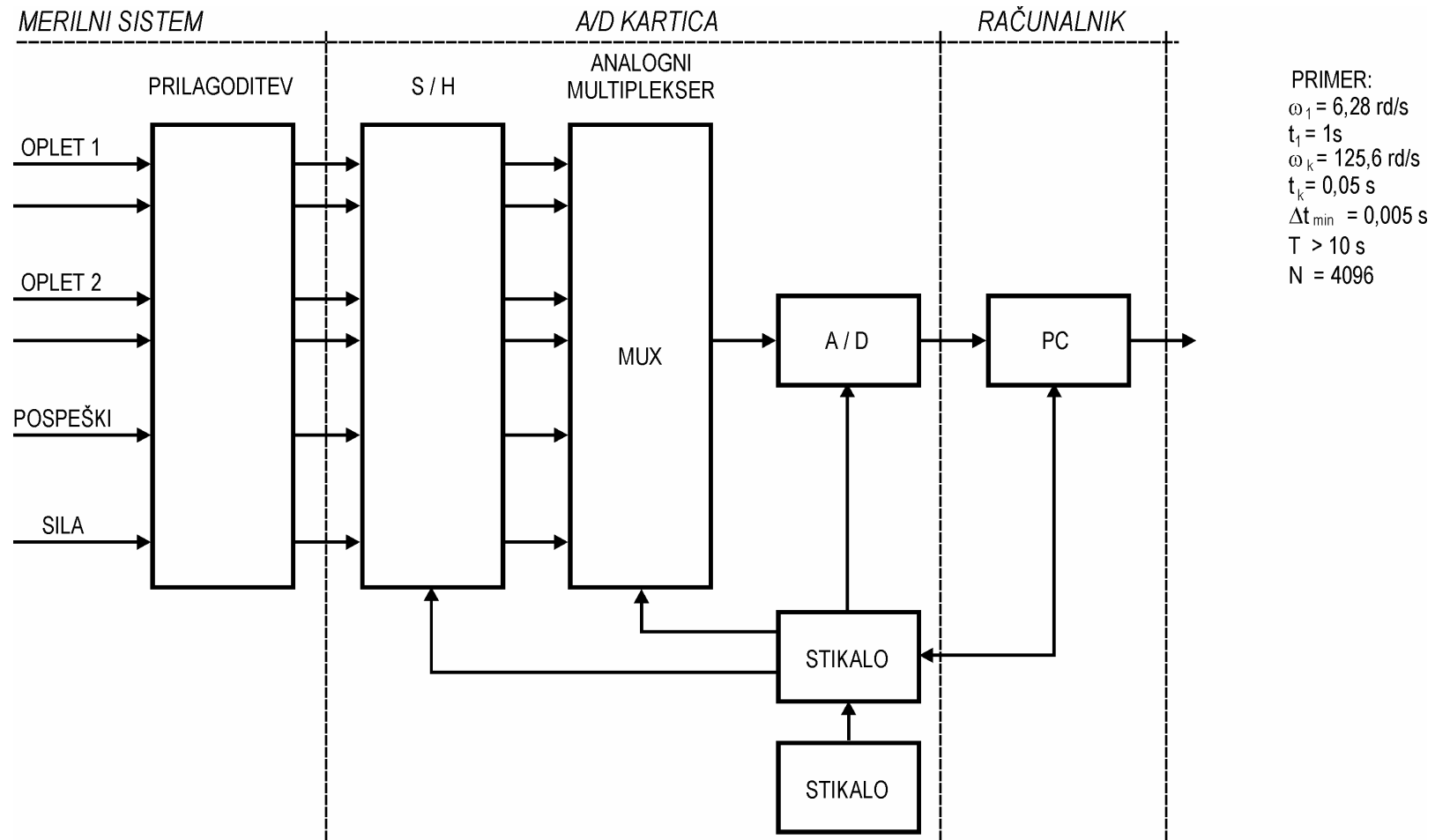
$$T \geq 10t_1$$

število potrebnih vzorcev signala izračunamo na osnovi razmerja:

$$N = \frac{T}{\Delta t_{\min}}$$

vrednost Δt_{\min} uporabimo za nastavitvev čas med dvema vzorcema A/D pretvornika ter vrednost T za določitev časa digitaliziranja (oziroma N za število vzorcev signala).

Primer: zajem merilnih signalov za testiranje dinamičnih lastnosti Kaplanove turbine z računalnikom



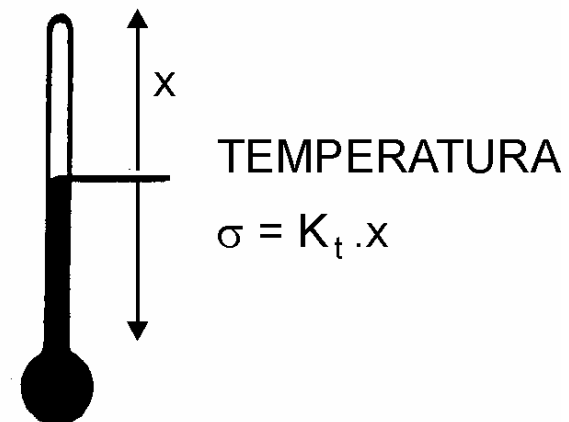
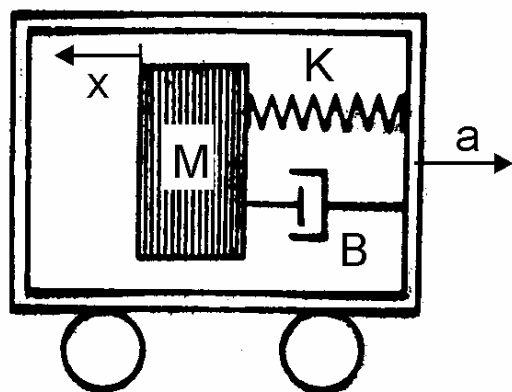
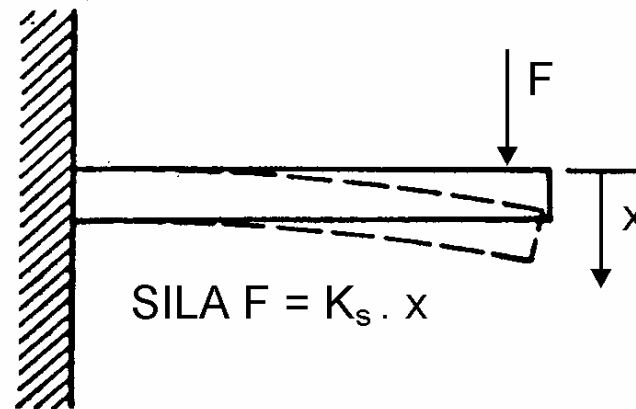
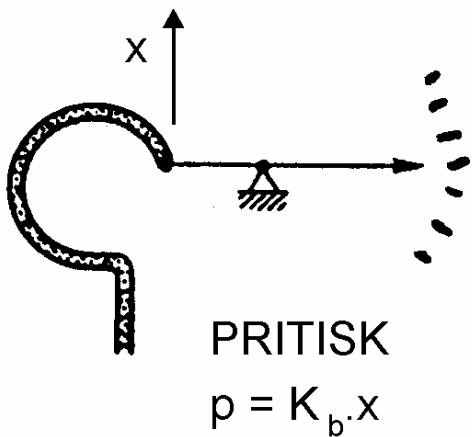
II. del

Funkcijski elementi

6. Senzorji

**Funkcijski elementi
II.del**

Uporaba merjenja poti pri merjenju fizikalnih veličin



Klasifikacija elektromehanskih senzorjev

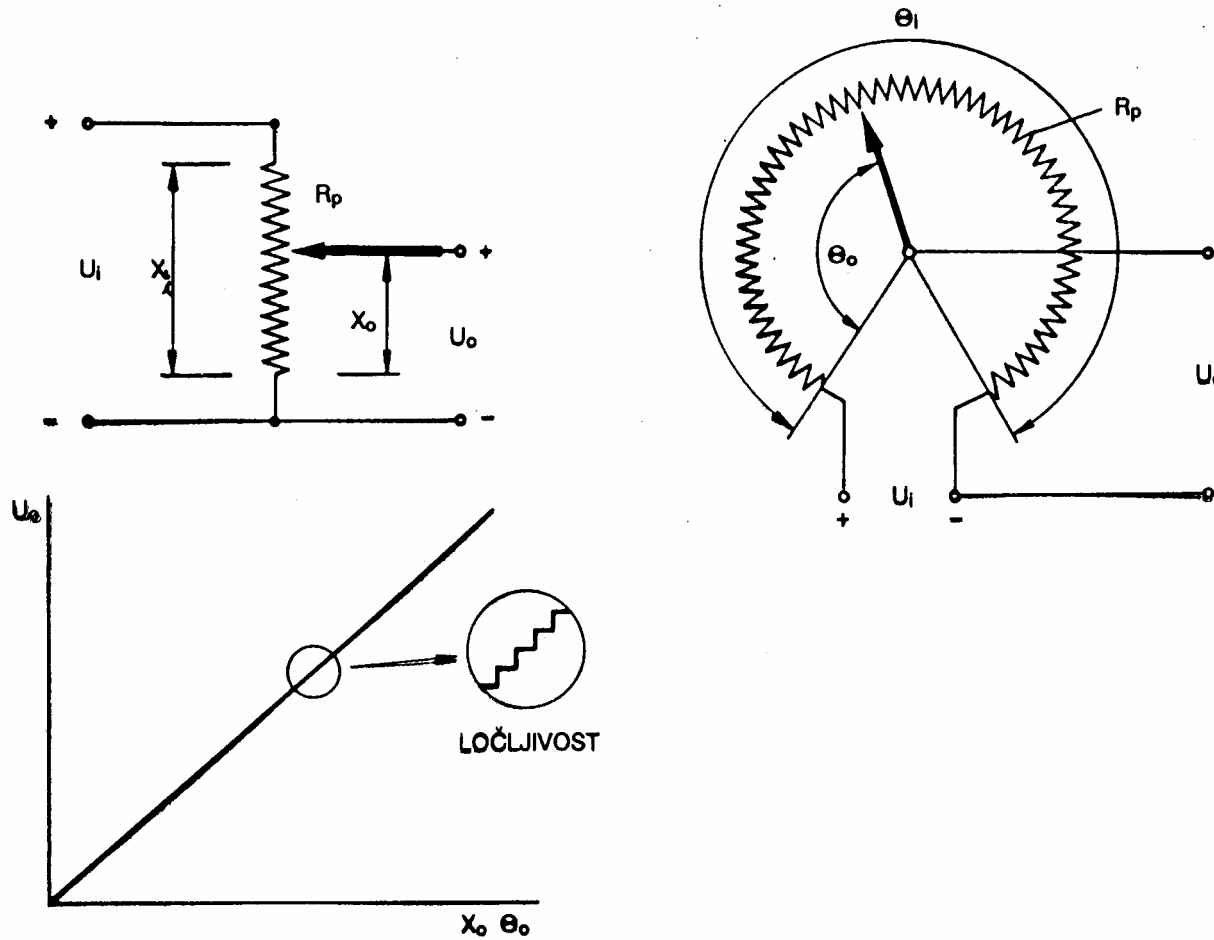


RAZRED	TIP	PRIMERI
UPORNOST	KONTAKTNO – DRSEČI ELASTIČNI	POTENCIOMETRI MERILNI TRAKOVI
MAGNETNO POLJE	VARIABILNI TRANSFORMATOR VARIABILNA RELUKTANCA HITROSTNI GENERATORJI	SINHRO, INDUKTOSIN, LVDT MIKROSIN, DIFERENCIALNI TRANSFORMATOR AC – TAHOGENERATOR DC – TAHOGENERATOR HITROSTNI INDUKTIVNI SENZOR
ELEKTRIČNO POLJE	POZICIJSKI	VARIABILNI KONDENZATORJI
EFEKTI V MATERIALU	PIEZOELEKTRIČNI MAGNETOSTRIKTIVNI TERMOELEKTRIČNI FOTOELEKTRIČNI	AKCELEROMETRI, DINAMOMETRI DINAMOMETRI TERMOELEMENTI FOTOCELICE

6.1 Merilni potenciometri

Funkcijski elementi
II.del

Potenciometri za merjenje translatornih in rotacijskih poti



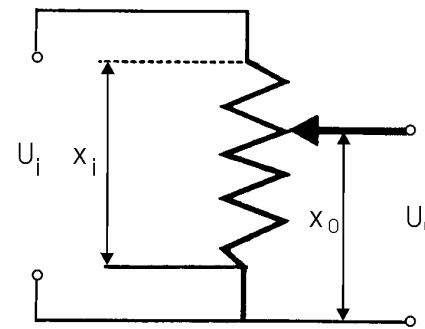
Potenciometer

Merjenje: translacijskih poti
rotacijskih poti

$$x_0 = 2.5 \div 500 \text{ mm}$$

$$\Theta_0 = 10^0 \div 60 \times 360^0$$

Izvedbe: uporovna žica
film iz oglja
prevodna plastika



Napajanje: = ali \sim

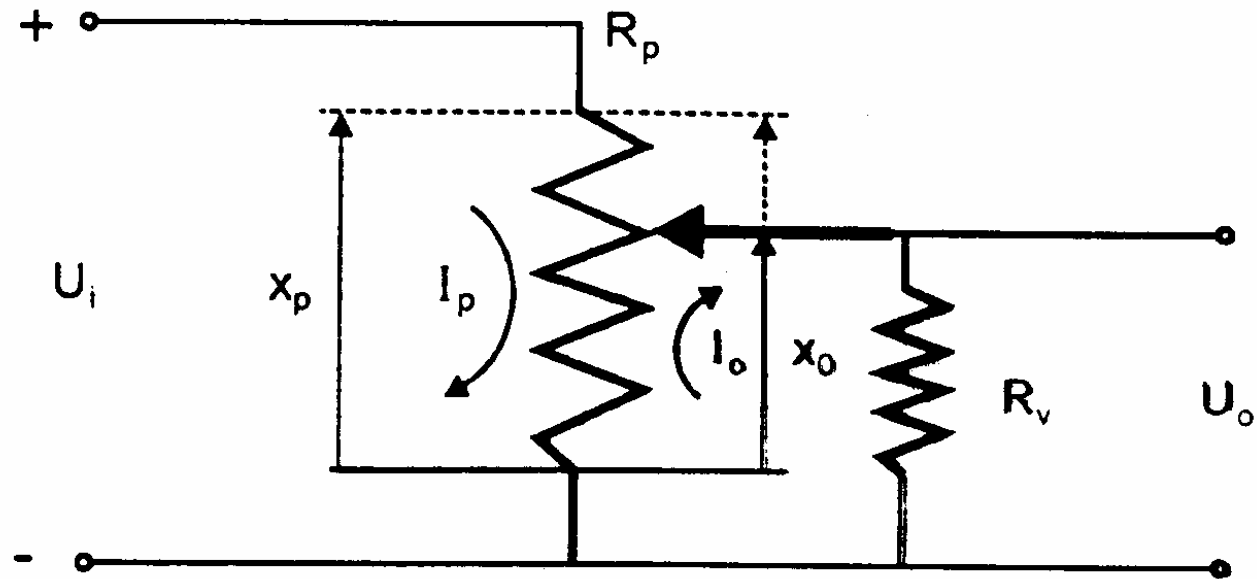
Analiza tokokroga

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{1}{\frac{x_i}{x_0} + \frac{R_p}{R_v} \left(1 - \frac{x_0}{x_i}\right)}$$

R_p impedanca potenciometra

R_v impedanca bremena (voltmetra)

Obremenilni efekt na potenciometru



LEGENDA:

U_i	Napajalna napetost	U_o	Merjena napetost
x_p	Dožina potenciometra	x_0	Merjena dolžina $\{0, x_p\}$
R_p	Upornost potenciometra	R_v	Obremenilni upor (upor priključenega instrumenta)
I_p	Tok v potenciometru	I_o	Tok obremenitve

Merjenje poti s potenciometrom

Obremenilni efekt na potenciometru

ENAČBA POTENCIOMETRA

$$U_i = R_p I_p - \frac{x_0}{x_p} R_p I_0$$

$$\frac{x_0}{x_p} R_p I_p = R_v I_0 + \frac{x_0}{x_p} R_p I_0 \quad \text{pri čemer je } U_0 = R_v I_0$$

$$I_p = \left(\frac{x_p R_v}{x_0 R_p} + 1 \right) I_0$$

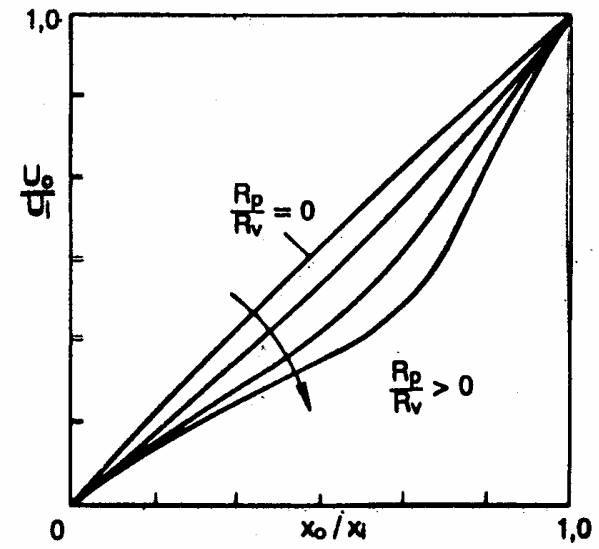
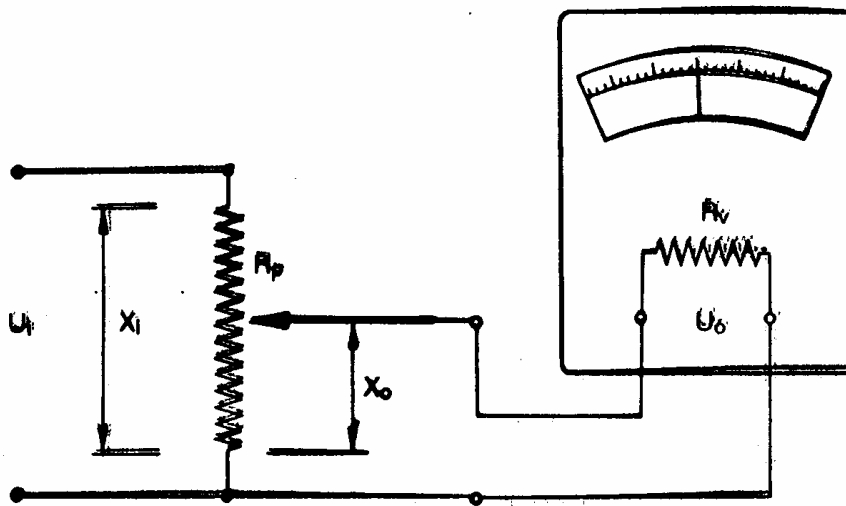
$$U_i = R_p \left(\frac{x_p R_v}{x_0 R_p} + 1 \right) I_0 - \frac{x_0}{x_p} R_p I_0 = \left[\left(\frac{x_p R_v}{x_0 R_p} + 1 \right) - \frac{x_0}{x_p} \right] R_p \frac{U_0}{R_v}$$

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{1}{\frac{R_p}{R_v} \left[\frac{x_p R_v}{x_0 R_p} + 1 - \frac{x_0}{x_p} \right]} = \frac{1}{\frac{x_p}{x_0} + \frac{R_p}{R_v} \left(1 - \frac{x_0}{x_p} \right)} = \frac{x_0}{x_p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{x_0 R_p}{x_p R_v} \left(1 - \frac{x_0}{x_p} \right)}$$

NAPAKA ZARADI OBREMENILNEGA EFEKTA

$$e \left(\frac{x_0}{x_p} \right) = \frac{U_0}{U_i} \left(\frac{x_0}{x_p}, R_v = \infty \right) - \frac{U_0}{U_i} \left(\frac{x_0}{x_p}, \frac{R_p}{R_v} > 0 \right) = \frac{x_0}{x_p} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \frac{x_0 R_p}{x_p R_v} \left(1 - \frac{x_0}{x_p} \right)} \right\}$$

Obremenilni efekt na potenciometru



Obremenilni efekt na potenciometru

$$\text{PRI } \frac{R_p}{R_v} = 0 \quad \text{VELJA } \frac{U_0}{U_i} = \frac{X_0}{X_i}$$

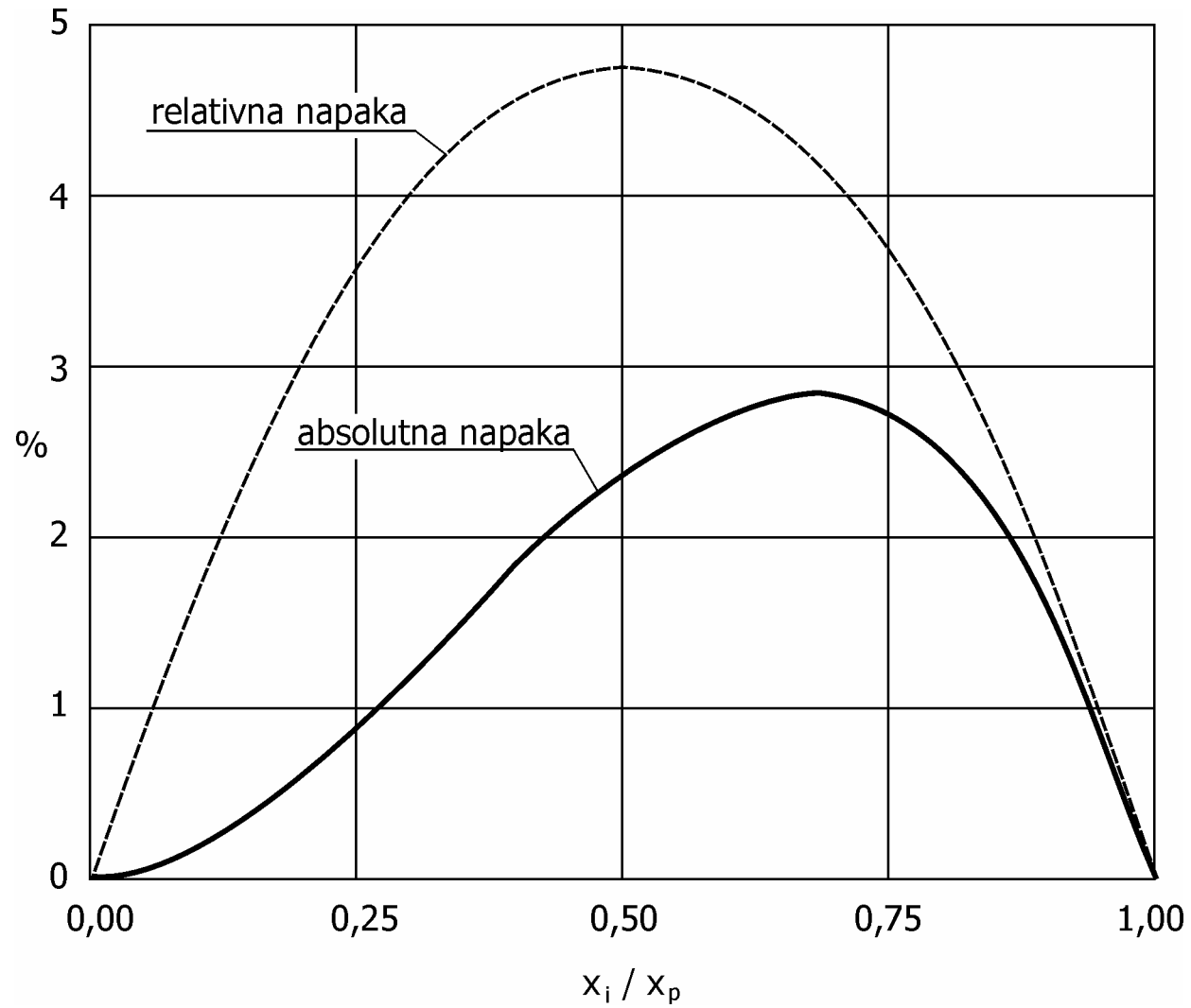
NAPAKE ZARADI OBREMENILNEGA EFEKTA

$$\text{PRI } \frac{R_p}{R_v} > 0 \quad \text{NAPAKE: } \frac{R_p}{R_v} = 1,0 \quad \Delta_{\max} = 0,12$$

$$\frac{R_p}{R_v} = 0,1 \quad \Delta_{\max} = 0,015$$

$$\text{PRI } \frac{X_0}{X_i} = 0.67$$

Napaka potenciometra (obremenilni efekt)



$$\frac{R_p}{R_v} = 0,2$$

Načrtovanje potenciometra

POGOJI ZA KONSTRUKCIJO POTENCIOMETRA

$$R_p \ll R_v \quad (R_p = 100 \div 100\,000 \, \Omega)$$

NAPAJANJE POTENCIOMETRA

$$U_{\text{imax}} = \sqrt{PR_p}$$

$P \approx 5W \quad \text{PRI } 20 \, ^\circ\text{C}$

- MOTNJE :
- SPREMEMBA NAPAJALNE NAPETOSTI
 - RESONANCA JEZIČKA
 - TRENJE IN OBRABA

6.2 Merilni trakovi

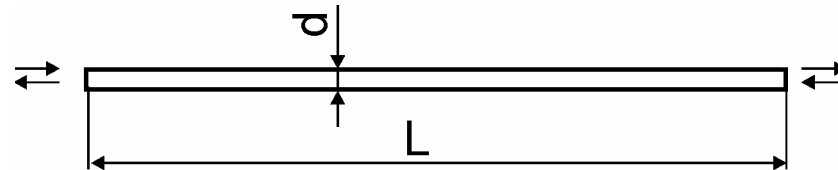
Merilni trakovi

Karakteristike prevodnika so:

dolžina - L

presek - A

specifična upornost - ρ



upornost $R = \frac{\rho \cdot L}{A}$

R se spremeni zaradi raztezka ali skrčka kot posledica

- dimenzijskih sprememb $L \pm \Delta L$
 $d \pm \Delta d$
- spremembe Piezo-upornosti

Določitev faktorja ojačanja merilnega traku (1)

Ohmska upornost vodnika je izražena z:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Njen totalni odvod je vsota parcialnih odvodov:

$$\begin{aligned} dR &= \frac{\partial R}{\partial \rho} \cdot d\rho + \frac{\partial R}{\partial L} \cdot dL + \frac{\partial R}{\partial A} \cdot dA = \\ &= \frac{L}{A} \cdot d\rho + \frac{\rho}{A} \cdot dL - \frac{\rho \cdot L \cdot dA}{A^2} \end{aligned}$$

$$dR = \frac{A \cdot L \cdot d\rho + \rho \cdot A \cdot dL - \rho \cdot L \cdot dA}{A^2}$$

Izraz $L \cdot dA$ izpeljemo iz enačbe volumna vodnika na sledeč način:

$$V = A \cdot L$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial A} \cdot dA + \frac{\partial V}{\partial L} \cdot dL = L \cdot dA + A \cdot dL$$

Določitev faktorja ojačanja merilnega traku(2)

Spremembo vodnika lahko izrazimo tudi z:

$$dV = A \cdot (1 - \varepsilon \cdot \nu)^2 \cdot L \cdot (1 + \varepsilon) - A \cdot L$$

Pri majhnem ε lahko izraz $(1 - \varepsilon \cdot \nu)^2$ aproksimiramo z $1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon$. Izraz

$(1 - \varepsilon \cdot \nu)^2 \cdot (1 + \varepsilon)$ pa lahko aproksimiramo z $1 + \varepsilon - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon = 1 + \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu)$.

Torej sledi:

$$dV = A \cdot L + A \cdot L \cdot \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu) - A \cdot L = \boxed{A \cdot L \cdot \frac{dL}{L} \cdot (1 - 2 \cdot \nu) = L \cdot dA + A \cdot dL}$$

iz česar sledi $\boxed{L \cdot dA = -2 \cdot \nu \cdot A \cdot dL}$, kar pa je iskani izraz za $L \cdot dA$.

Spremembo volumna

izrazimo: $\frac{dV}{V} = A \cdot L \cdot \frac{dL}{L} \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \frac{1}{A \cdot L} = \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu)$.

Določitev faktorja ojačanja merilnega traku (3)

Izpeljava faktorja ojačanja merilnega traka K_{MT} :

$$\begin{aligned}dR &= \frac{\rho \cdot A \cdot dL + A \cdot L \cdot d\rho + \rho \cdot 2 \cdot \nu \cdot A dL}{A^2} = \\ &= \frac{\rho \cdot dL \cdot (1 + 2 \cdot \nu)}{A} + \frac{L \cdot d\rho}{A} \quad | : R = \rho \cdot \frac{L}{A}\end{aligned}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad | : \frac{dL}{L}$$

in torej K_{MT} :

$$K_{MT} = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = 1 + 2 \cdot \nu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}}$$

Faktor ojačanja merilnega traku sestavljajo členi:

1. sprememba upornosti zaradi raztezka vodnika
2. sprememba upornosti zaradi kontrakcije prereza vodnika
3. sprememba piezo-upornosti zaradi raztezka vodnika

Določitev faktorja ojačanja merilnega traku (4)

Za določene materiale velja odvisnost $\frac{d\rho}{\rho} = c \cdot \frac{dV}{V}$, pri čemer je c

Bridgova konstanta za določeni material. Sedaj lahko izrazimo $K_{MT} = 1 + 2 \cdot \nu + c \cdot (1 - 2\nu)$. Za konstantan (c=1,13 in $\nu=0,3$) je $K_{MT}=2,052$.

Sprememba upornosti vodnika v odvisnosti od ε je torej:

$$dR = K_{MT} \cdot R \cdot \frac{dL}{L} = K_{MT} \cdot R \cdot \varepsilon = K_{MT} \cdot R \cdot \frac{\sigma}{E}$$

in je proporcionalna mera za ε oz. σ . S tem je podana povezava med mehansko vstopno veličino ε in električno veličino dR, oziroma občutljivost senzorja - merilnega traka pri uporabi merilnih trakov za merjenje deformacije oz. napetosti v materialu.

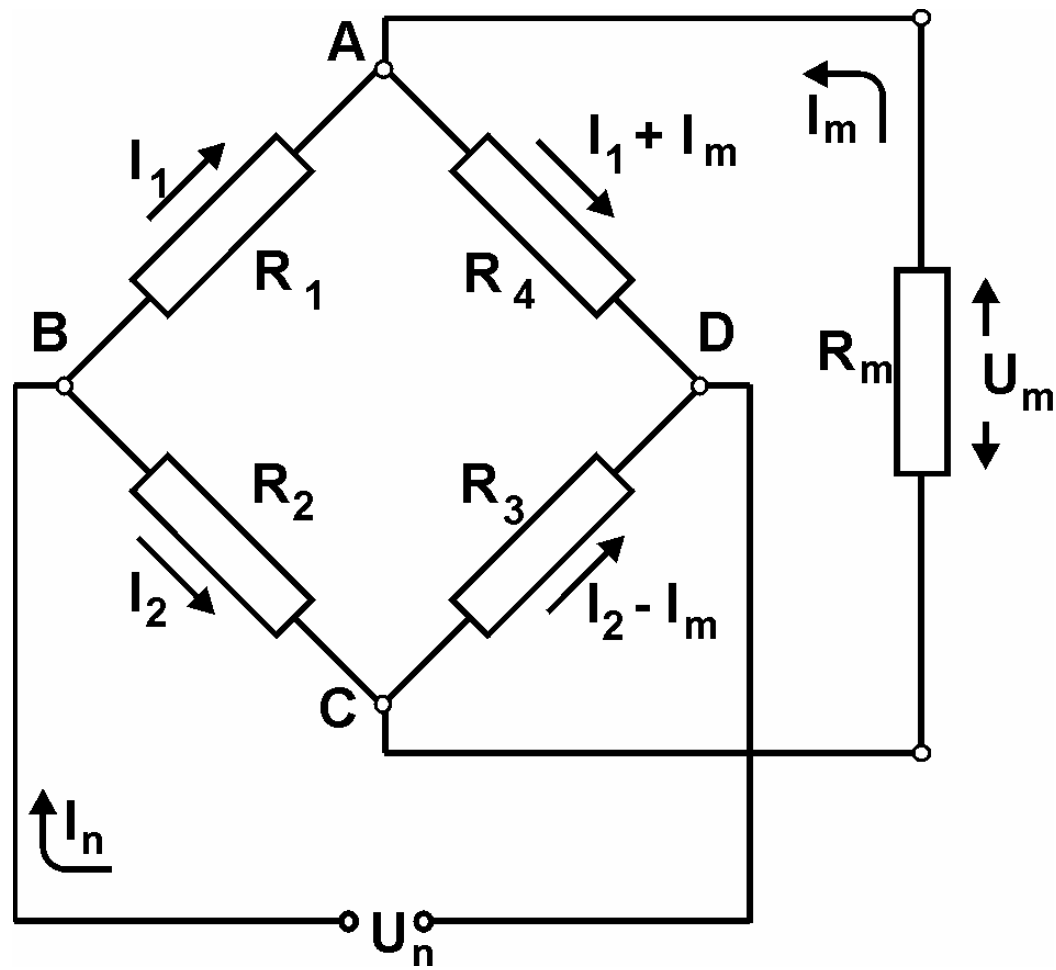
dR praviloma merimo v Wheatstonovem mostiču. Tako je

$U_m = \frac{dR}{4 \cdot R} \cdot U_n$. Sledi izraz za izmerjeno napetost v odvisnosti od

merjene veličine ε :

$$U_m = \frac{K_{MT} \cdot R \cdot \varepsilon}{4 \cdot R} \cdot U_n = \frac{K_{MT} \cdot U_n}{4} \cdot \varepsilon = K_S \cdot \varepsilon$$

Wheatstonov mostič (1)



Wheatstonov mostič (2)

Kirchofova zakona

1. zakon

Vsota vseh tokov, ki prihajajo v razvejišče, je enaka vsoti tokov, ki iz razvejišča izhajajo:

$$\sum I = 0$$

2. zakon

Algebraična vsota napetosti vseh izvorov v zaključenem tokovnem krogu je enaka vsoti napetosti na posameznih upornikih tokovnega kroga.

$$U_n = \sum_i U_i = \sum_i I_i R_i$$

$$(B) \rightarrow I_n = I_1 + I_2$$

$$(C) \rightarrow I_2 = I_3 + I_m$$

$$(A) \rightarrow I_4 = I_1 + I_m$$

$$(B-A-D) \rightarrow U_n = I_1 \cdot R_1 + I_4 \cdot R_4$$

$$(B-C-A-D) \rightarrow U_n = I_2 \cdot R_2 + I_m \cdot R_m + I_4 \cdot R_4$$

$$(B-C-D) \rightarrow U_n = I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3$$

Wheatstonov mostič (3)

$$I_m = \frac{(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{(R_1 + R_2) R_3 R_4 + (R_3 + R_4) R_1 R_2 + R_m (R_1 + R_4) (R_2 + R_3)} U_n$$

pri $R_m \gg R_1 \dots R_4$

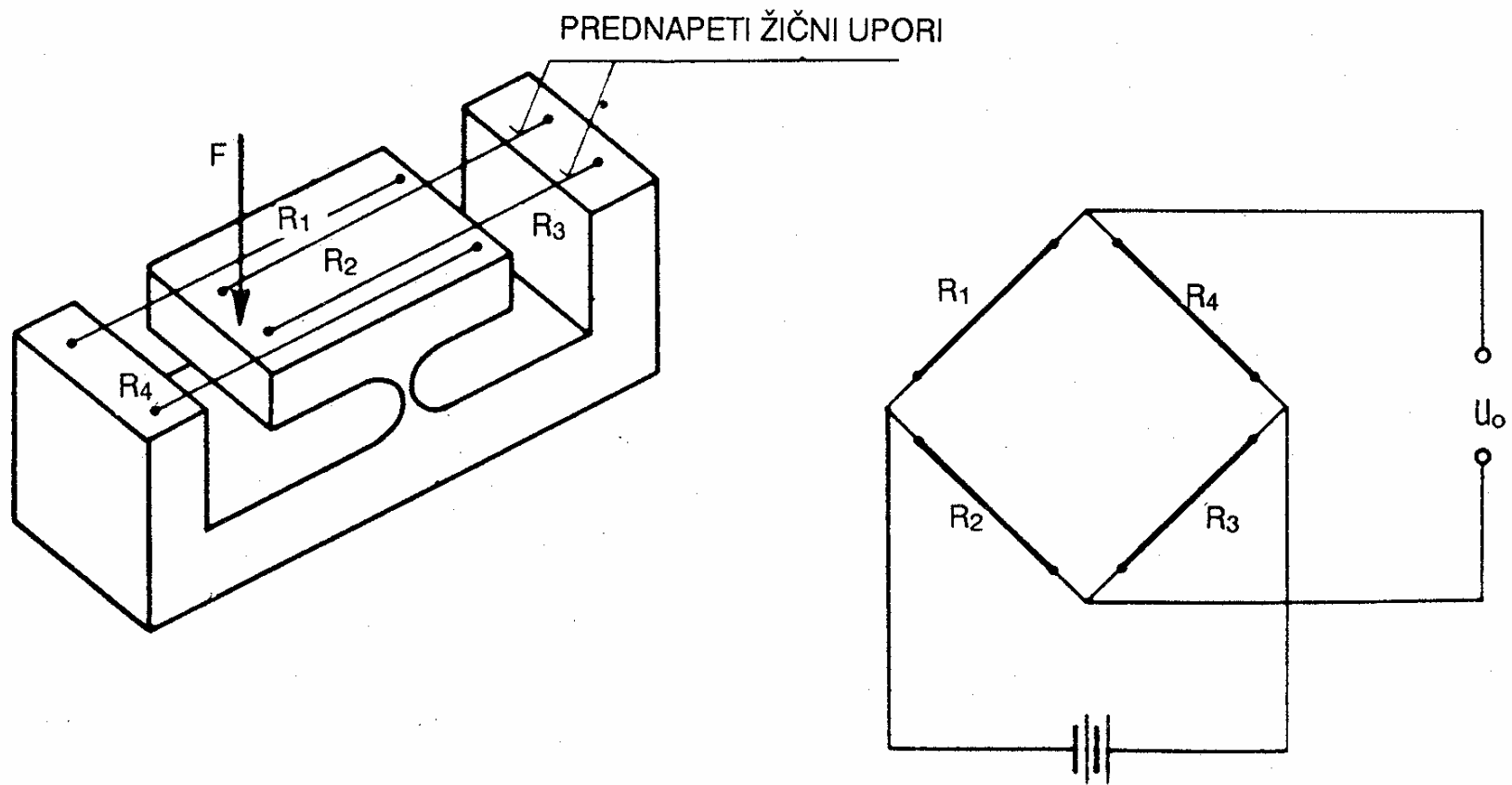
$$U_m = I_m R_m = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} U_n$$

$$\text{Pri } R_2 R_4 = R_1 R_3 \rightarrow \frac{U_m}{U_n} = 0$$

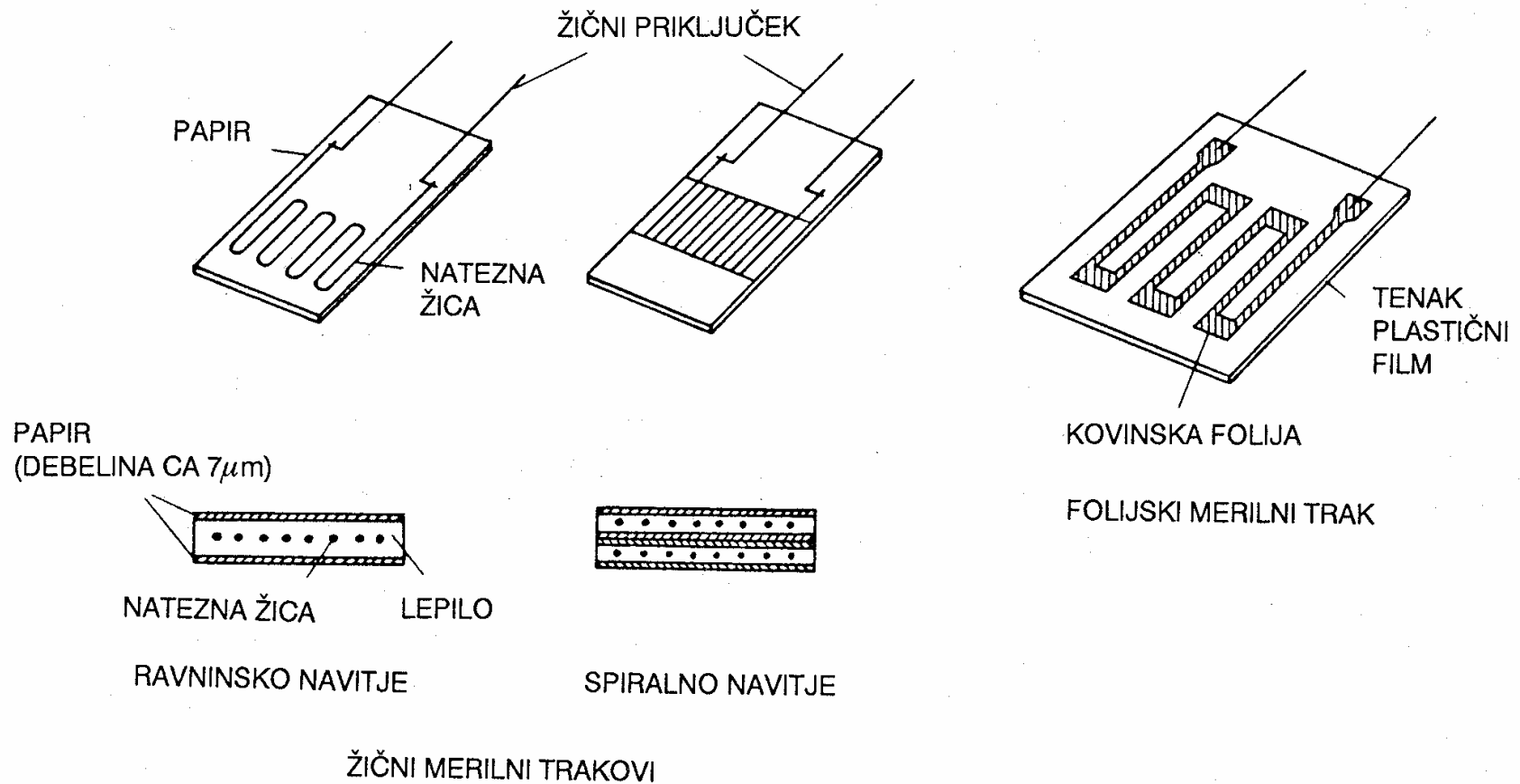
Pri $R_2 = R_3 = R_4 = R$ in $R_1 = R + \Delta R$ ter $\Delta R = KR\varepsilon$

$$\boxed{U_m = \frac{\Delta R}{4R} U_n = \frac{1}{4} K_{MT} U_n \varepsilon = K_S \varepsilon}, \text{ ako raztezamo en merilni listič}$$

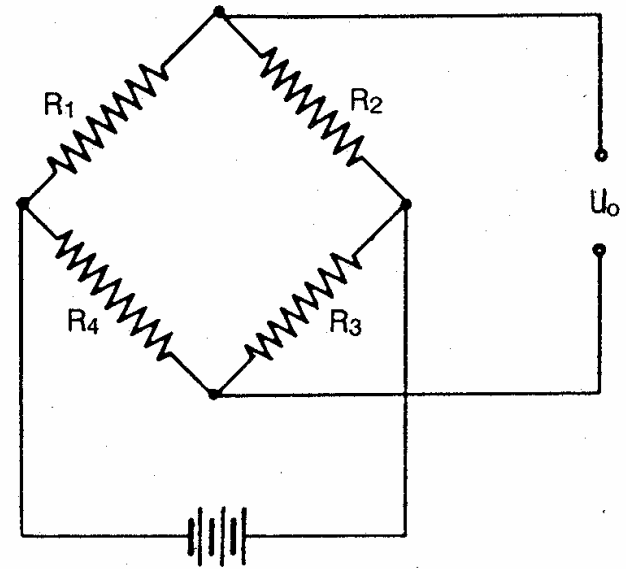
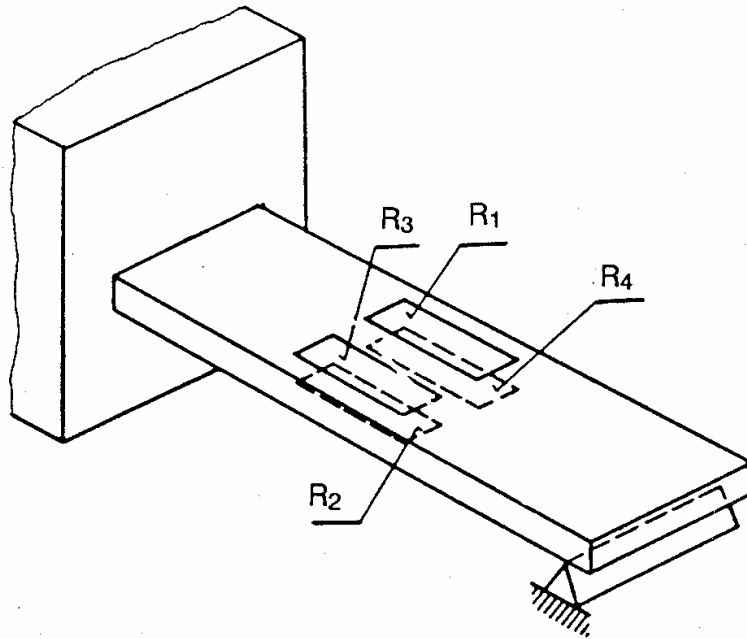
Nevezani merilni trakovi



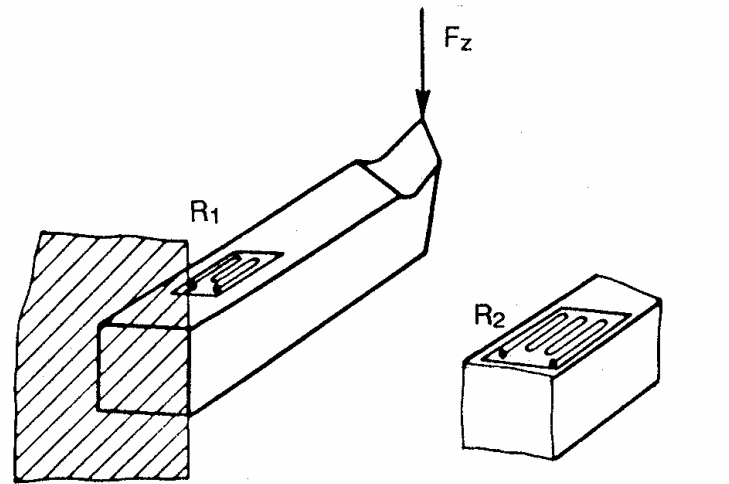
Vežalni merilni trakovi



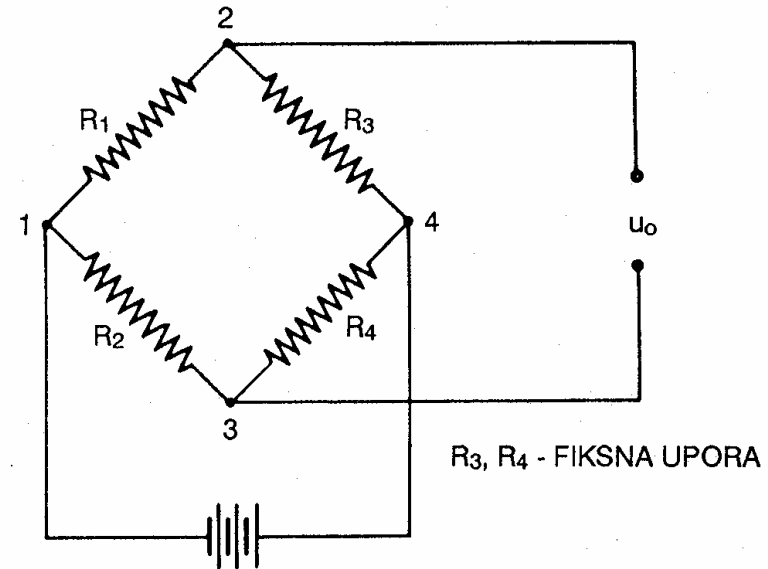
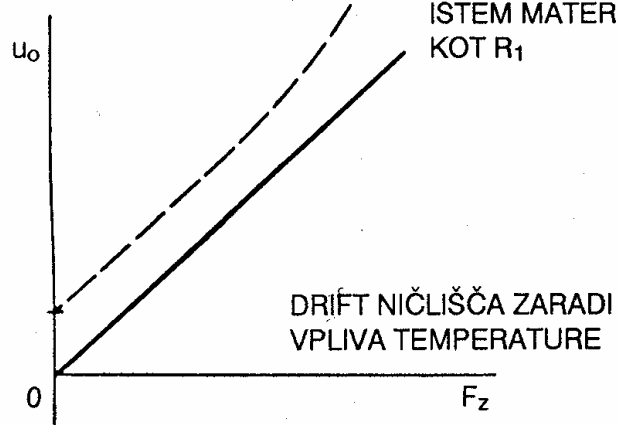
Merjenje deformacij z MT v polnem W-mostiču



Temperaturna kompenzacija merilnega traku

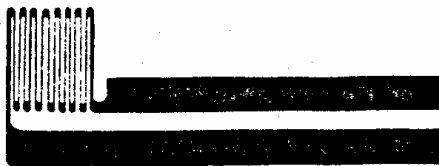


SLEPI HT NA
ISTEM MATERIALU
KOT R_1



Senzor za ugotavljanje napetosti z MT- senzorji

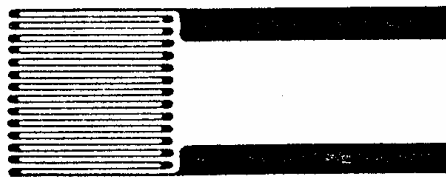
MERILNI TRAKOVI ZA



RADIALNE NAPETOSTI

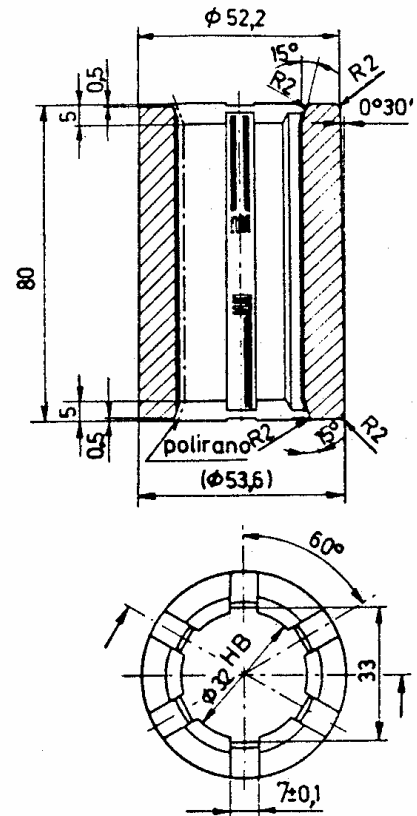


AKSIALNE NAPETOSTI



TANGENCIALNE NAPETOSTI

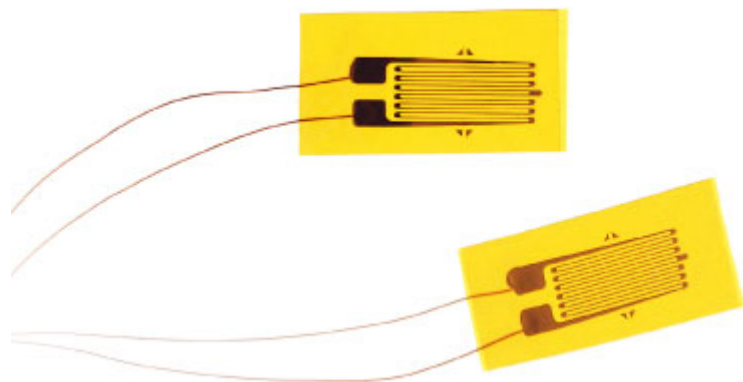
5 mm



MATERIAL: S 6-5-2

HRc 62 ± 1

Merilni trakovi - primer



Termični šum - Johnsonov efekt

termični šum – majhna outputna napetost (μV , mV)

$$U_{T\check{\sigma}} = \sqrt{4k\Theta R\Delta f}$$

k – Boltzmannova konstanta $k = 1.38 \cdot 10^{-16} \text{ erg}/^{\circ}\text{K} = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J}/^{\circ}\text{K}$

Θ – absolutna temperatura $^{\circ}\text{K}$

R – upornost merilnega traku Ω

Δf – širina frekvenčnega pasu osciloskopa Hz

Primer izračuna dinamometra

PROBLEM: kako določiti najmanjši raztezek, ki ga merilni trak še zazna oz.
kako dimenzionirati primarni senzor
obremenitev nosilca je $\sigma = 1000 \text{ N}/\text{cm}^2$

Načrtovanje merilnih trakov (1)

REŠITEV:

izberemo merilni trak: $K_{MT} = 2$

$$R = 120 \Omega$$

maks. dovoljena jakost toka skozi trak $I_{dop} = 30 \text{ mA}$

maks. dovoljena napetost napajanja $U_{IN} = 2 R I_{dop} = 2 \cdot 120 \cdot 0.03 = 7.2 \text{ V}$

$$\text{raztezek } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1000}{2 \cdot 10^7} = 4 \cdot 75 \cdot 10^{-5}$$

Načrtovanje merilnih trakov (2)

Sprememba upornosti ΔR

$$\Delta R = K_{MT} \varepsilon R = 2 \cdot 4.75 \cdot 10^{-5} \cdot 120 = 11.4 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Outputna napetost na Wheatsonovem mostičku

$$U_O = U_{IN} \frac{1}{4R} \Delta R = 7.2 \frac{11.4 \cdot 10^{-3}}{480} = 0.17 \text{mV}$$

Primarni dajalec dimenzioniramo tako, da je razmerje med koristnim signalom in šumom enako

$$\frac{\text{koristni signal}}{\text{šum}} = \frac{U_o}{U_{\delta}} = \frac{10}{1} \text{ do } \frac{6}{1}$$

Načrtovanje merilnih trakov (3)

predpostavimo, da je

$$\begin{aligned}\Delta f &= 100 \text{ kHz} \\ \Theta &= 300 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ R &= 120 \text{ } \Omega\end{aligned}$$

Standardna deviacija napetosti šuma znaša v tem primeru

$$U_{\dot{\sigma}} = \sqrt{4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 120 \cdot 10^5} = 0.45 \mu\text{V}$$

torej velja

$$\frac{U_o}{U_{\dot{\sigma}}} = \frac{170}{0.45} \cong \frac{37.5}{1} \frac{10}{1} \gg \frac{10}{1}.$$

Če bi pa morali izmeriti napetost $\sigma_{\min} = 1 \text{ N/cm}^2$ bi bila $U_o = 0.17 \mu\text{V}$

$$\frac{U_o}{U_{\dot{\sigma}}} = \frac{0.17}{0.45} = \frac{1}{3.75} \ll 1:10 \text{ do } 1:6$$

tedaj bi bil signal v celoti izgubljen.

6.3 Magnetni senzorji

Induktivni senzorji

Delujejo na osnovi:

- spremembe impedance
- spremembe inducirane napetosti

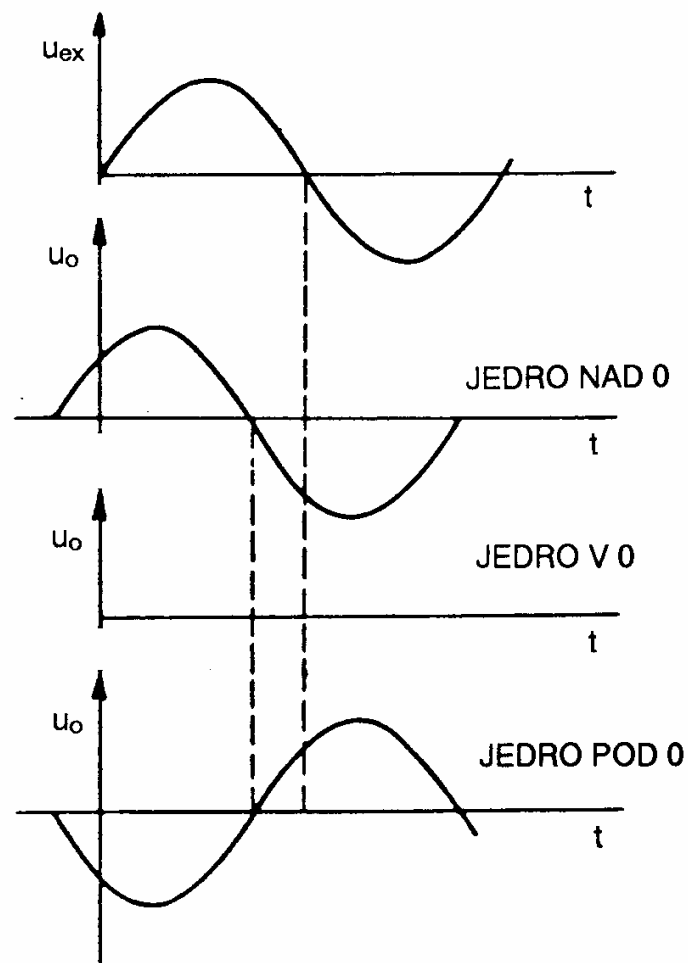
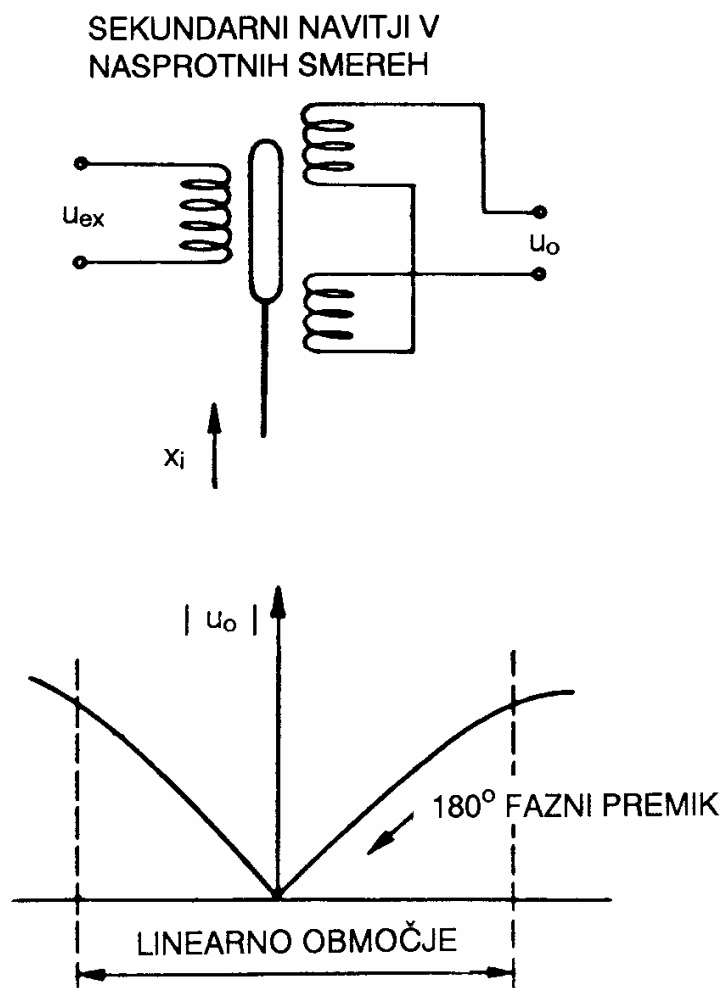
Merilno območje: $X_i = \pm 0,025 \text{ mm}$
 $= \pm 75 \text{ mm}$

Nelinearnost : 0,5% / odklon skale (merilno območje)

Občutljivost : $0,3 \div 15 \text{ mV} / 10^{-3} \text{ mm}$ pri $U_{ex/\sigma} = 3 \div 15 \text{ V}$ pri
Vzbujevalni frekvenci $f_v = 5, 10, 20, 50 \text{ [kHz]}$

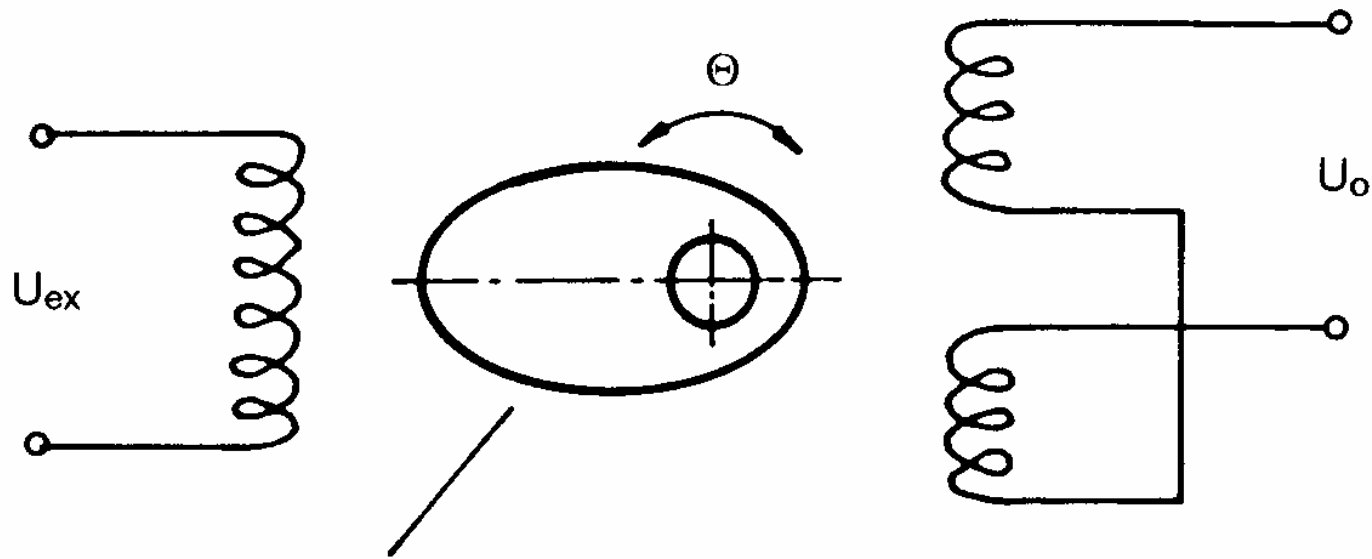
Frekvenčni odgovor: do $f_d = 5000 \text{ Hz}$ pri $f_v = 50 \text{ kHz}$
do $f_d = 2000 \text{ Hz}$ pri $f_v = 20 \text{ kHz}$

Linearni diferencialni transformator (LVDT)



Rotacijski diferencialni transformator (RVDT)

ZASUČNI KOT
 $-40^{\circ} \leq \Theta \leq 40^{\circ}$

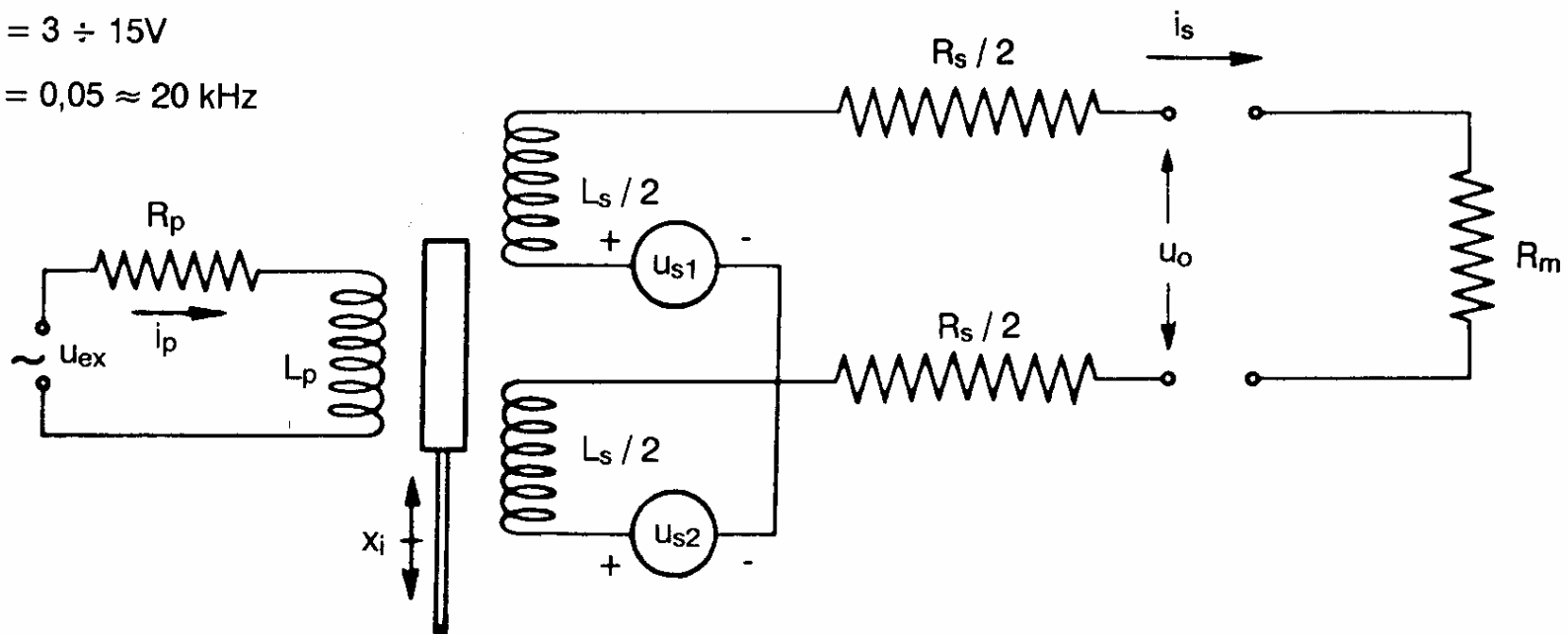


POSEBNO OBLIKOVANA
ŽELEZNA ROTACIJSKA KOTVA

Analiza LVDT (1)

$$\sigma_{U_{ex}} = 3 \div 15V$$

$$f = 0,05 \approx 20 \text{ kHz}$$



Analiza LVDT (2)

Analiza primarnega tokokroga

$$i_p R_p + L_p \frac{di_p}{dt} - U_i = 0$$

Analiza sekundarnega tokokroga

$$U_{s1} = M_1 \frac{di_p}{dt}$$

$$U_{s2} = M_2 \frac{di_p}{dt}$$

kjer sta M_1 in M_2 medsebojni induktanci.

Dejanska napetost na sekundarnem delu je:

$$U_s = U_{s1} - U_{s2} = (M_1 - M_2) \frac{di_p}{dt}$$

$$U_0 = U_s = (M_1 - M_2) \frac{D}{L_p D + R_p} U_i$$

Analiza LVDT (3)

Pri $\tau_p \hat{=} \frac{L_p}{R_p}$ lahko zapišemo tranferno funkcijo LVDT senzorja:

$$\frac{U_o}{U_i}(D) = \frac{[(M_1 - M_2)/R_p] D}{\tau_p D + 1}$$

Frekvenčni odgovor sistema je tako:

$$\frac{U_o}{U_i}(i\omega) = \frac{\omega(M_1 - M_2)/R_p}{\sqrt{(\omega\tau_p)^2 + 1}} \quad \angle\phi \quad \phi = 90^\circ - \tan^{-1} \omega\tau_p$$

Pri tem je premik jedra (merjena pot) proporcionalna $(M_1 - M_2)$.

Analiza LVDT s priključeno merilno napravo

Ako priklopimo voltmeter z vhodno impedanco R_V na sekundarni del, potem steče na sekundarni strani tok i_s . Sledi:

$$i_p R_p + L_p D i_p - (M_1 - M_2) D i_s - U_i = 0$$

$$(M_1 - M_2) D i_p + (R_s + R_V) i_s + L_s D i_s = 0$$

in transferna funkcija:

$$\frac{U_0}{U_i}(D) = \frac{R_V (M_2 - M_1) D}{[(M_1 - M_2)^2 + L_p L_s] D^2 + [L_p (R_s + R_V) + L_s R_p] D + (R_s + R_V) R_p}$$

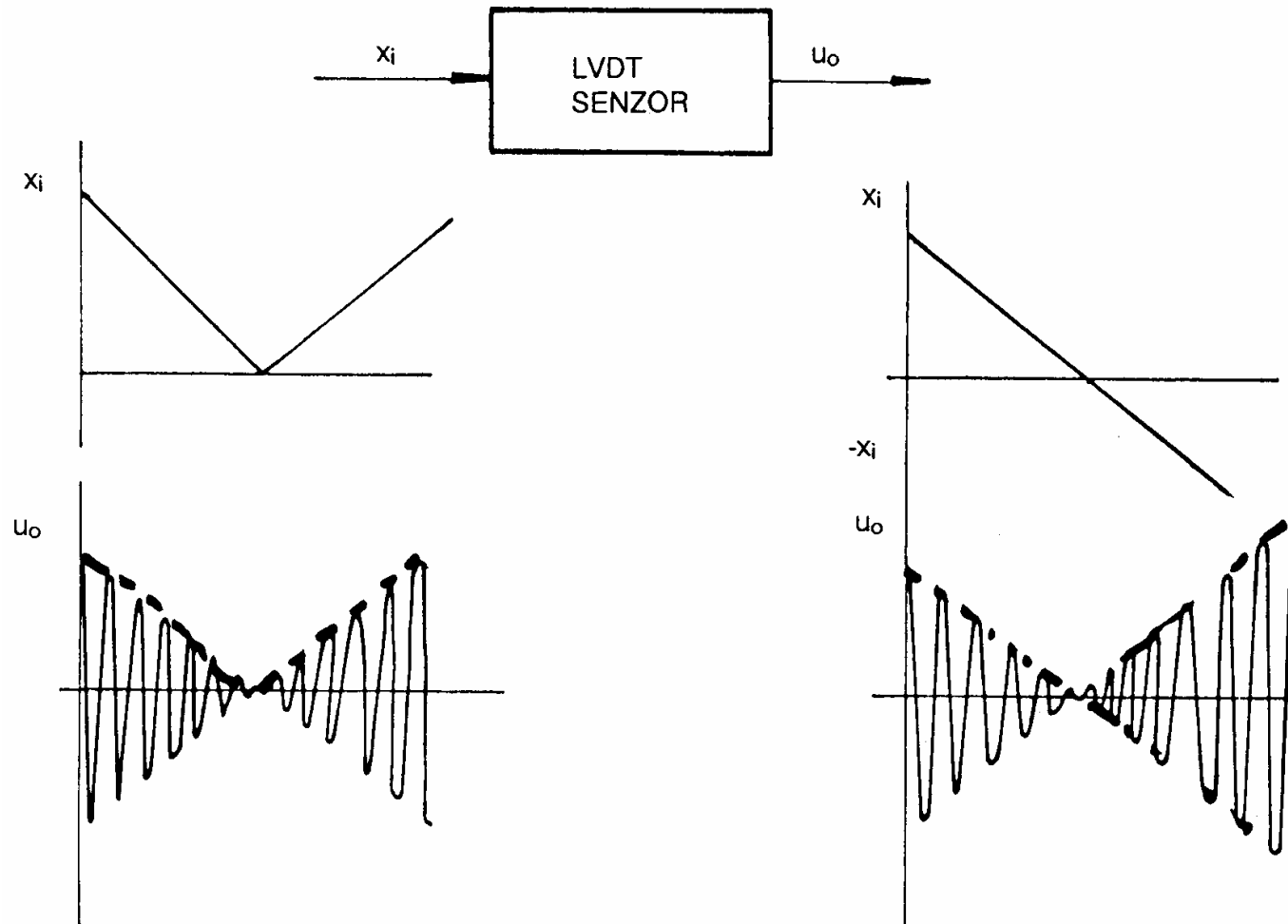
Ako to enačbo delimo z $(R_s + R_V) / R_p$ lahko izrazimo transferno funkcijo LVDT s priključeno merilno napravo:

$$\frac{U_0}{U_i}(D) = \frac{[(M_1 - M_2) / R_p]}{(1 + R_s / R_V)} \cdot \frac{D}{(\tau_p D + 1)(\tau_s D + 1)}$$

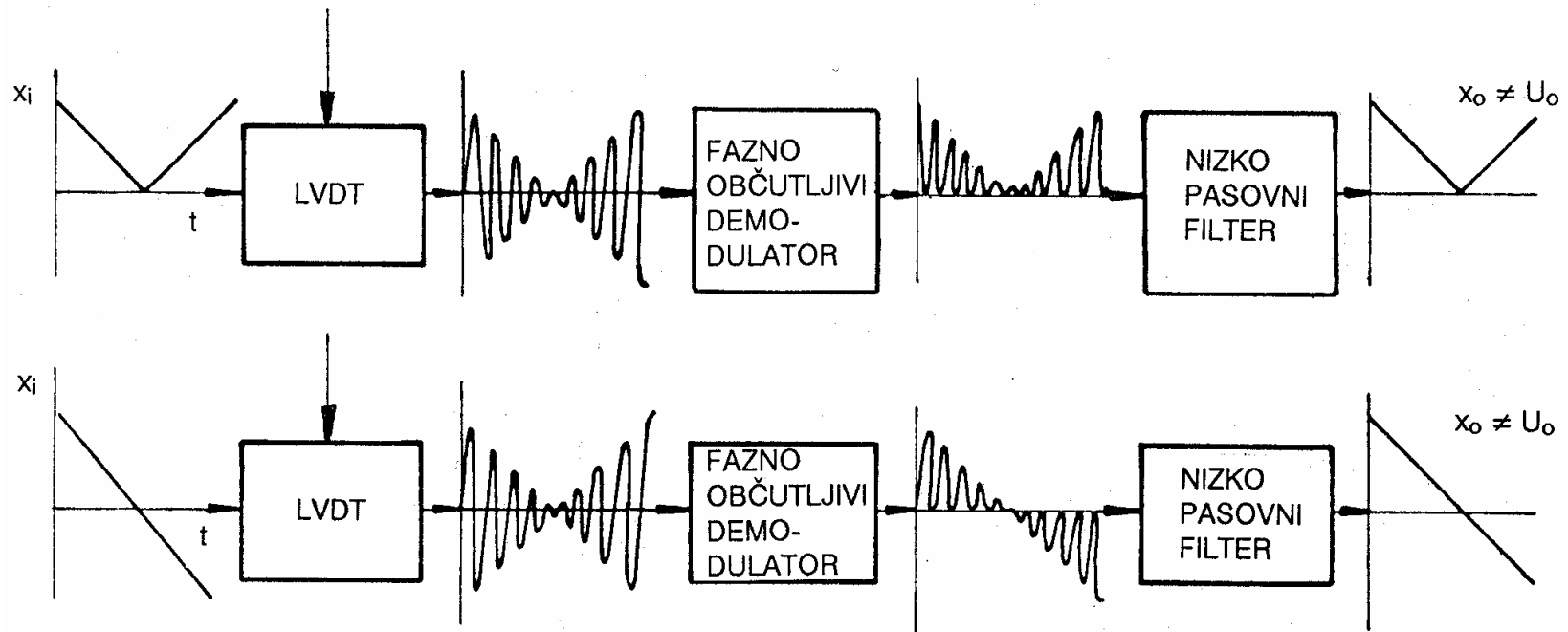
Pri tem smo označili

$$\tau_p \hat{=} \frac{L_p}{R_p}, \quad \tau_s \hat{=} \frac{L_s}{(R_s + R_V)} \quad \text{in privzeli} \quad \frac{(M_1 - M_2)^2}{R_p (R_s + R_V)} \approx 0.$$

Nekorigirani signal na outputu LVDT senzorja



Metoda obdelave signala na outputu iz LVDT



Odziv LVDT sistema (amplitudna modulacija (1))

Poglejmo odziv LVDT sistema v časovnem prostoru

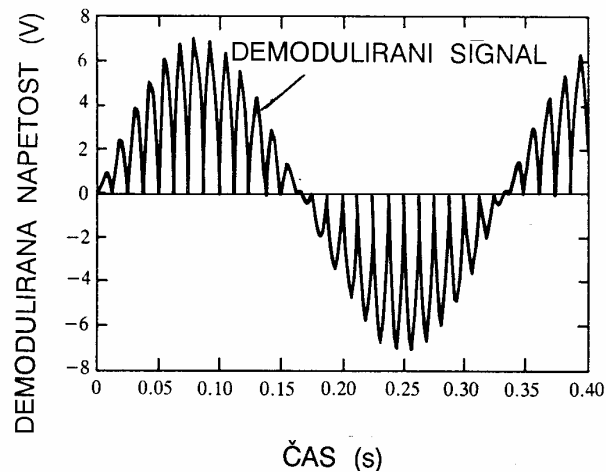
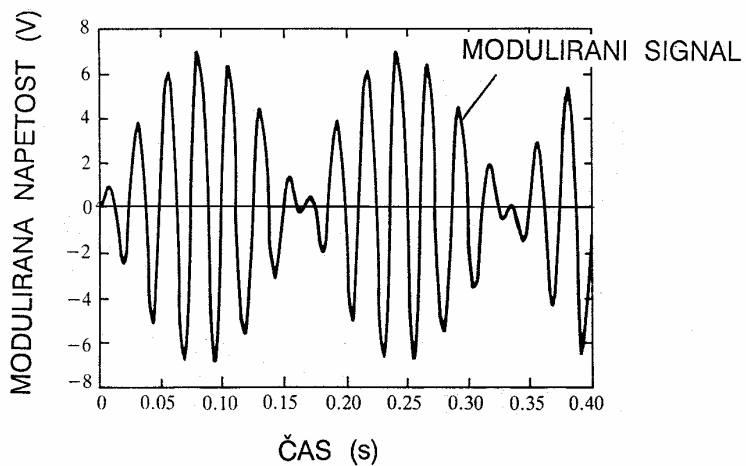
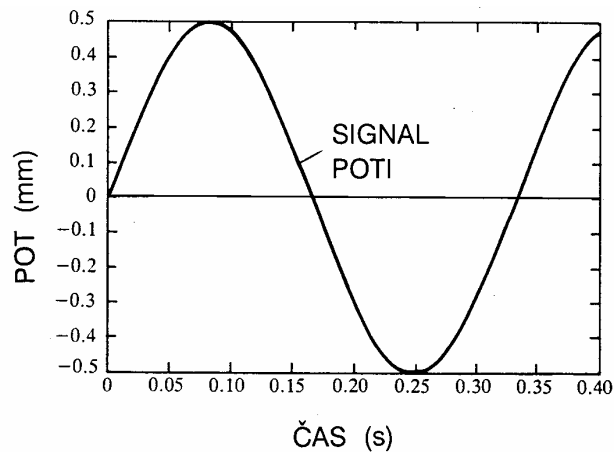
ako je merjena pot $x_i = x_{i0} \sin(\omega_i t)$

in napajalna (nosilna) napetost $U_c = U_{c0} \sin(\omega_c t)$, potem je modulirani signal sledeč:

$$U_M = K_L U_{c0} \sin(\omega_c t) x_{i0} \sin(\omega_i t) = K_L U_{c0} x_{i0} \sin(\omega_c t) \sin(\omega_i t) = \\ \frac{1}{2} K_L U_{c0} x_{i0} [\cos((\omega_c - \omega_i)t) - \cos((\omega_c + \omega_i)t)]$$

Pri tem smo označili $K_L = [(M_1 - M_2) / R_p]$.

Potek pretvorbe signala pri merjenju z LVDT (amplitudna modulacija)



Odziv LVDT sistema (amplitudna modulacija (2))

Modulirani signal je:

$$U_M = K_L x_{i0} \sin(\omega_i t) U_{co} \sin(\omega_c t)$$

in fazno občutljivi demodulirani signal: $U_o = K_L x_{i0} \sin(\omega_i t) |U_{co} \sin(\omega_c t)|$

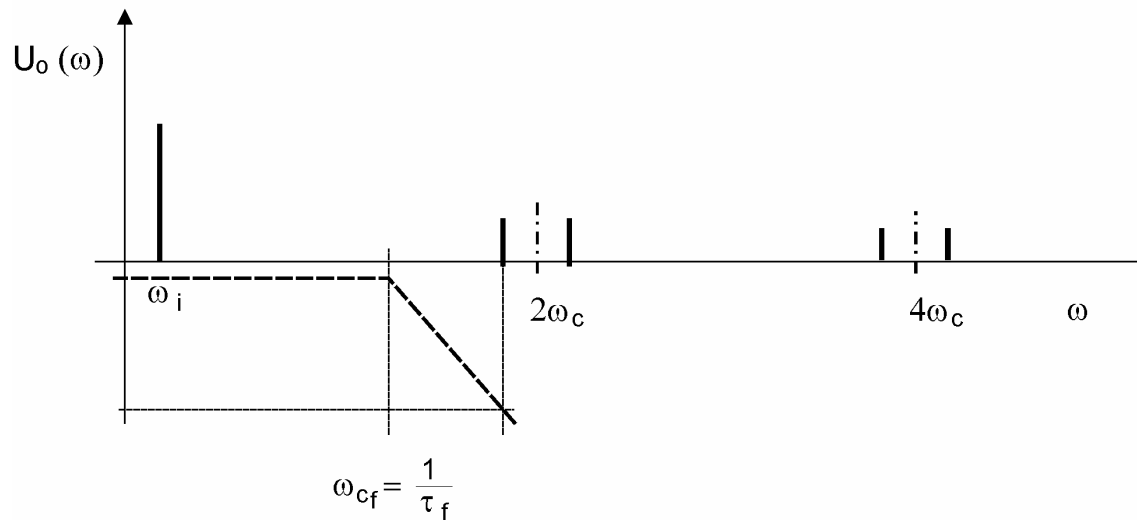
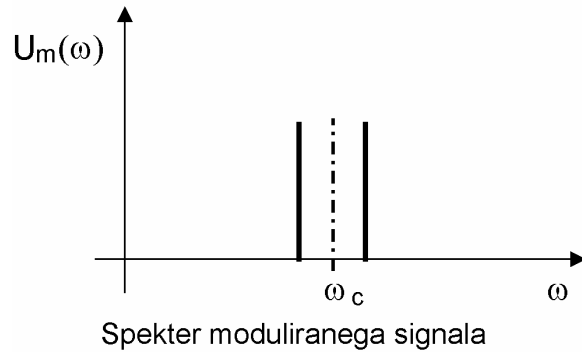
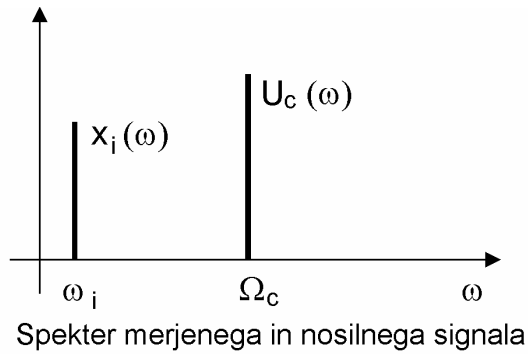
Ker je $|U_{co} \sin(\omega_c t)|$ periodična funkcija jo lahko izrazimo s Fourierjevo vrsto:

$$|U_{co} \sin(\omega_c t)| = \frac{2U_{co}}{\pi} \left(1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega_c t - \frac{2}{15} \cos 4\omega_c t + \dots + \frac{2}{1-4n^2} \cos 2n\omega_c t \right)$$

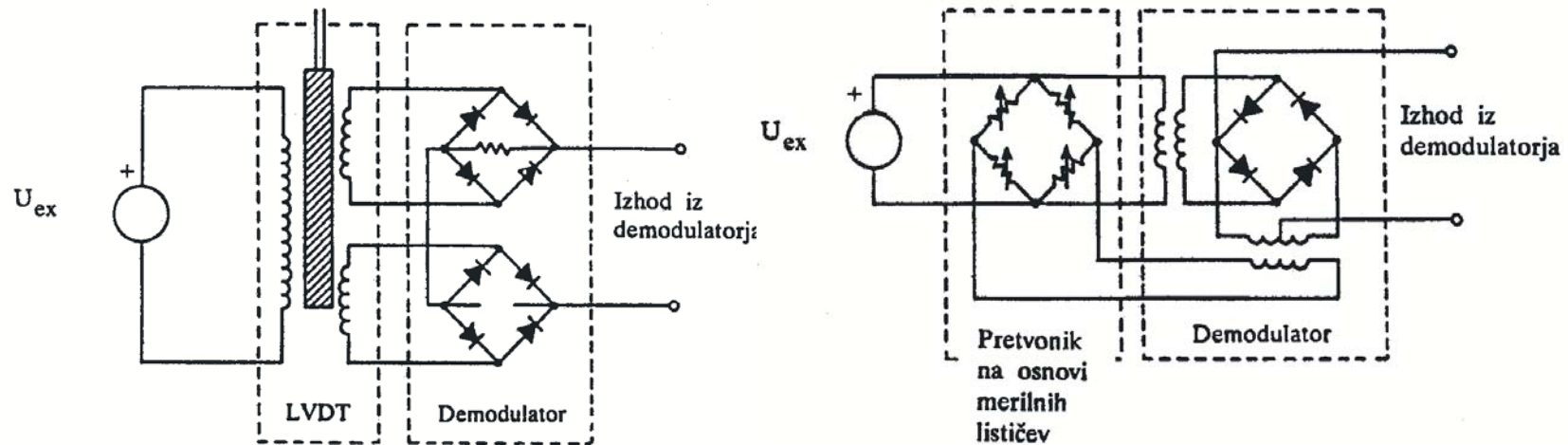
Sledi fazno občutljivi demodulirani signal:

$$U_o = \frac{2K_L x_{i0} U_{co}}{\pi} \sin \omega_i t - \frac{2K_L x_{i0} U_{co}}{3\pi} [\sin(2\omega_c + \omega_i)t - \sin(2\omega_c - \omega_i)t] - \dots$$

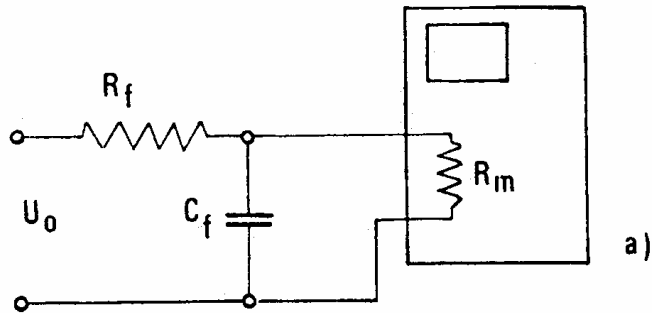
Odziv LVDT sistema v frekvenčnem prostoru (amplitudna modulacija (3))



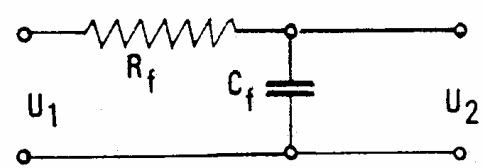
Struktura demodulatorja za senzorje vrste LVDT in merilnih trakov



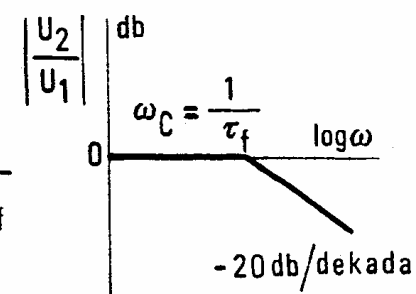
Frekvenčni odgovor RC in (RC)² filtrov



ENOJNI RC-FILTER

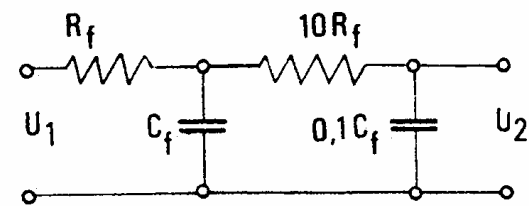


$$\frac{U_2}{U_1}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega R_f C_f}$$

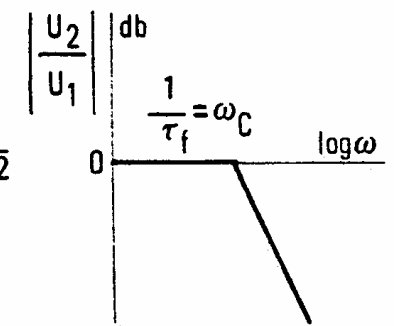


b)

DVOJNI RC-FILTER



$$\frac{U_2}{U_1}(j\omega) = \frac{1}{(1 + j\omega R_f C_f)^2}$$



c)

Primer izračuna konstante filtra τ_f (1)

Vhodni signal x_i niha z max frekvenco $f_i = 1\text{kHz}$,

napajanje LVDt z $f_c = 10\text{kHz}$,

Frekvence po modulaciji signala leže med 19 in 21 kHz, $f_m = 19 \div 21\text{ kHz}$

Dovoljen padec amplitude izhodnega signala $u_2 * 5\%$

Časovna konstanta enojnega filtra τ_f

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{1}{\sqrt{(2\pi f \tau_f)^2 + 1}} \text{ ali } 0,05 = \frac{1}{\sqrt{(2\pi \cdot 19000 \cdot \tau_f)^2 + 1}}$$

sledi izračun $\tau_f = 0,00017\text{ sek.}$

Časovna konstanta dvojnega RC-filtra

$$0,05 = \frac{1}{(2\pi \cdot 19\,000 \tau_f)^2 + 1} \quad \text{sledi} \quad \tau_f = 0,000037\text{ sek.}$$

Primer izračuna konstante filtra τ_f (2)

Iz τ_f izračunamo vrednost za R_f in C_f z upoštevanjem R_m

tipična upornost (impedanca) osciloskopa znaša

$$R_m = 10^6 \Omega$$

Impedanca prehodnega elementa

$$10 R_f = 10^5 \Omega \quad \text{in} \quad R_f = 10^4 \Omega.$$

Ker velja, da je $\tau_f = R_f \cdot C_f$ sledi

$$C_f = \frac{37 \cdot 10^{-6}}{10^4} = 0,0037 \mu\text{F}.$$

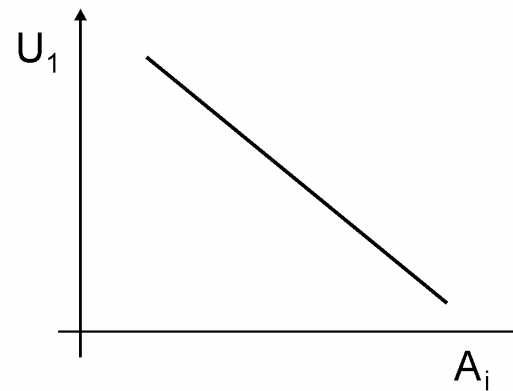
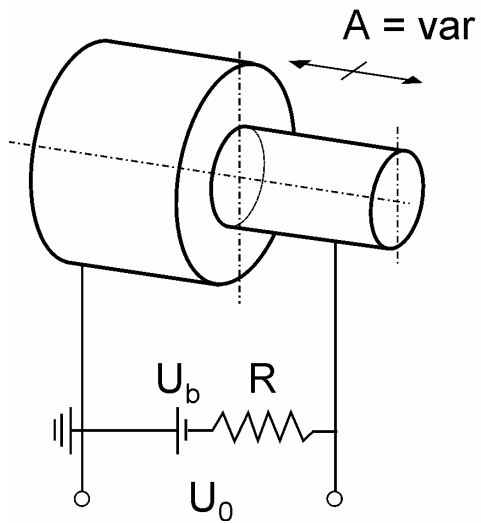
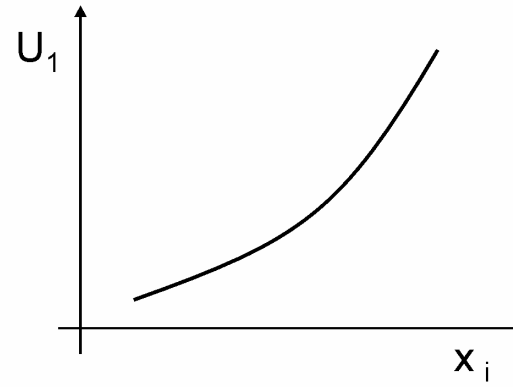
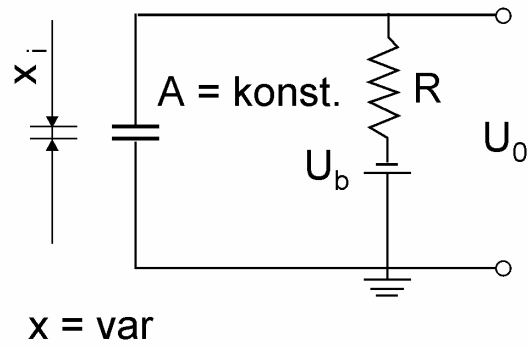
Če je največja frekvenca inputnega signala x_i enaka $f_i = 1\text{kHz}$, potem so

	RC	$(RC)^2$
amplitudno razmerje	0,68	0,98
fazni kot	- 47°	- 13°

6.4 Kapacitivni in piezo senzorji

Kapacitivni senzorji (1)

Izvedbi:



Kapacitivni senzorji (2)

$$U_1 = U_0 - U_b$$

$$X_i = X - X_0$$

konstrukcijski podatki

$$C \leq 200 \text{ pF}$$

$$x_0 = 0.2 \div 0.3 \text{ mm}$$

PREDNOSTI :

enostavna izvedba

zanemarljiv mehanski obremenilni efekt, velika občutljivost

SLABOSTI:

občutljivost na vlago

šumne napetosti zaradi visoke impedance senzorja – zato zelo visoka

impedanca naslednjih elektronskih enot

občutljivost na položaj povezovalnih kablov

Kapacitivni senzorji (3) Primer

PRIMER:

pri tipični kapacitivnosti kondenzatorja $C = 22.5 \text{ pF}$,
(npr. pri $x_0 = 0.25 \text{ mm}$, dielektriku zraku ter $A = 6.25 \text{ cm}^2$)

znaša impedanca pri $\omega = 10 \text{ kHz}$, $Z_c(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} = 708 \text{ 000 } \Omega$

Kapacitivni senzorji (4) Izračun (1)

množina elektrenine

$$Q = C \cdot U_0$$

kapacitivnost kondenzatorja:

$$C = f(x, A, \varepsilon)$$

$$C = K \frac{A}{x}$$

ε - dielektrična konstanta ($K = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$; $\varepsilon=1$ in $\varepsilon_0=1$ za vakuum)

K – konstanta, ki zavisi od materiala (dielektrika) med ploščama

Občutljivost senzorja je

$$\frac{dC}{dx} = -K \frac{A}{x^2} = -\frac{C}{x} \rightarrow \frac{dC}{C} = -\frac{dx}{x}$$

Kapacitivni senzorji (5) Izračun (2)

input predstavlja spremembo poti oz. razdaljo med ploščama

$$x_i = x - x_0$$

pri dimenzioniranju velja (zaradi nelinearne karakteristike)

$$\frac{x_i}{x_0} < 0.1$$

če je $x_0 =$ konstanta je

$$U_0 = U_b$$

z zmanjšanjem x_0 za iznos x_i dobimo

$$U_1 = U_0 - U_b$$

Kapacitivni senzorji (6)

Izračun (3) / Transferna funkcija kondenzatorja

iz analize tokokroga izračunamo TF senzorja (sistem 1. reda, pri predpostavki linearne karakteristike okoli operacijske točke)

$$\frac{U_1}{X_i}(D) = \frac{K_c \tau D}{1 + \tau D}$$

Pri tem smo označili $K_c = \frac{U_b}{X_0}$ V/mm (ojačanje)

$$\tau = K \frac{AR}{X_0} = C \cdot R \quad (\text{časovna konstanta C-sezorja})$$

$$K = 0.225 \cdot 10^{-12} \text{ F / inch} = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2 = 0.0885 \text{ pF / cm}$$

op.: $F = C/V$

Kapacitivni senzori Frekvenčni odgovor (1)

Iz TF izhaja frekvenčni odgovor senzorja

$$\frac{U_1}{X_i}(j\omega) = \frac{K_c \tau j\omega}{1 + \tau j\omega}.$$

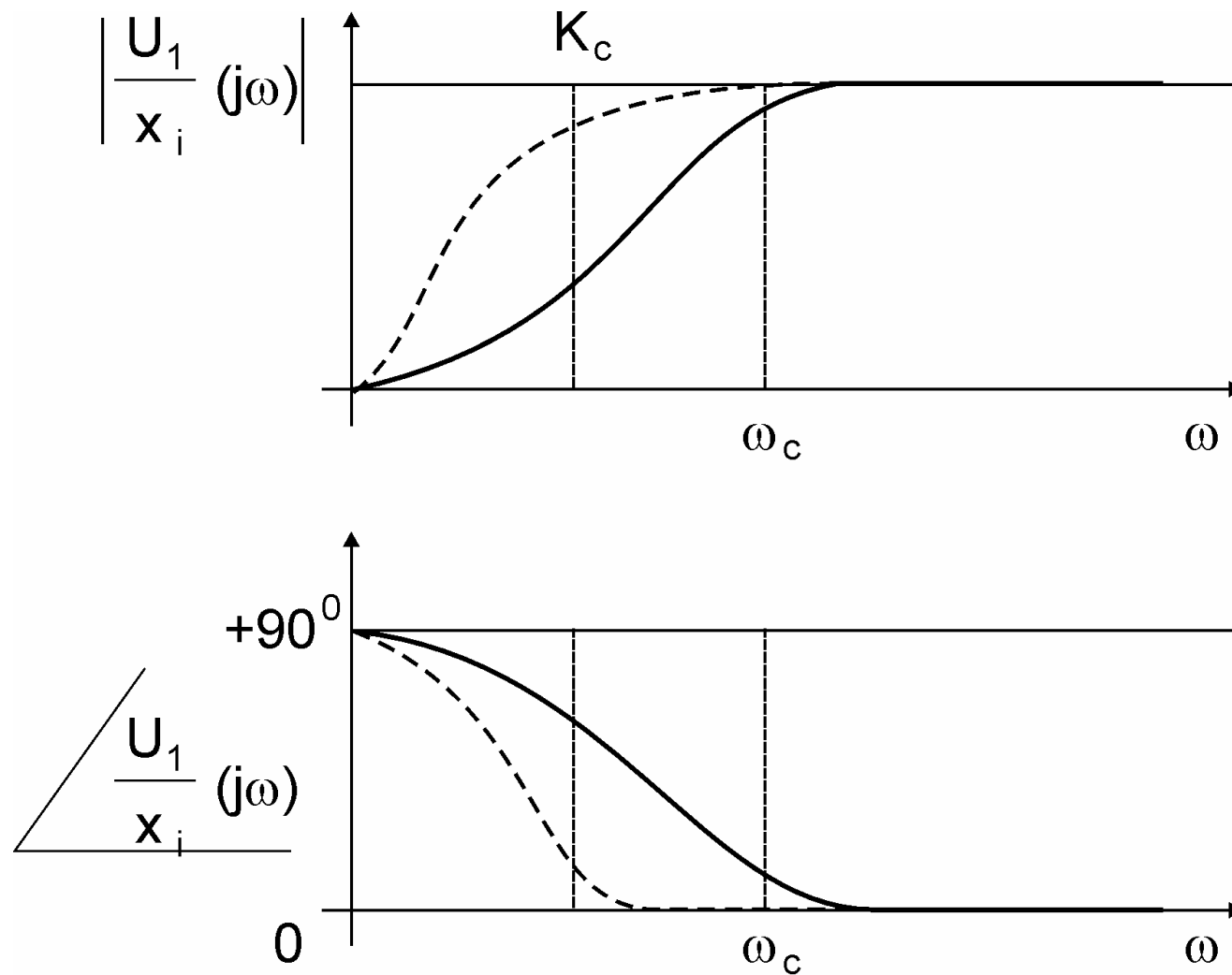
Če je izpolnjen pogoj $\tau \omega \gg 1$

potem velja

$$\frac{U_1}{X_i}(j\omega) \approx K_c$$

kar pomeni, da je senzor primeren le za merjenje v višjem frekvenčnem področju (skladno s pogojem $\tau \omega \gg 1$).

Kapacitivni senzori Frekvenčni odgovor (2)



Kapacitivni senzorji Frekvenčni odgovor (3)

za merjenje signalov z nižjimi frekvencami (ker moramo zadostiti pogoju)

$$\omega \tau \gg 1$$

moramo povečati časovno konstanto $\tau = RC$.

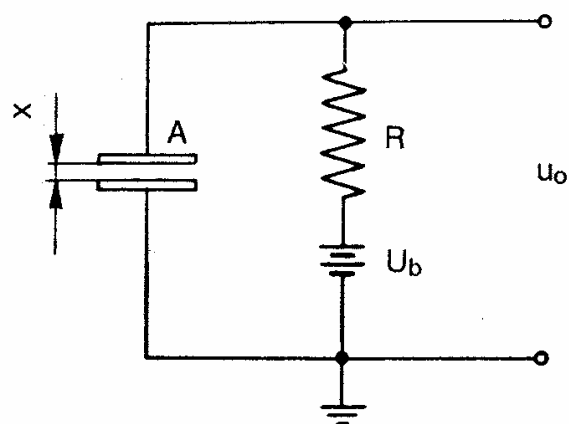
Za dan C-senzor je C približno konstantna vrednost

x_0 = konstantna vrednost

τ spremenimo le s spremembo R

$R = 10^6 \Omega$ ali več (!!! velika outputna impedanca sistema).

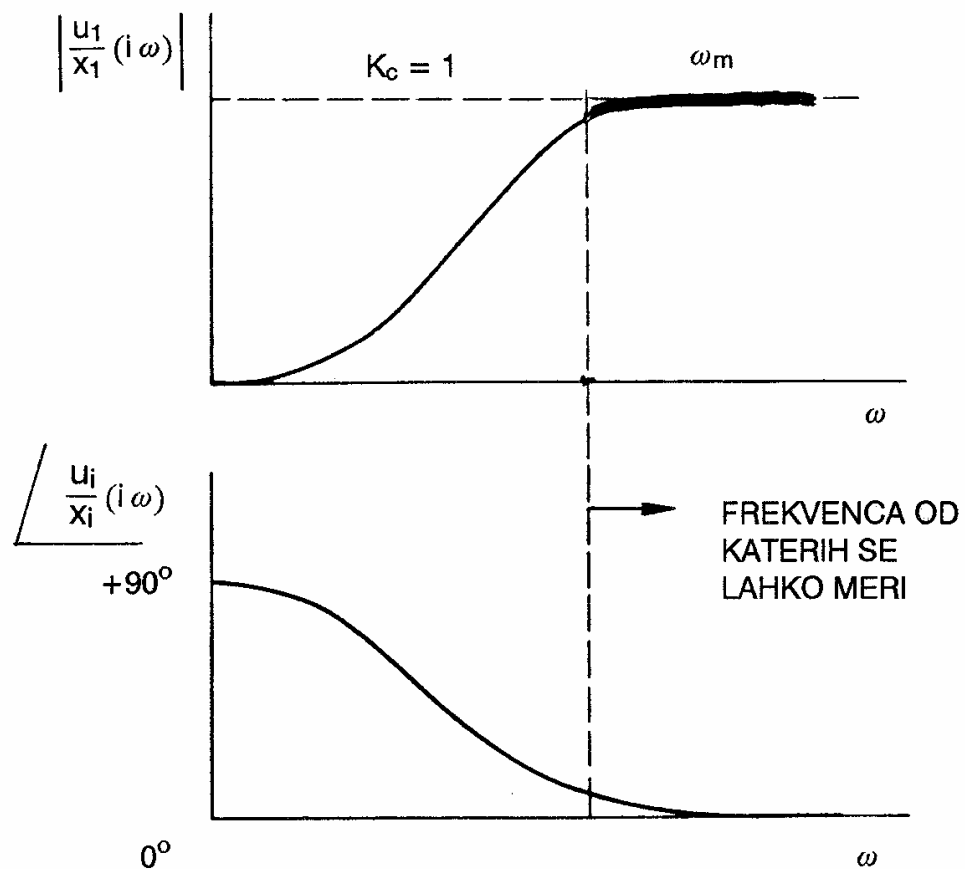
Vezava in dinamična lastnost kapacitivnega senzorja



$$u_1 \triangleq u_o - U_b$$

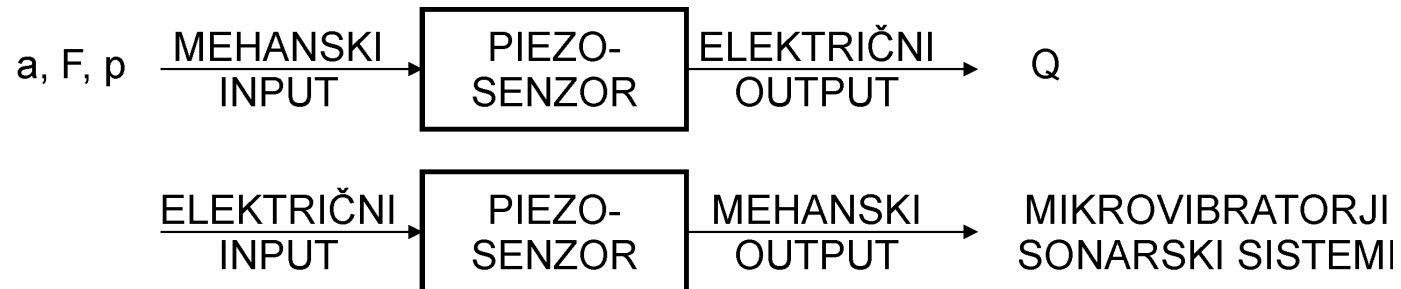
$$x_1 \triangleq x - x_0$$

$$\frac{x_1}{x_0} < 0,1 \text{ MALI PREMIKI}$$



Piezoelektrični senzorji (1)

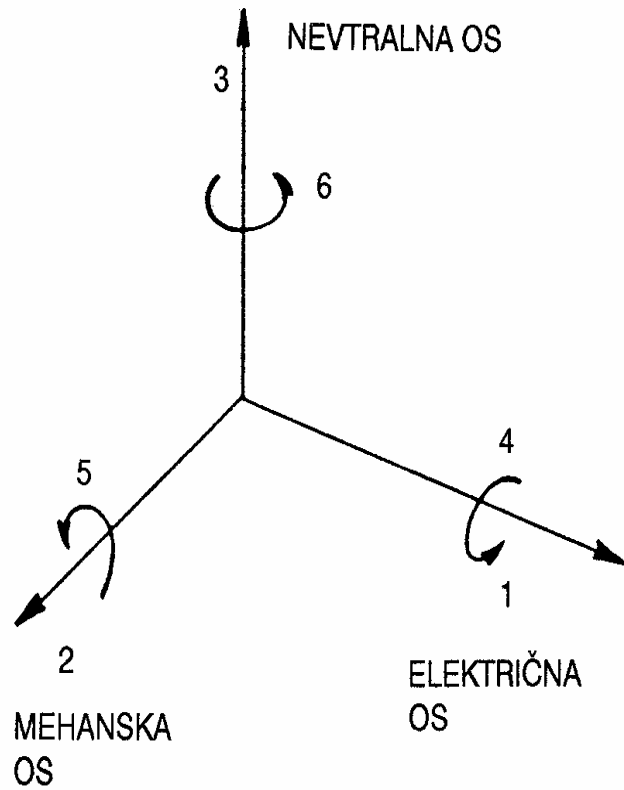
Pri spremembi napetostnega stanja v določenih materialih se spremenijo njihove električne lastnosti. Generira se količina elektenine in obratno.



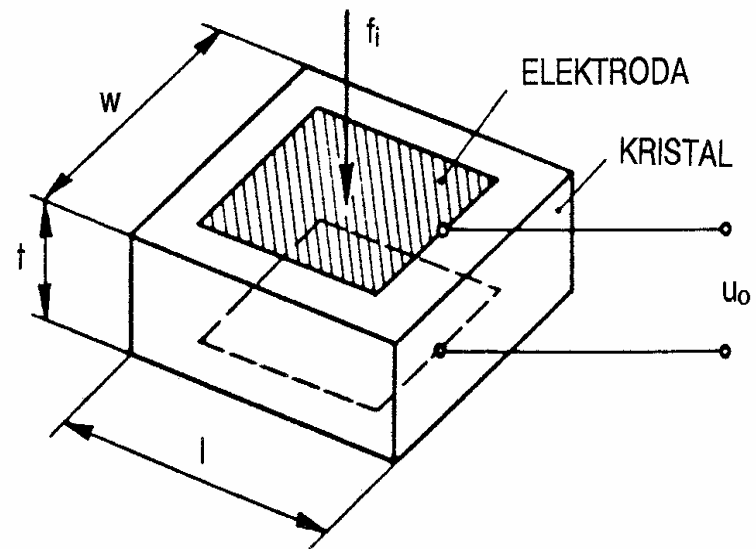
Materiali:

1. SKUPINA NARAVNI MATERIALI	<ul style="list-style-type: none">- KREMENČEV KRISTAL $E = 8,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$- ROCHELLOVA SOL
2. SKUPINA SINTETIČNI MATERIALI	<ul style="list-style-type: none">- LITIJEV SULFAT- AMONIJEV DIHIDROGENI FOSFAT- POLARIZIRANA FEROELEKTRIČNA KERAMIKA- BARIJEV TITANAT $E = 8,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Piezelektrični senzorji (2)

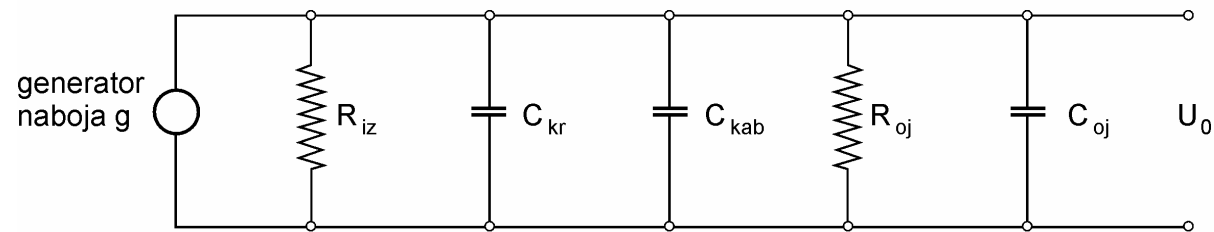
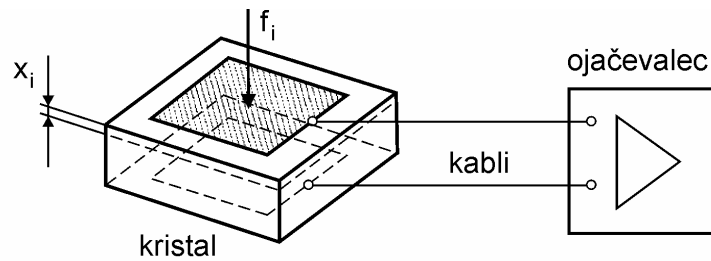


a)

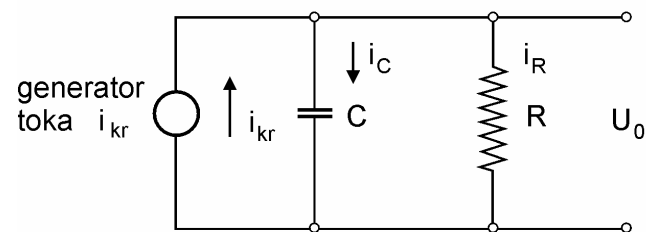


b)

Piezelektrični senzorji (3)



$$q = K_q \cdot x_i$$



$$i_{kr} = \frac{dq}{dt} = K_q \cdot \dot{x}_i$$

pri piezelektričnih senzorjih upoštevamo dve vrsti konstant
 g- konstante
 in
 d- konstante

Piezoelektrični senzorji (4)

za piezoelektrične materiale npr. barijev titanat je pomembna konstanta g , konkretno g_{33}

$$g_{33} \propto \frac{\text{polje generirano v smer 3}}{\text{napetost generirano v smer 3}}$$

$$g_{33} \propto \frac{U_0 / t}{f_i / w l}$$

f_i – sila (sprememba)

če poznamo g_{33} in t izračunamo za napetost $f_i / w l$ outputno napetost U_0

g – vrednosti :

$$\text{za kremenčev kristal } g_{33} = 50 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$$

$$\text{za barijev titanat } g_{33} = 12 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$$

Piezoelektrični senzorji (5)

d – konstanta je definirana

$$d_{33} \propto \frac{\text{naboj generiran v smeri 3}}{\text{sila v smeri 3}} = \frac{Q}{f_i}$$

pri znani dielektrični konstanti ε materiala je $C = \varepsilon \frac{wl}{t}$

$$g_{33} \propto \frac{\text{polje}}{\text{napetost}} = \frac{U_0 wl}{t f_i} = \frac{U_0 C}{\varepsilon f_i} = \frac{Q}{\varepsilon f_i} = \frac{d_{33}}{\varepsilon}$$

torej velja

$$d_{33} = \varepsilon g_{33}$$

dielektrična konstanta:

za kremenčev kristal $\varepsilon = 4.6 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$

za barijev titanat $\varepsilon = 1.25 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$

Analiza tokokroga piezoelektričnega sensorja (1)

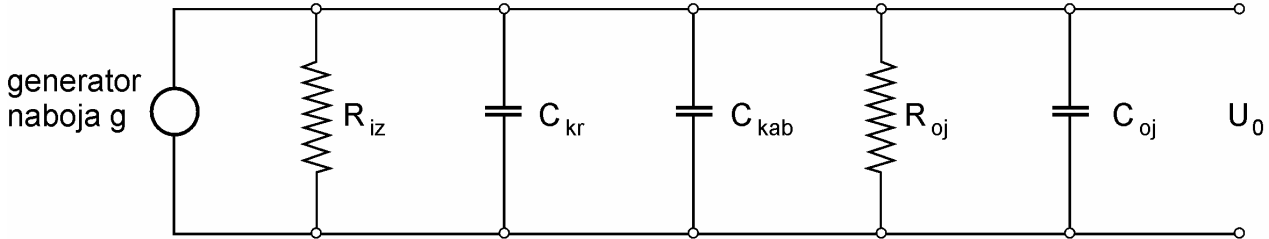
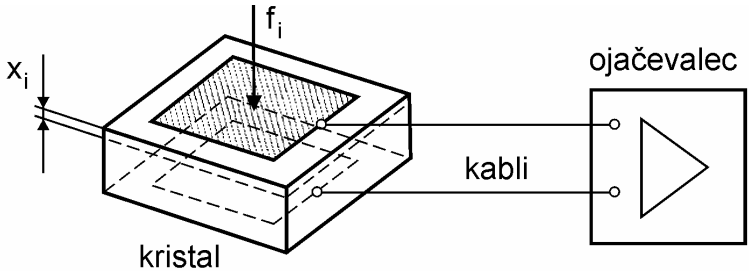
Naboj, ki ga generira sila f_i oz. deformacija x_i kristala je

$$q = K_q \cdot x_i$$

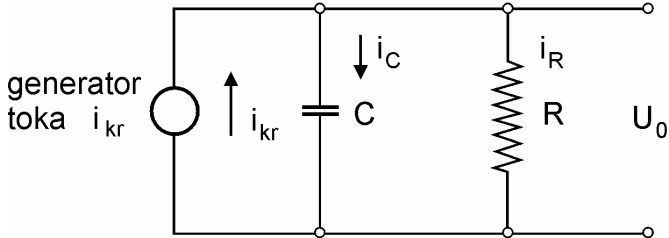
K_q – konstanta kristala, C/cm

x_i – deformacija, cm

Analiza tokokroga piezoelektričnega sensorja (2)

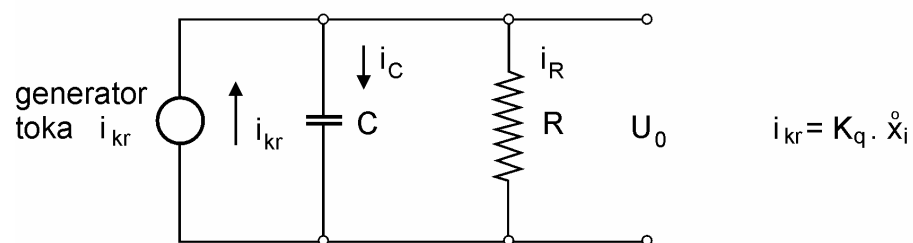
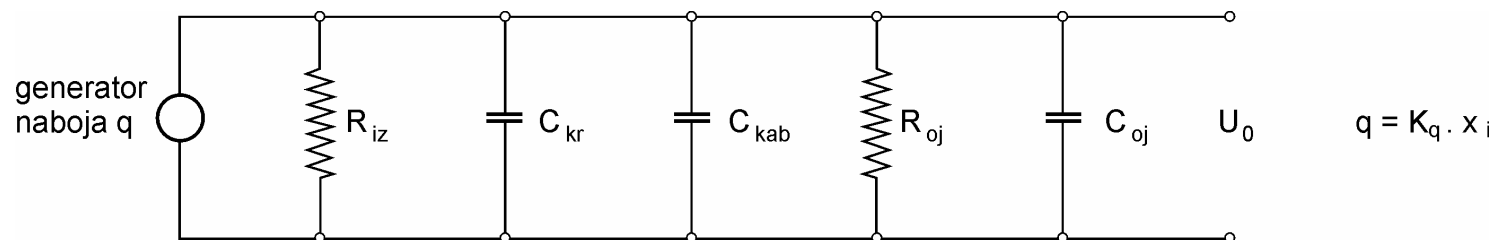


$$q = K_q \cdot x_i$$



$$i_{kr} = \frac{dq}{dt} = K_q \cdot \dot{x}_i$$

Analiza tokokroga piezoelektričnega sensorja (3)



Upornosti in kapacitivnosti lahko združujemo (glej sliko) in spremenimo generator naboja v generator toka. Pri tem je:

$$R \propto \frac{R_{oj} \cdot R_{iz}}{R_{oj} + R_{iz}} \approx R_{oj}$$

$$C \propto C_{kr} + C_{kab} + C_{oj}$$

Analiza tokokroga piezoelektričnega sensorja (4)

zato velja

$$i_{kr} = \frac{dq}{dt} = K_q \left(\frac{dx_i}{dt} \right)$$

zapišemo lahko

$$i_{kr} = i_C + i_R$$

$$U_0 = \frac{\int i_C dt}{C} = \frac{\int (i_{kr} - i_R) dt}{C}$$

$$C \left(\frac{dU_0}{dt} \right) = i_{kr} - i_R = K_q \underbrace{\left(\frac{dx_i}{dt} \right)}_{i_{kr}} - \underbrace{\frac{U_0}{R}}_{i_R}$$

Analiza tokokroga piezoelektričnega senzorja (5)

$$U_0 \left(\frac{1}{RC} + D \right) = \frac{K_q}{C} \cdot Dx_i$$

iz tega izraza sledi transferna funkcija piezoelektričnega senzorja

$$\frac{U_0}{x_i}(D) = K_p \frac{\tau D}{1 + \tau D}$$

K_p – občutljivost

$$K_p = \frac{K_q}{C} \text{ [V/cm]}$$

τ - časovna konstanta

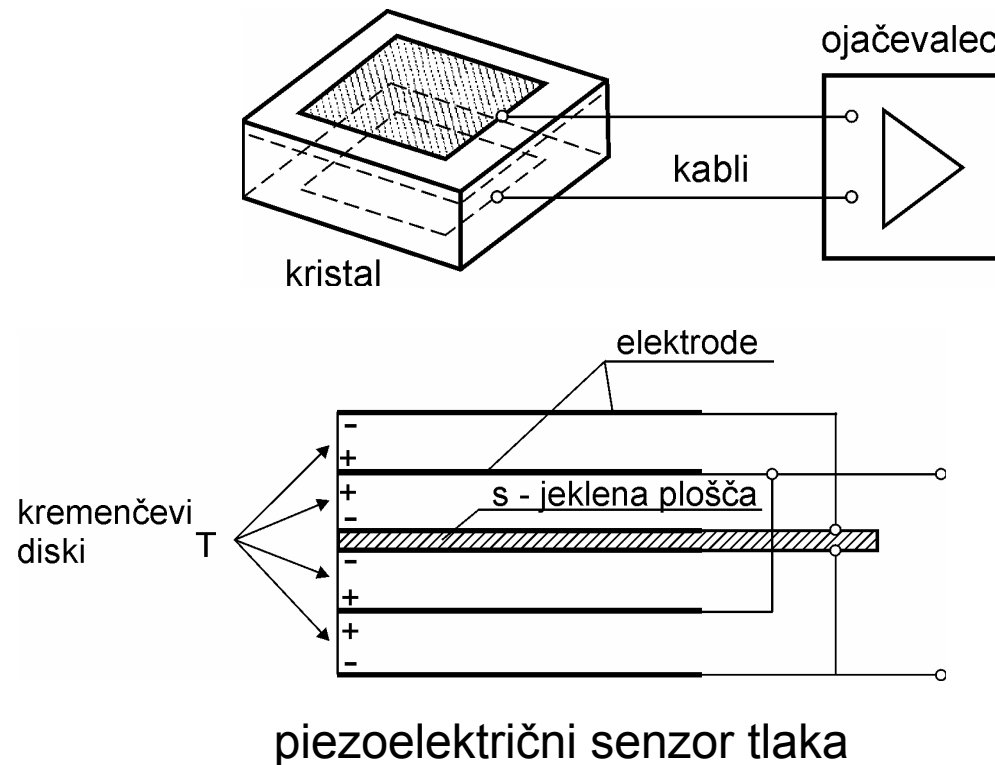
$$\tau = R C \text{ [s]}$$

Časovna konstanta piezo-kristala

časovno konstanto piezo kristala izračunamo takole

$$\tau \propto (R_{oj} + R_s) C$$

$$C \propto C_{kr} + C_{kab}$$



Frekvenčni odgovor (1)

Frekvenčni odgovor:

$$\frac{U_1(D)}{X_i} = K_p \frac{\tau D}{1 + \tau D} \rightarrow \left| \frac{U_0(j\omega)}{X_i} \right| = K_p \cdot \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

za ploski frekvenčni odgovor v okviru 5 % odstopanj mora biti frekvenca merjenega signala ω višja.

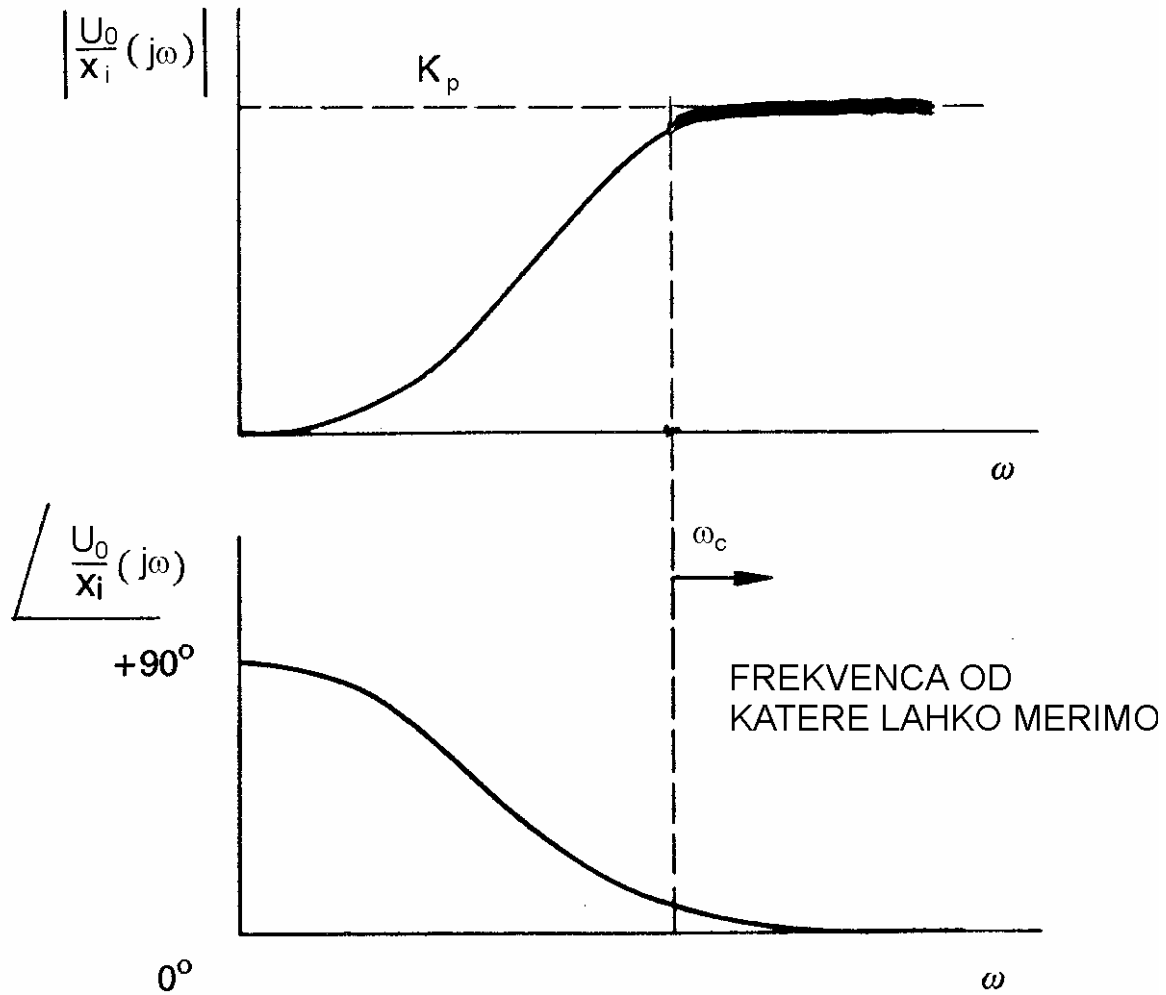
To vrednost izračunamo takole

$$0.95^2 = \frac{(\omega_1 \tau)^2}{(\omega_1 \tau)^2 + 1}$$

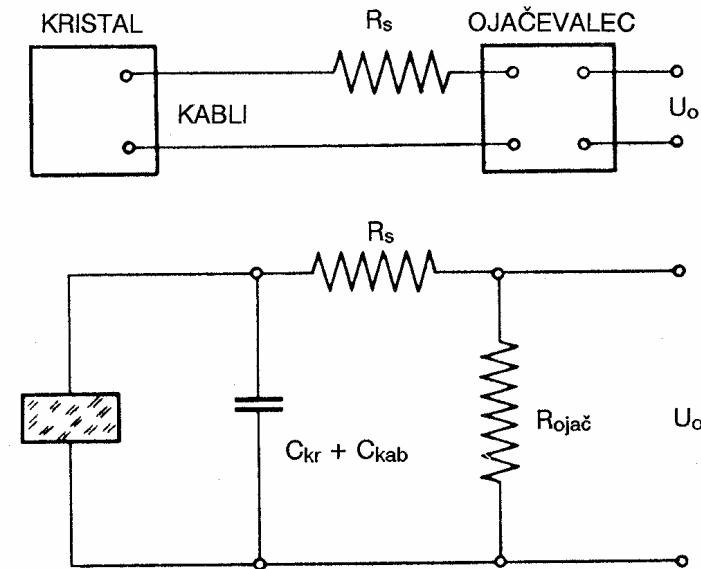
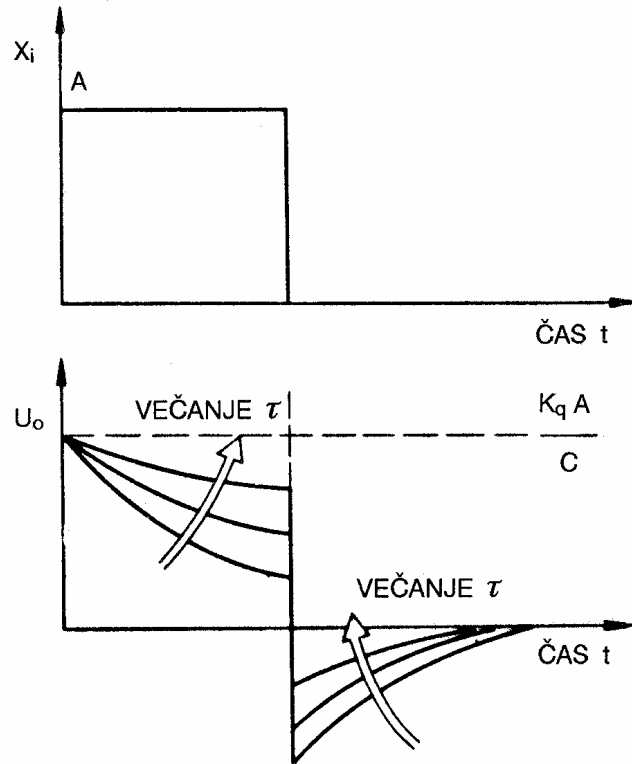
$$\omega_1 = \frac{3.04}{\tau}$$

pri velikih vrednostih τ dobimo dovolj dober odgovor že pri nizkih ω (npr. do 1rd/s).

Frekvenčni odgovor (2)



Pulzni odgovor piezoelektričnega sensorja (1)



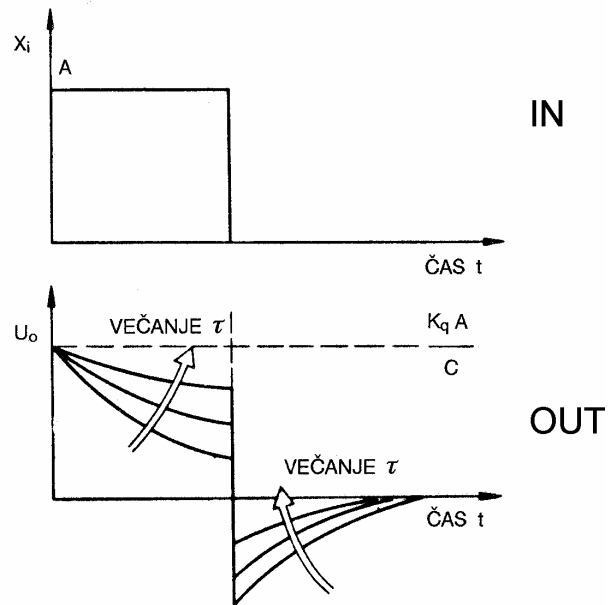
$$K_p = \frac{K_q}{C} \left(\frac{R_{ojač}}{R_{ojač} + R_s} \right)$$

$$\tau = (R_{ojač} + R_s) C$$

$$C = C_{kr} + C_{kab}$$

Pulzni odgovor piezoelektričnega sensorja (2)

pulzni odgovor piezoelektričnega sensorja



diferencialna enačba je

$$(\tau D + 1) U_0 = (K_p \tau D) x_i$$

ker je $x_i = 0$ pri $-\infty < t < 0$

Pulzni odgovor piezoelektričnega senzorja (3)

$$\text{velja } (\tau D + 1)U_0 = 0$$

pri $t = 0^+ \rightarrow x_i = A$, ki povzroči nenadni odgovor

$$U_0 = \frac{K_q A}{C} \quad \text{pri } t = 0^+$$

rešitev diferencialne enačbe z upoštevanjem začetnih pogojev

$$U_0 = \frac{K_q A}{C} e^{-t/\tau} \quad 0 < t < T \quad \text{ta enačba velja do } t = T$$

pri $T < t < \infty$ je rešitev diferencialne enačbe

$$(\tau D + 1)U_0 = 0 \quad \text{pri } t = T^-$$

$$\text{enaka } U_0 = \frac{K_q A}{C} e^{-T/\tau}$$

Pulzni odgovor piezoelektričnega senzorja (4)

pri $t = T$ se x_i nenadoma zmanjša za A , kar povzroči nenaden padec naboja

pri $t = T^+$ je

$$U_0 = \frac{K_q A}{C} (e^{-T/\tau} - 1)$$

to pa odgovarja začetnemu pogoju

za diferencialno enačbo $(\tau D + 1)U_0 = 0$ pri $T < t < \infty$

rešitev je v tem primeru $U_0 = \frac{K_q A}{C} (e^{-T/\tau} - 1) e^{-(t-T)/\tau}$

Slika pulznega odgovora prikazuje potek odgovora za tri različne časovne konstante τ .

Za 5 % odstopanje od ploskega odgovora mora biti izpolnjen pogoj $\tau \geq 20T$

Primerjava kapacitivnega in piezoelektričnega senzorja

KONDENZATOR	PIEZOELEKTRIČNI SENZOR
$\frac{U_1}{x_i}(D) = \frac{K_c \tau D}{\tau D + 1}$	$\frac{U_0}{x_i}(D) = \frac{K_p \tau D}{\tau D + 1}$
$K_c = \frac{U_b}{x_0}$	$K_p = K_q / C$
$\tau = K \cdot 10^{-12} \cdot \frac{AR}{x_0}$	$K_q - \text{konstanta coul/mm}$
$\tau = RC$	$\tau = RC = (R_{oj} + R_s) C$
$k = 0.0885 \text{ [pF/cm]}$	$t > 20 T$
merilno območje:	$R_{oj} + R_s > 10^{14} \Omega$
$x_i = 1.0 \text{ mm}$	merilno območje
$A = 11000 \text{ mm}^2$	$\delta = x_i = 0 \div 10 \mu\text{m}$
za x_i : $\omega_0 \approx 40 \text{ kHz}$	$\omega_0 = 0 \div 50 \text{ kHz}$
za A: $\omega_0 \approx 4 \text{ KHz}$	
(xi) nelinearnost: velika	
(A) linearnost dobra > 0.05 %	

6.5 Merjenje hitrosti

Senzorji za merjenje hitrosti

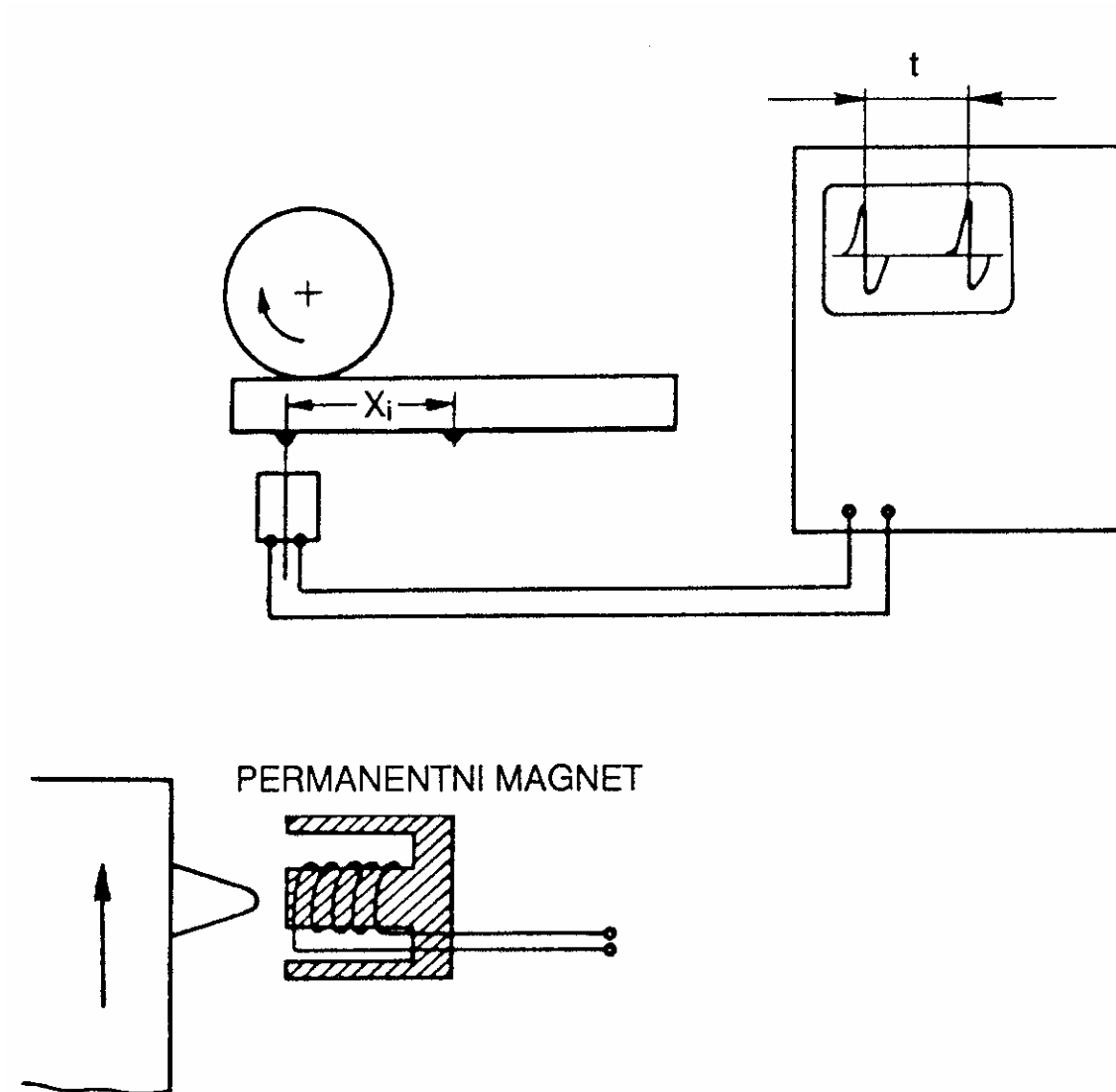
translacijska hitrost $v = \frac{dx}{dt}$

rotacijska hitrost $\omega = \frac{d\Theta}{dt}$

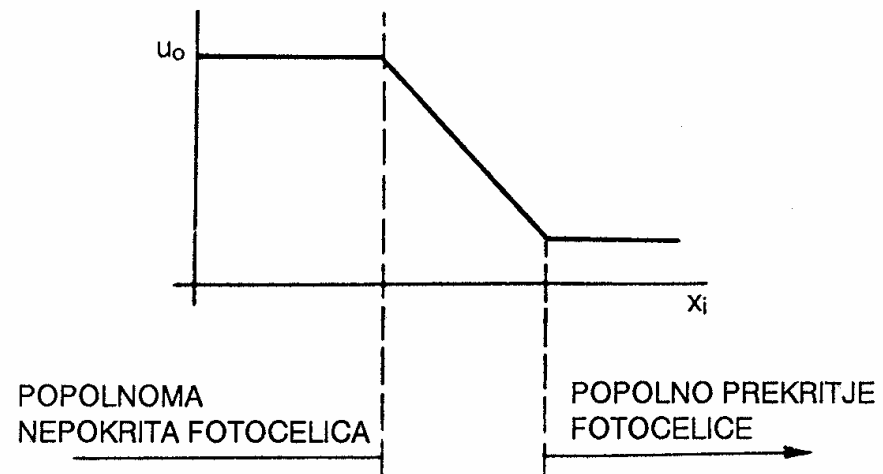
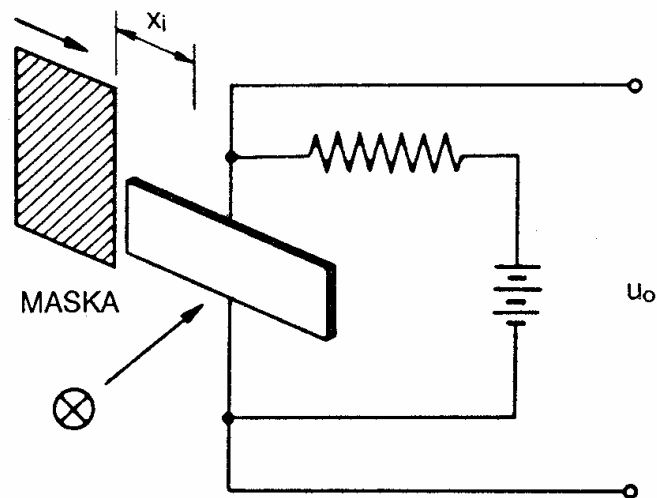
Metode:

- istočasno merjenje x in t
- induktivni senzor (Faradejev zakon indukcije)
- mehanski števc
- šteje impulsov
- DC in AC tahogeneratorji
- stroboskop
- lasersko merjenje (doplerjev efekt)
- merjenje poti in diferenciranje signala poti
- merjenje pospeškov in integracija signala pospeška

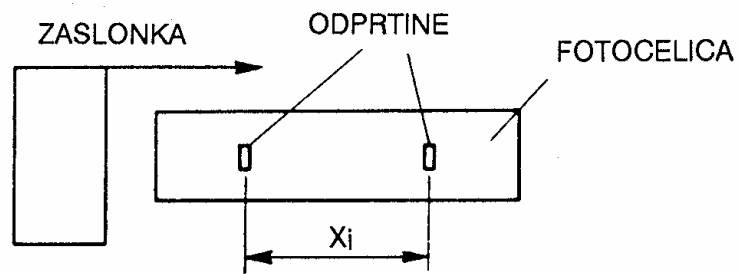
Merjenje hitrosti kot iznos $\Delta x / \Delta t$



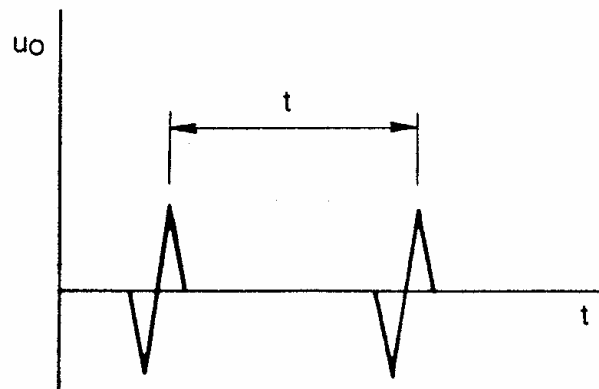
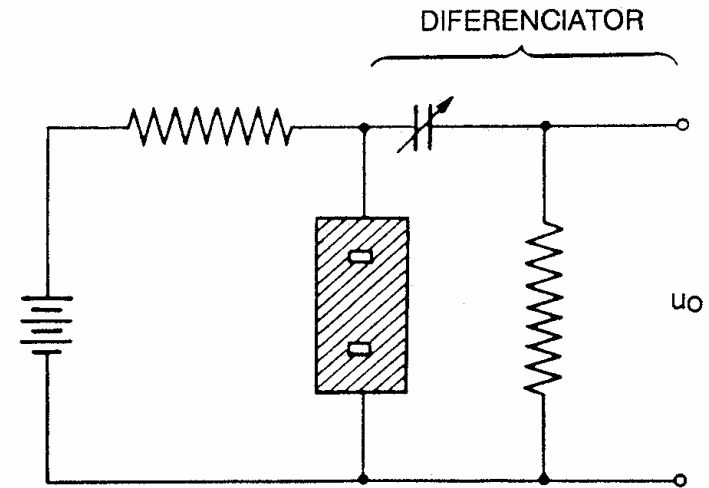
Merjenje hitrosti s fotocelico



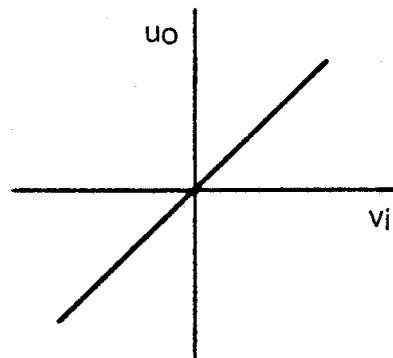
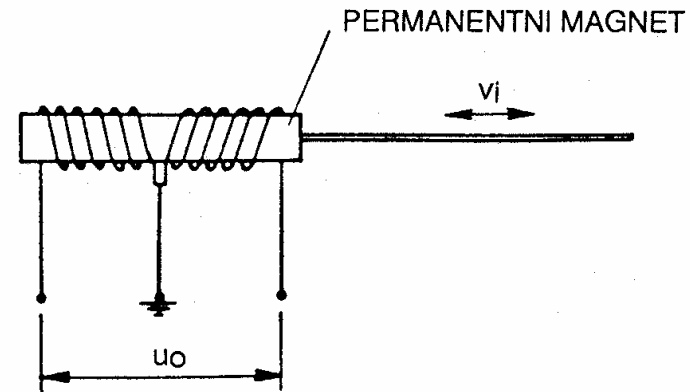
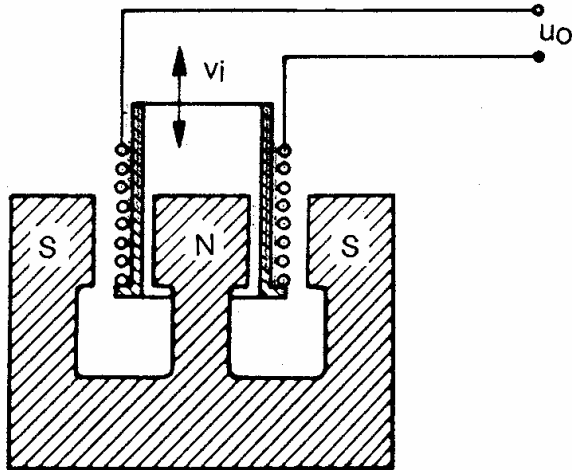
Merjenje hitrosti z zastrto fotocelico



$$v = \frac{x_i}{t}$$



Hitrostni induktivni senzor



MO: 10 – 250 mm

$B = 10^5$ Gauss

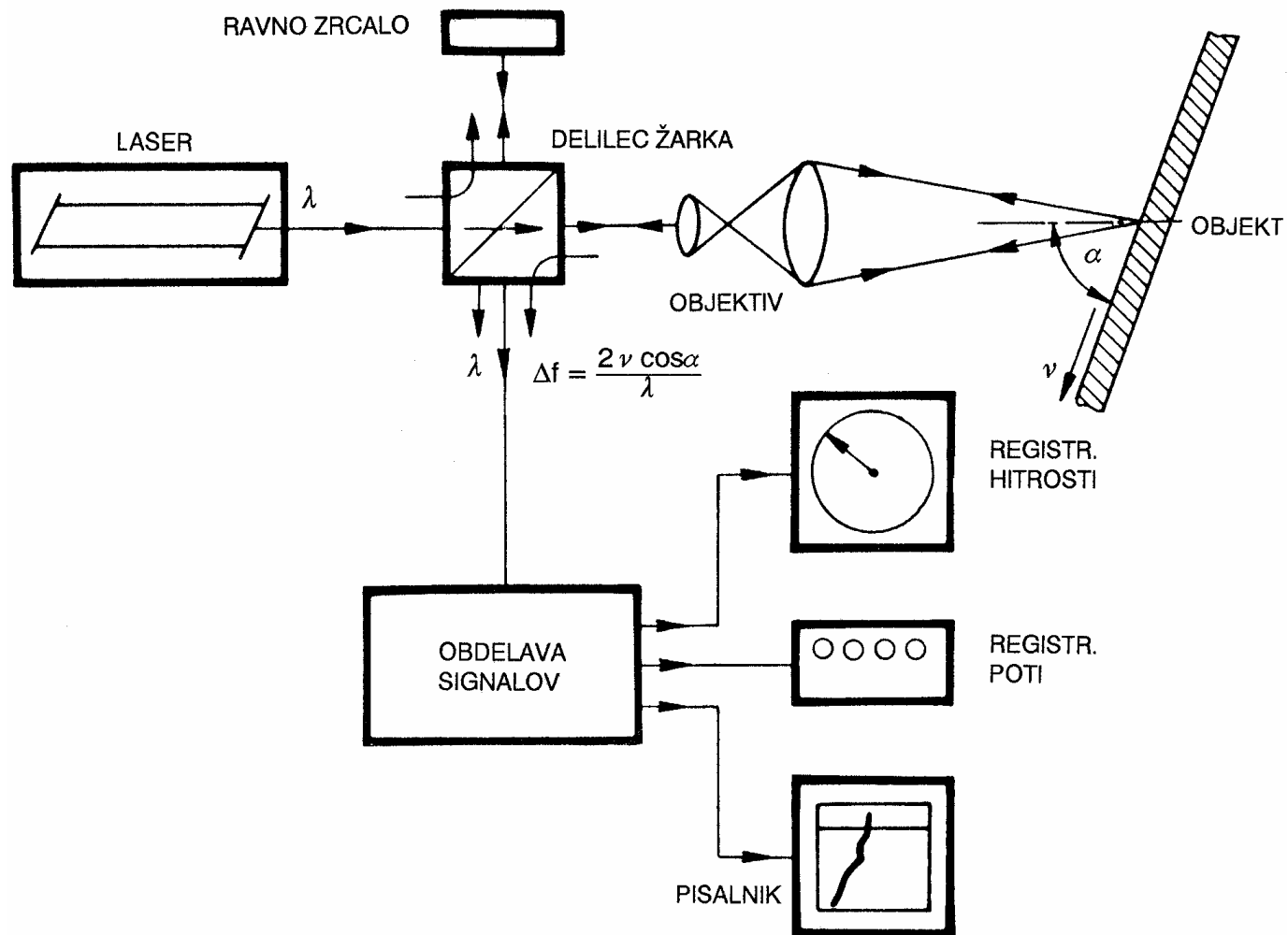
$R = 2 - 32 \text{ k}\Omega$

$U_0 = 10^{-8} B \cdot l \cdot v_i$ [V]

l : dolžina tuljave [cm]

v_i : relativna hitrost [cm / A]

Laserski merilni sistem za merjenje poti in hitrosti



Tahogeneratorji

Generirana napetost je proporcionalna vrtilni hitrosti

DC – tahometri spremenijo polariteto, če se spremeni smer vrtenja

AC – tahometri spremenijo fazo za 180°

Uporaba:

1. Dušenje – za generiranje $\frac{d\Theta}{dt}$ ali K_{qs}
K – faktor ojačanja V / rad/s
2. Računanje – natančnost je $0,001 \div 0,01\%$

Tipični podatki:

Občutljivost: 7V / 100 vrt

Linearnost: $0 \div 3600 \text{ min}^{-1} \approx 0,07\%$

Outputna impedanca: 2800 Ω

Komentar k: Odvajanje in integriranje signalov (1)

Signal: $y(t) = \sin \omega t$

Odvajanje (splošno)

$$y_D(x) = \sin ax$$

$$y_D^{(k)}(x) = a^k \sin \left(ax + \frac{k\pi}{2} \right)$$

$$y(t) = \sin \omega t$$

$$y_D^1(t) = \omega \cdot \cos \omega t$$

$$y_D^2(t) = -\omega^2 \cdot \sin \omega t = -\omega^2 y(t)$$

Komentar k: Odvajanje in integriranje signalov (2)

Signal: $y(t) = \sin \omega t$

Integriranje (splošno):

$$y_I(x) = \sin ax$$

$$y_{I1}(x) = \int \sin ax \, dx = -\frac{1}{a} \cos ax$$

$$y_{I2}(x) = -\frac{1}{a} \int \cos ax \, dx = -\frac{1}{a^2} \sin ax = -\frac{1}{a^2} y_I(x)$$

$$y_{I1}(t) = \int \sin \omega t \, dt = -\frac{1}{\omega} \cos \omega t$$

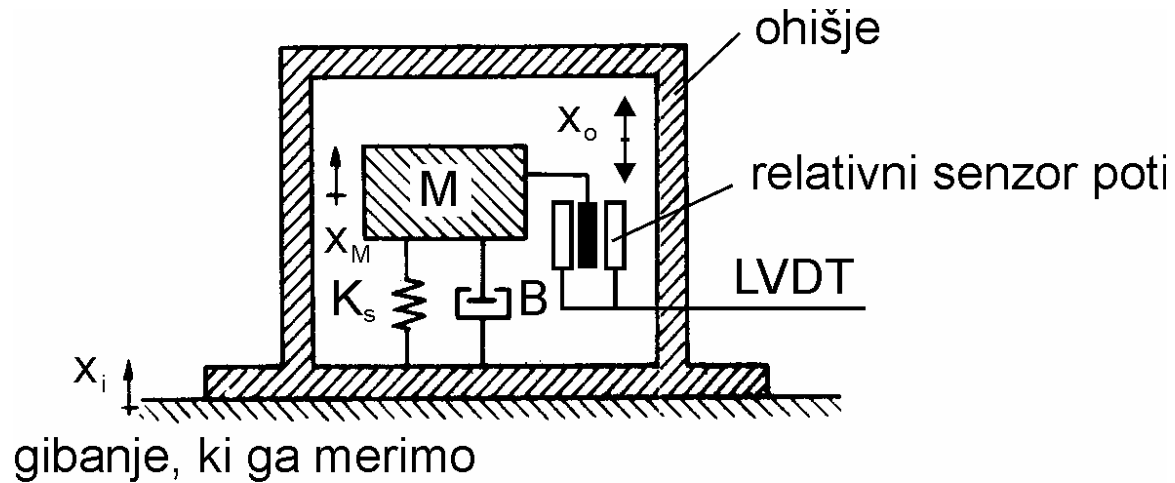
$$y_{I2}(t) = -\frac{1}{\omega} \int \cos \omega t \, dt = -\frac{1}{\omega^2} \sin \omega t = -\frac{1}{\omega^2} y(t)$$

Torej: z integracijo signala visokofrekvenčne šume spovprečimo, z diferenciacijo šume pojačamo.

6.6 Seizmični senzorji

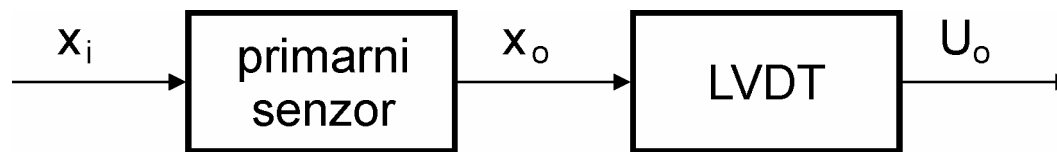
**Funkcijski elementi
II.del**

Seizmični senzor za translacijske poti nihanja



$$x_M = x_i - x_o$$

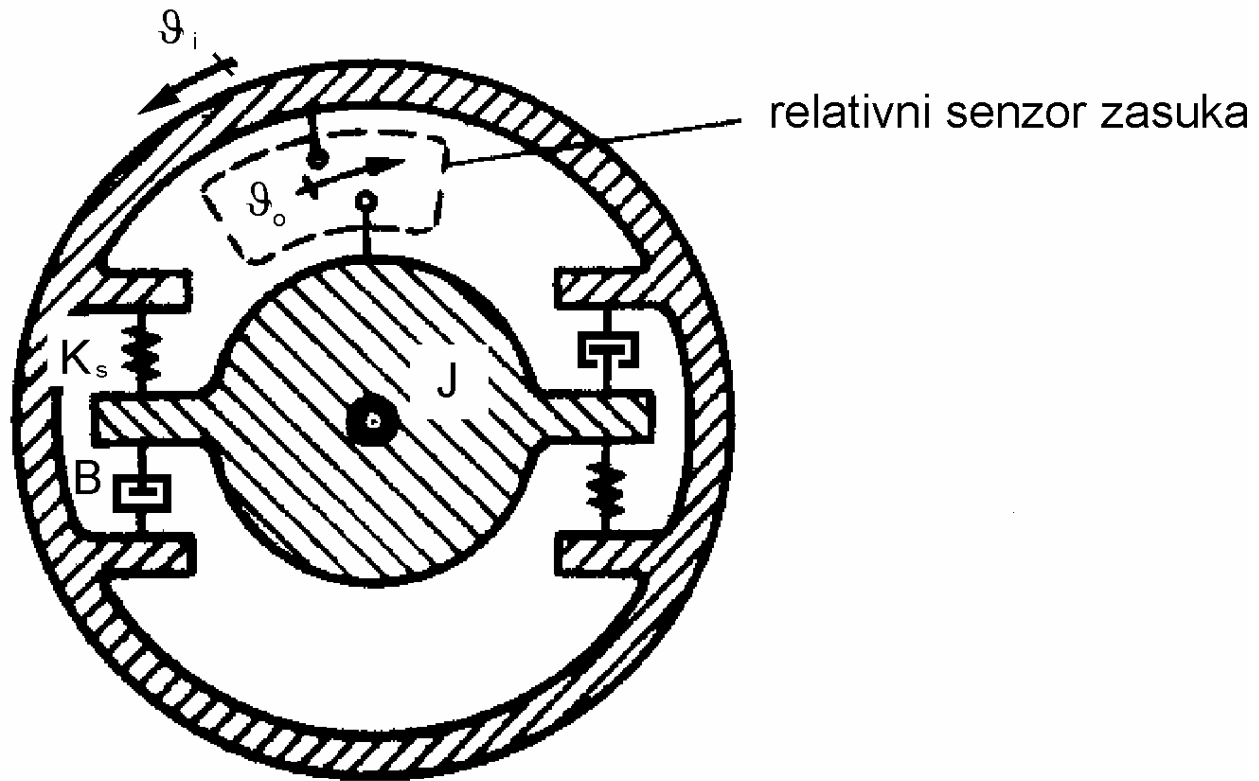
$$x_M \cong 0 \rightarrow x_i \cong x_o$$



$$MD^2 x_M = B Dx_o + K_s x_o$$

$$M(D^2 x_i - D^2 x_o) = B Dx_o + K_s x_o$$

Seizmični senzor za rotacijske poti nihanja



Diferencialna enačba seizmičnega senzorja

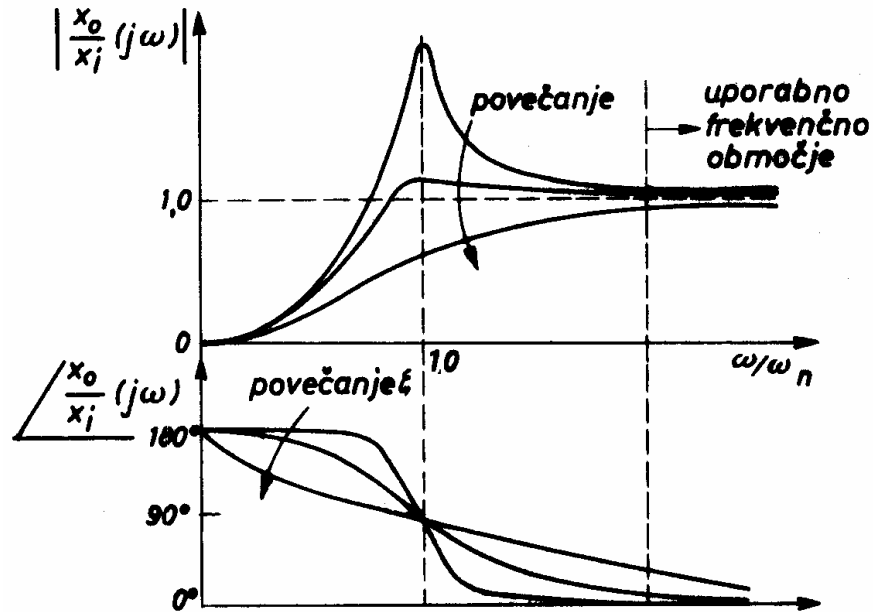
$$M D^2 x_M = B D x_o + K_s x_o$$

$$M (D^2 x_i - D^2 x_o) = B D x_o + K_s x_o$$

$$\frac{x_o}{x_i}(D) = \frac{\frac{D^2}{\omega_n^2}}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta D}{\omega_n} + 1}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{M}}, \quad \zeta = \frac{B}{2\sqrt{K_s M}}$$

$$\frac{x_o}{x_i}(j\omega) = \frac{\frac{(j\omega)^2}{\omega_n^2}}{\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} j\omega + 1}$$

Frekvenčni odgovor seizmičnega senzorja za translacijske poti nihanja



$$\zeta = 0,6 \div 0,7$$

$$\frac{X_o}{X_i}(j\omega) = \frac{(j\omega)^2}{\omega_n^2 \left(\left(\frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} j\omega + 1 \right)}$$



Merjenje hitrosti nihanja na osnovi seizmičnih senzorjev

Hitrost nihanja lahko merimo:

1. napetostni signal poti odvajamo
2. napetostni signal pospeška integriramo
3. LVDT nadomestimo z induktivnim senzorjem za hitrost
4. z matematično izpeljavo TF za poti nihanja

Merjenje hitrosti nihanja (1)

Merjenje hitrosti nihanja:

ad 1: z računalnikom oziroma z diferenciatorjem

ad 2: z računalnikom oziroma z integratorjem

ad 3: $U_0 = 10^{-8} \text{ B.l.} \cdot \dot{x}_0 = K_{ED} \cdot \dot{x}_0$

sledi

$$\frac{U_0}{\dot{x}_i}(D) = K_{ED} \frac{\frac{D^2}{\omega_n^2}}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta D}{\omega_n} + 1}$$

Hitrost gibanja merimo pri $\omega \gg \omega_n$

Merjenje hitrosti nihanja (2)

ad 4: izhodiščna enačba TF

$$\frac{x_o}{x_i}(D) = \frac{\frac{D^2}{\omega_n^2}}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta D}{\omega_n} + 1} \quad \left| \begin{array}{l} \text{delimo z } \frac{1}{\omega_n^2} \end{array} \right.$$

$$\frac{x_o}{D x_i}(D) = \frac{D}{D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2} \quad \left| \begin{array}{l} \text{delimo z } D \end{array} \right.$$

in izrazimo TF v frekvenčnem prostoru.

Velja:

$$\frac{x_o}{x_i}(j\omega) = \frac{1}{j\omega + 2\zeta\omega_n + \frac{\omega_n^2}{j\omega}} \quad ; \quad \frac{x_o}{x_i}(j\omega) = \frac{1}{2\zeta\omega_n - j \left[\frac{\omega_n^2 - \omega^2}{\omega} \right]}$$

Merjenje hitrosti nihanja (3)

V tem primeru merimo x_o in ne \dot{x}_o . Torej mora veljati pogoj:

$$\frac{x_o}{\dot{x}_i} \approx \text{konst}$$

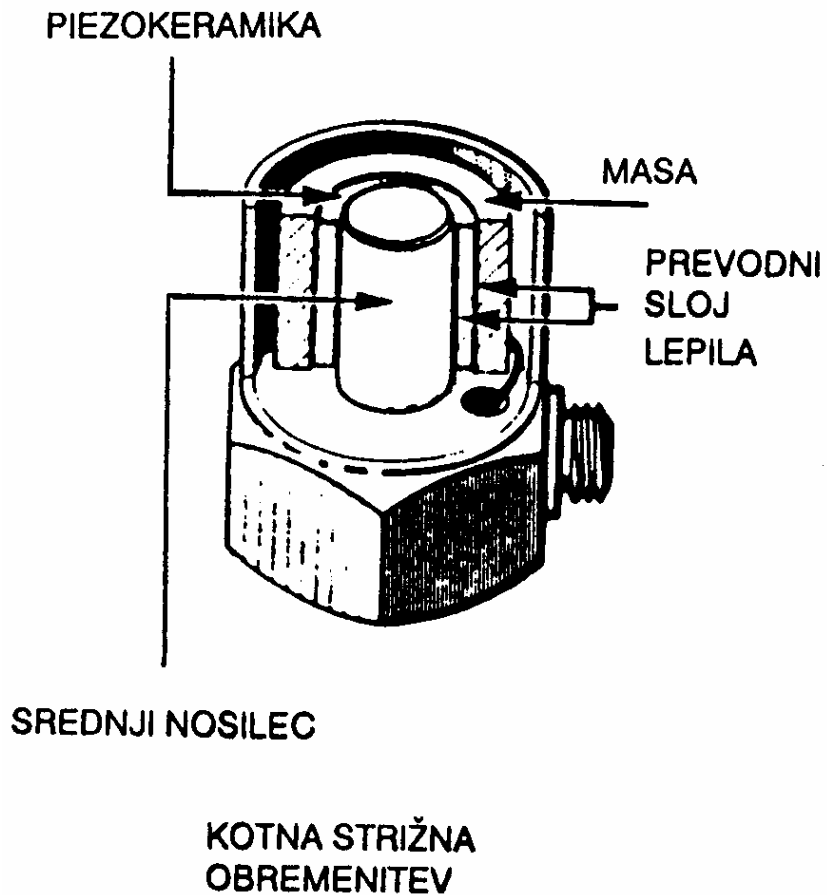
Ta pogoj je izpolnjen, če je $\frac{\omega_n^2 - \omega^2}{\omega} \approx 0$

To je izpolnjeno, če je $\omega \approx \omega_n$.

Pri tem pogoju velja:

$$\frac{x_o}{\dot{x}_i}(j\omega) \approx \frac{1}{2\zeta\omega_n}$$

Seizmični senzor za merjenje pospeškov (akcelerometer) (1)



2. Newton-ov zakon

$$M_{PS} \cdot a = F \rightarrow a = \frac{F}{M_{PS}}$$

Seizmični senzor za merjenje pospeškov (2)

Izhodišče:

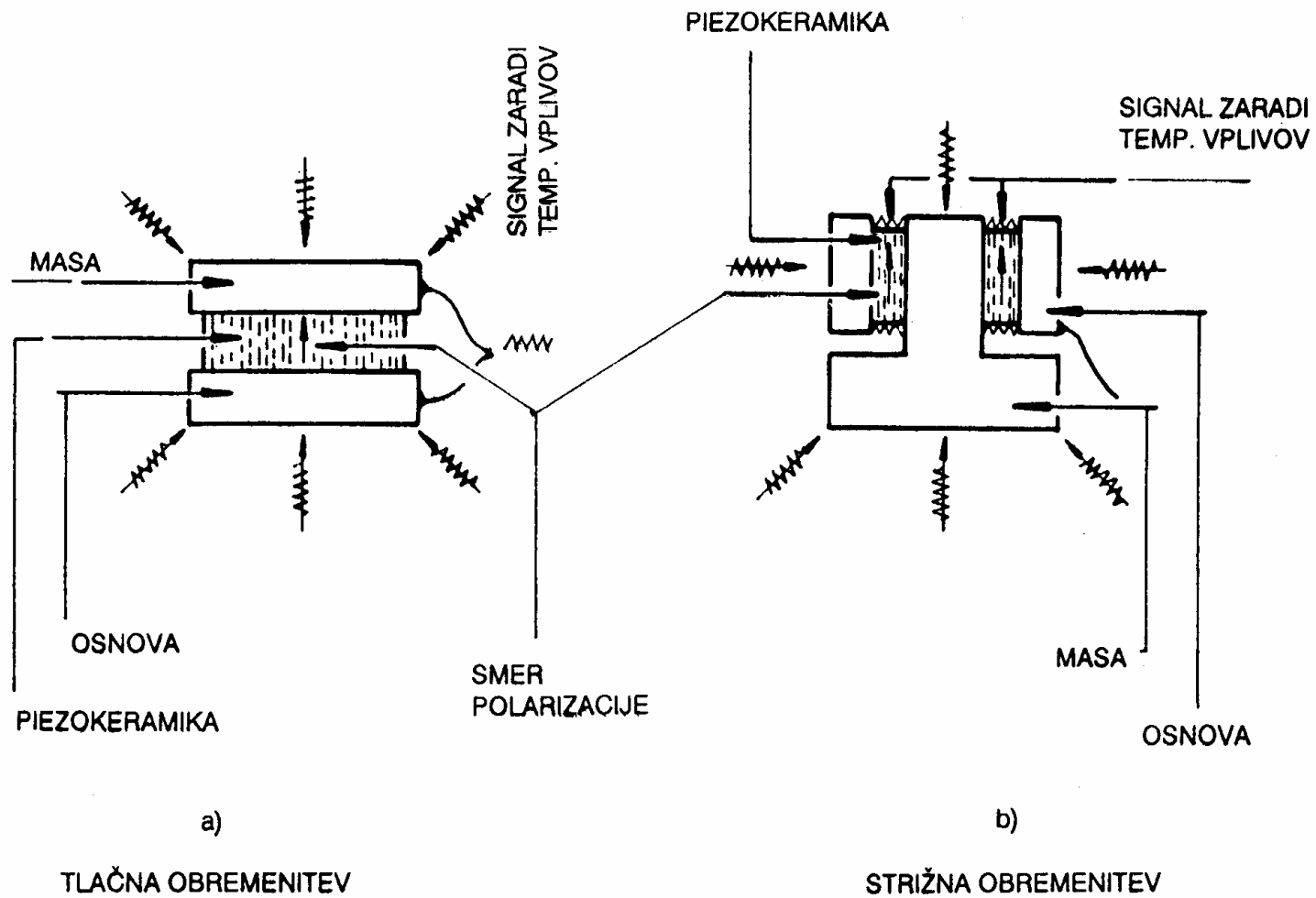
$$\frac{x_o}{x_i}(D) = \frac{\frac{D^2}{\omega_n^2}}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta D}{\omega_n} + 1}; \quad \frac{x_o}{D^2 x_i}(D) = \frac{\frac{1}{\omega_n^2}}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta D}{\omega_n} + 1}$$

Pri merjenju x_o s piezoelektričnimi senzorji: $x_o \propto M_{PS} \cdot \ddot{x}_i = F$

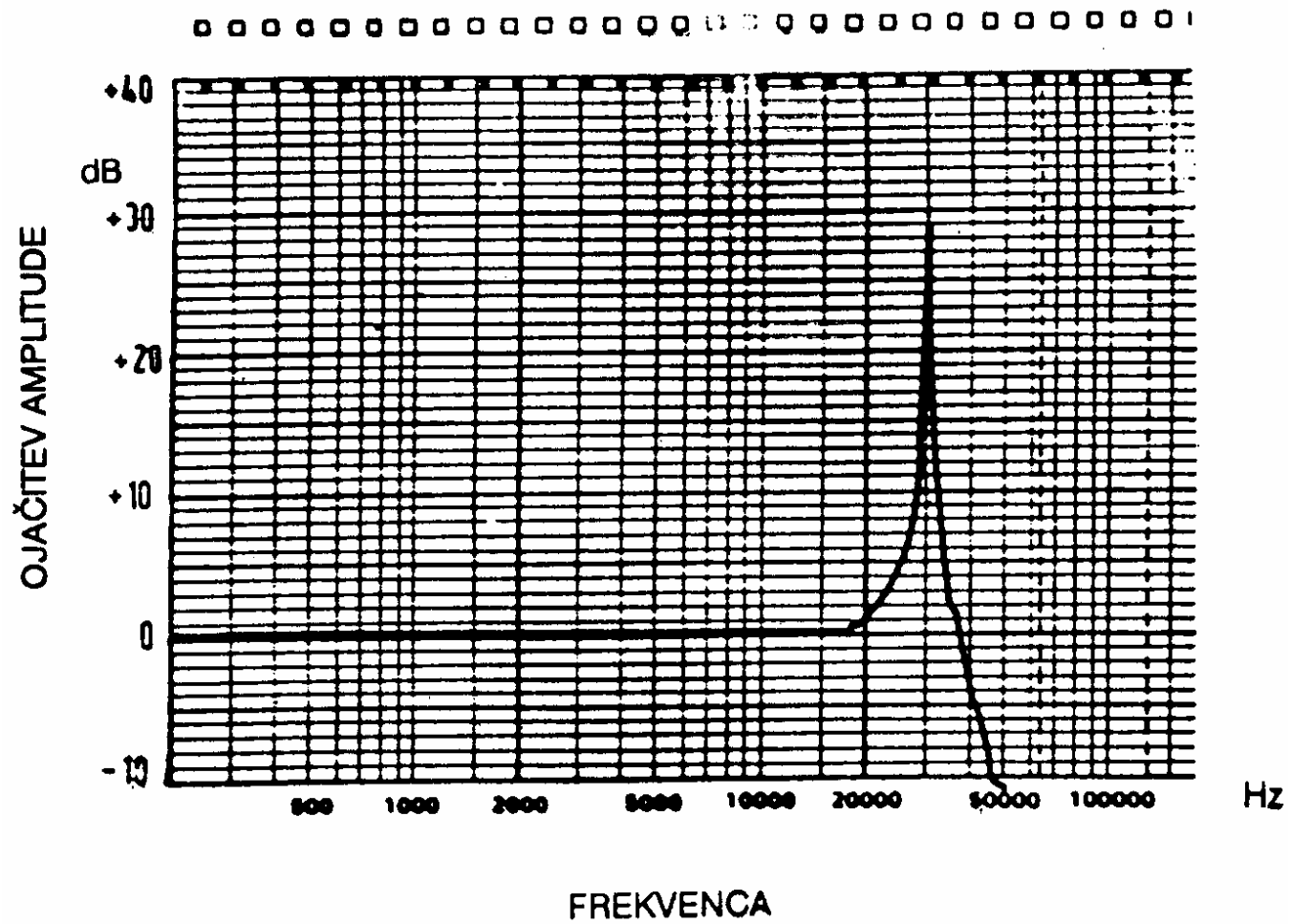
$$U_o(D) = \frac{K_q}{C} \cdot \frac{\tau D}{1 + \tau D} \cdot x_o, \quad \tau = RC$$

$$\frac{U_o}{D^2 x_i}(D) \propto \frac{K_q}{C} \cdot \frac{\tau D}{\tau D + 1} \cdot \frac{\frac{1}{\omega_n^2}}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta D}{\omega_n} + 1}$$

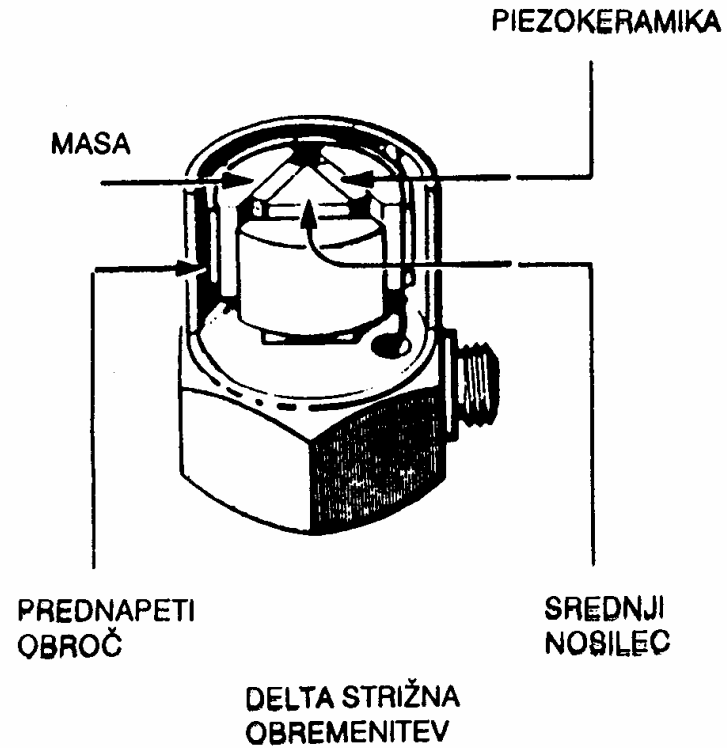
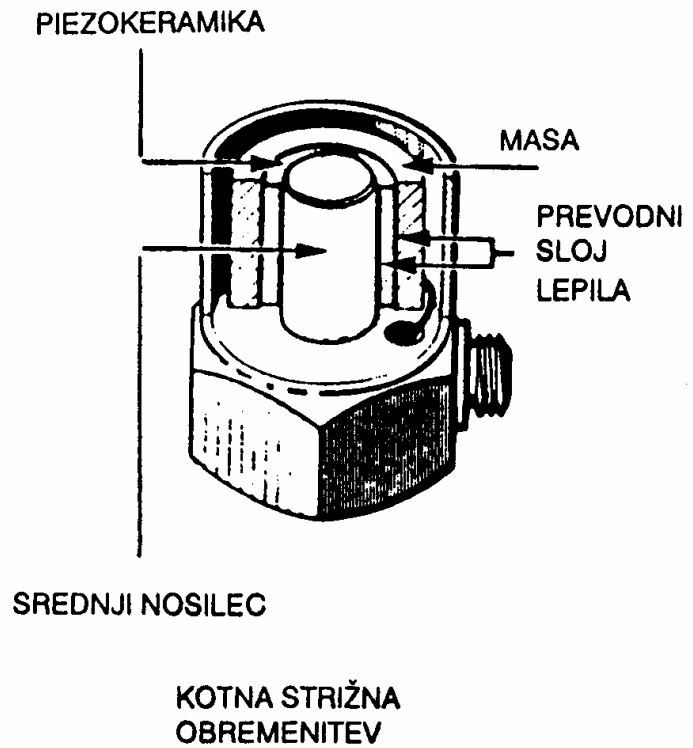
Delta akcelerometri za tlak in strig



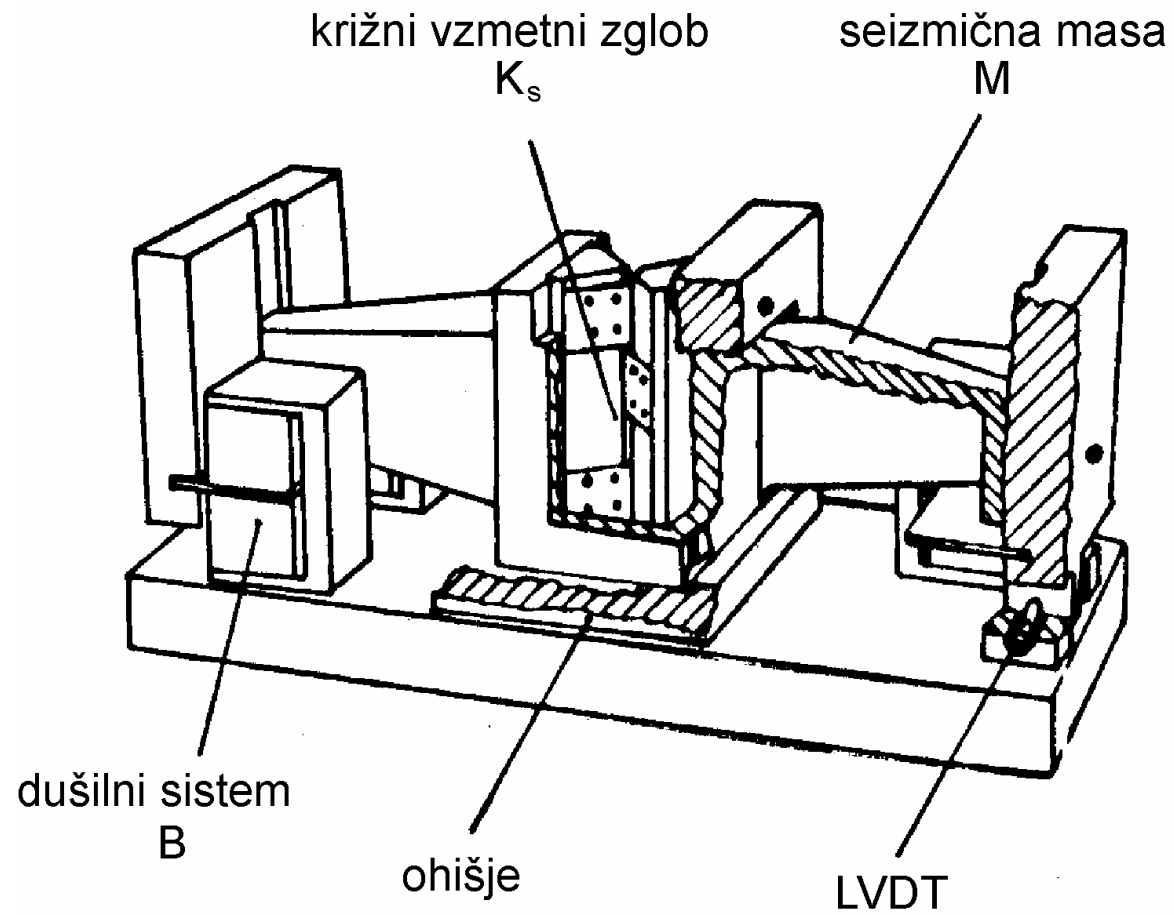
Kalibriranje akcelerometra



Akcelerometri za kotni in delta strig



Seizmični merilni sistem

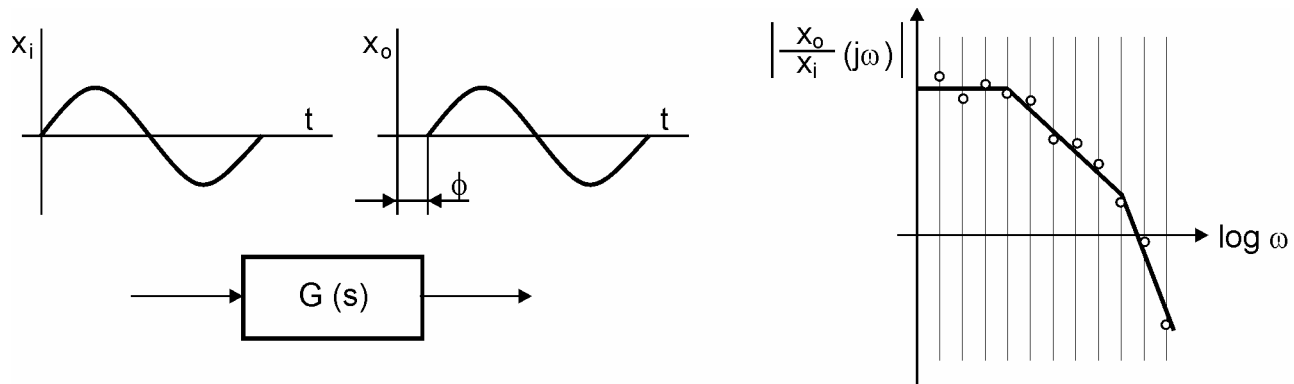
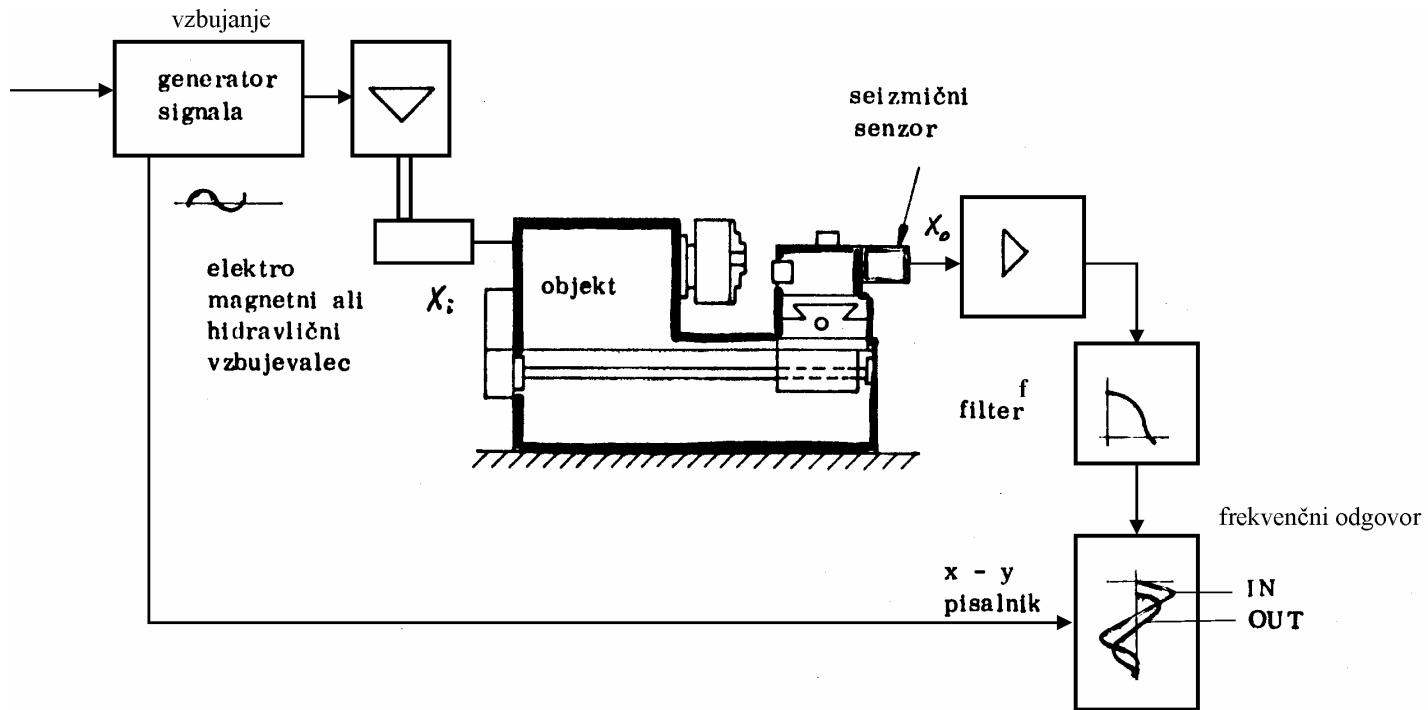


Primer kapacitivnih akcelerometrov

Vir: Silicon Designs 2002



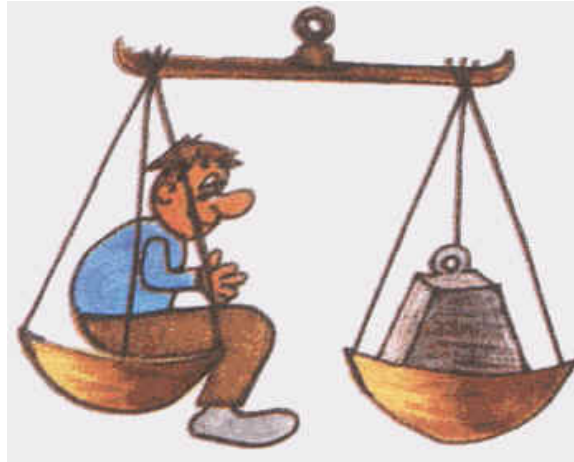
Merjenje dinamičnih karakteristik mehanskega objekta



Vir: Peklenik

6.7 Merjenje sil, vrtilnih momentov in moči

Merjenje sil, vrtilnih momentov in moči (1)



Metode merjenja:

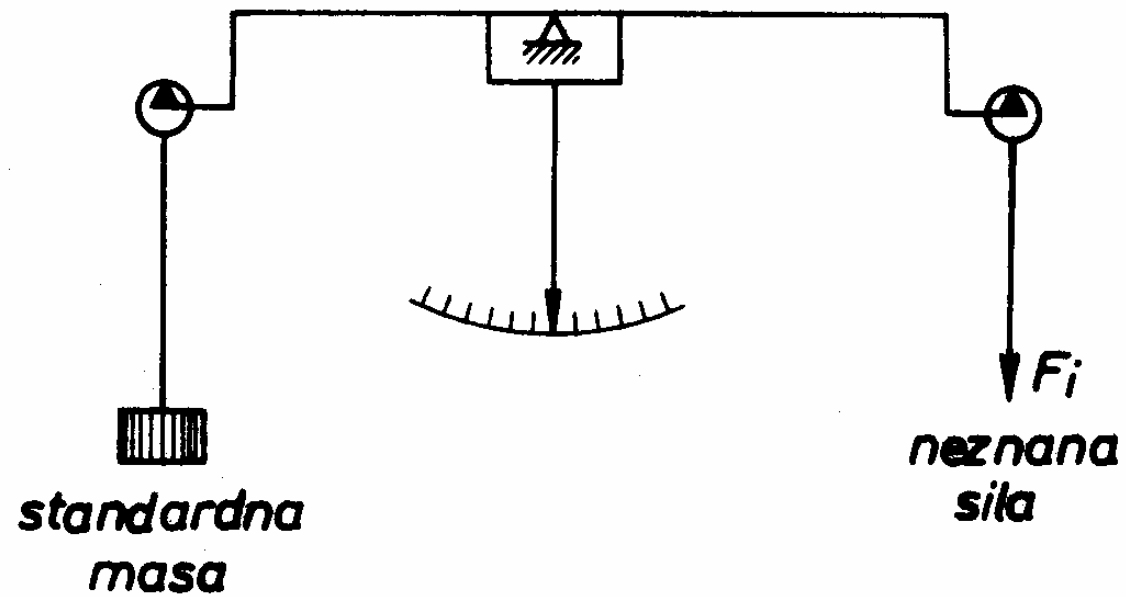
1. tehtanje
2. merjenje pospeška pri znani masi na katero deluje neznana sila F
3. ravnotežje sistema proti magnetni sili
4. prenos sile skozi tekočino v obliki tlaka in merjenje tlaka
5. delovanje sile na elastični dajalnik in merjenje poti

Merjenje sil, vrtilnih momentov in moči (2)

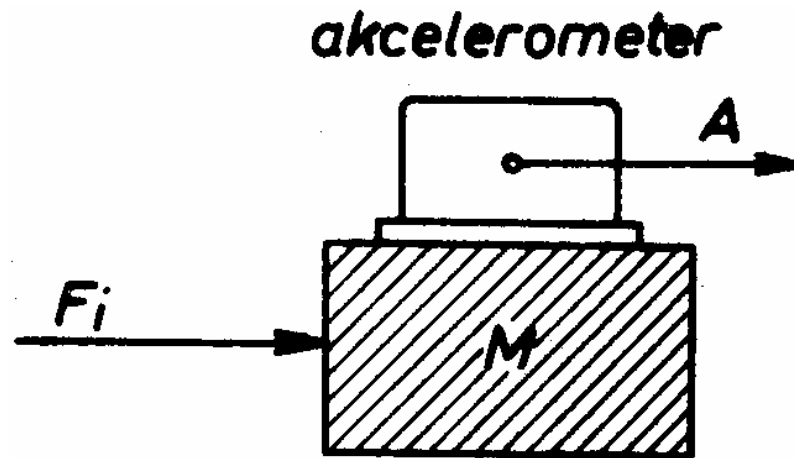
Osnovne zahteve za merjenje sil, momentov in moči so:

- a) majhne merilne poti
- b) majhne dimenzije primarnega senzorja
- c) veliko merilno območje
- d) zahtevana točnost
- e) ustrezne dinamične karakteristike
- f) neodvisnost merjenja komponent sil F_x , F_y ,
- g) enostavno umerjanje
- h) robustnost pri uporabi
- i) enostavno rokovanje
- j) ustrezno vzdrževanje

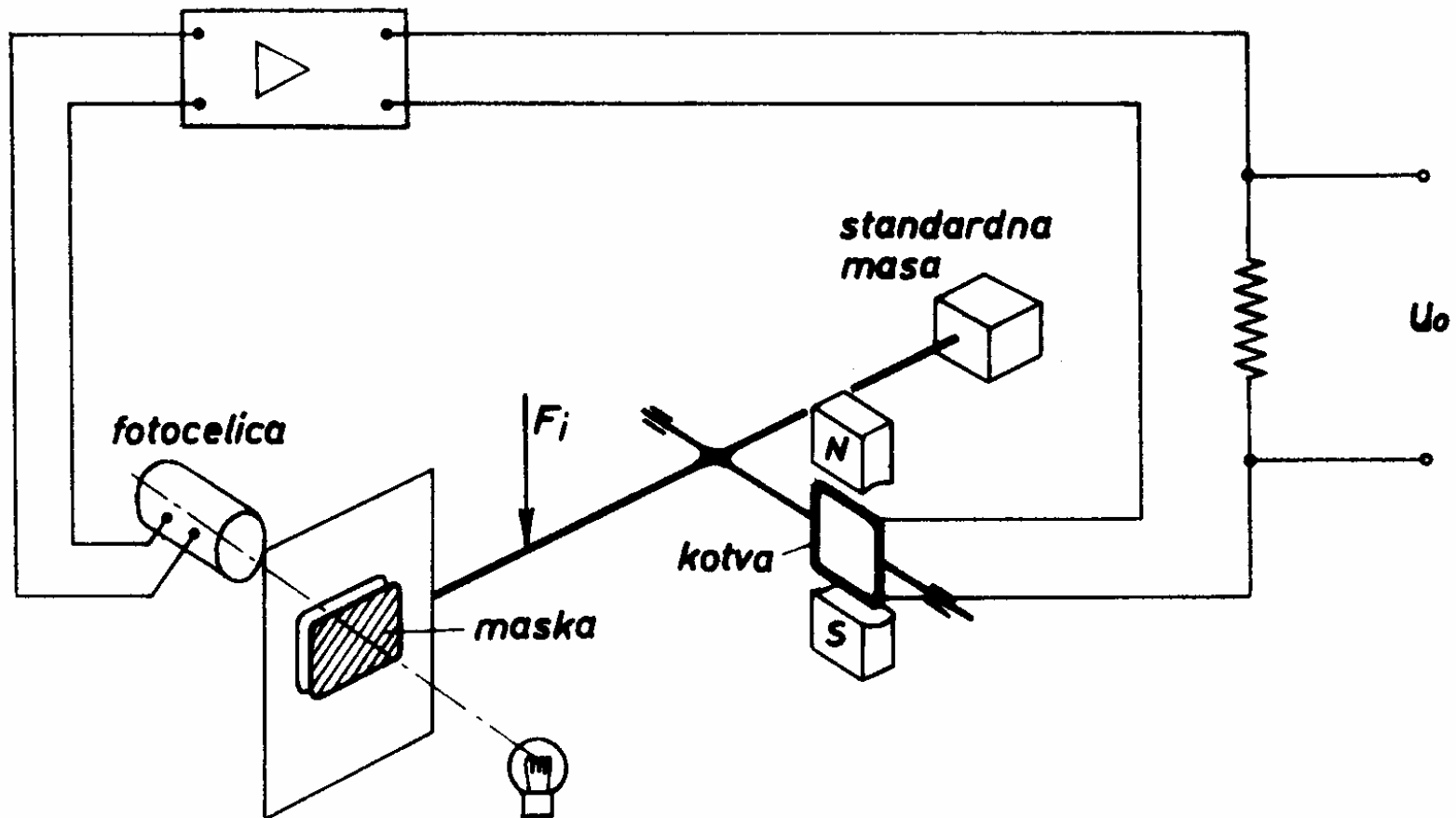
Analitična tehnika za merjenje sile (ad 1)



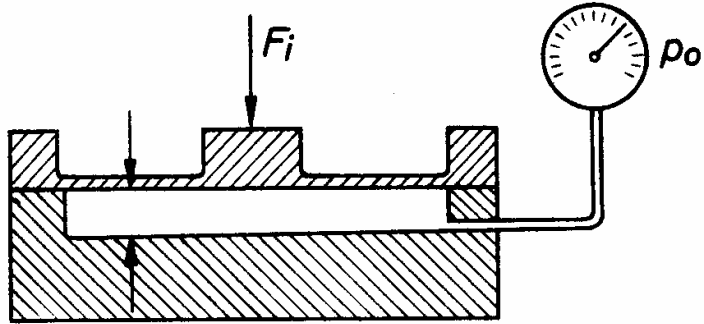
Merjenje sile z akcelorometrom (ad 2)



Merjenje sile z elektromagnetno tehtnico (ad 3)



Hidravlični senzor za merjenje sile (ad 4)



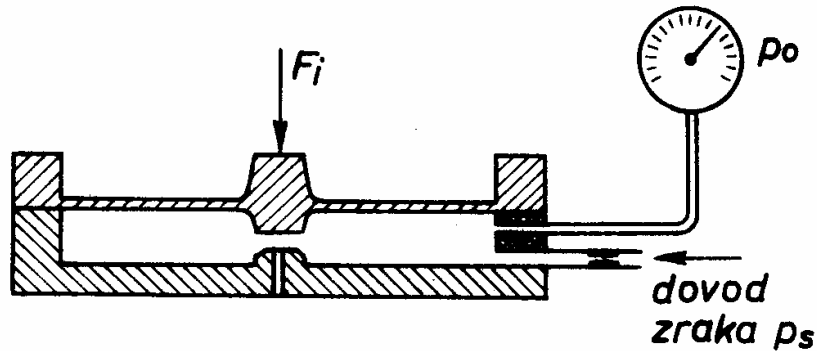
Merilno območje do 50 ton

Natančnost: 1 %

Ločljivost: 0,02 %

Izračun:
$$p_o = \frac{F_i}{A} = \frac{1}{A} F_i$$

Pnevmatični senzor za merjenje sil (ad 4)



Merilno območje je 20 – 25 000 N

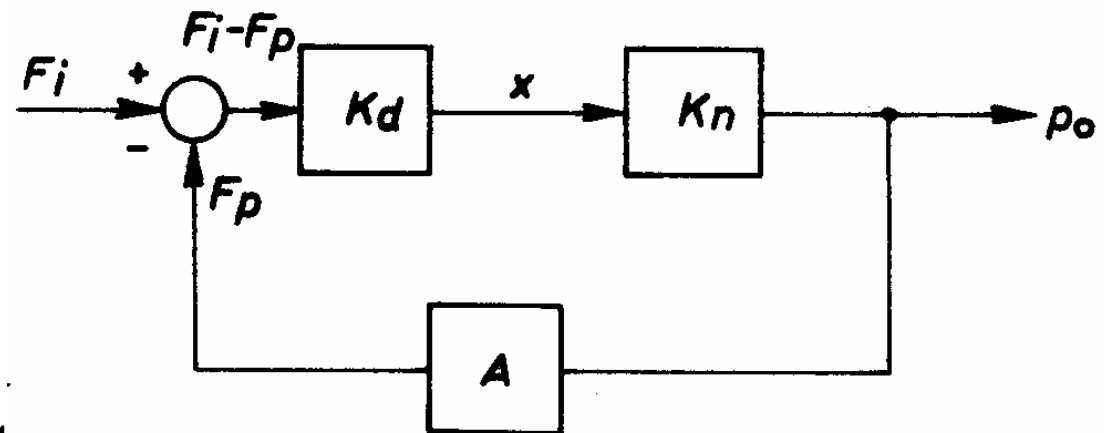
Gibljiva šoba

V povratni zvezi je ojačevalnik z visokim faktorjem ojačanja

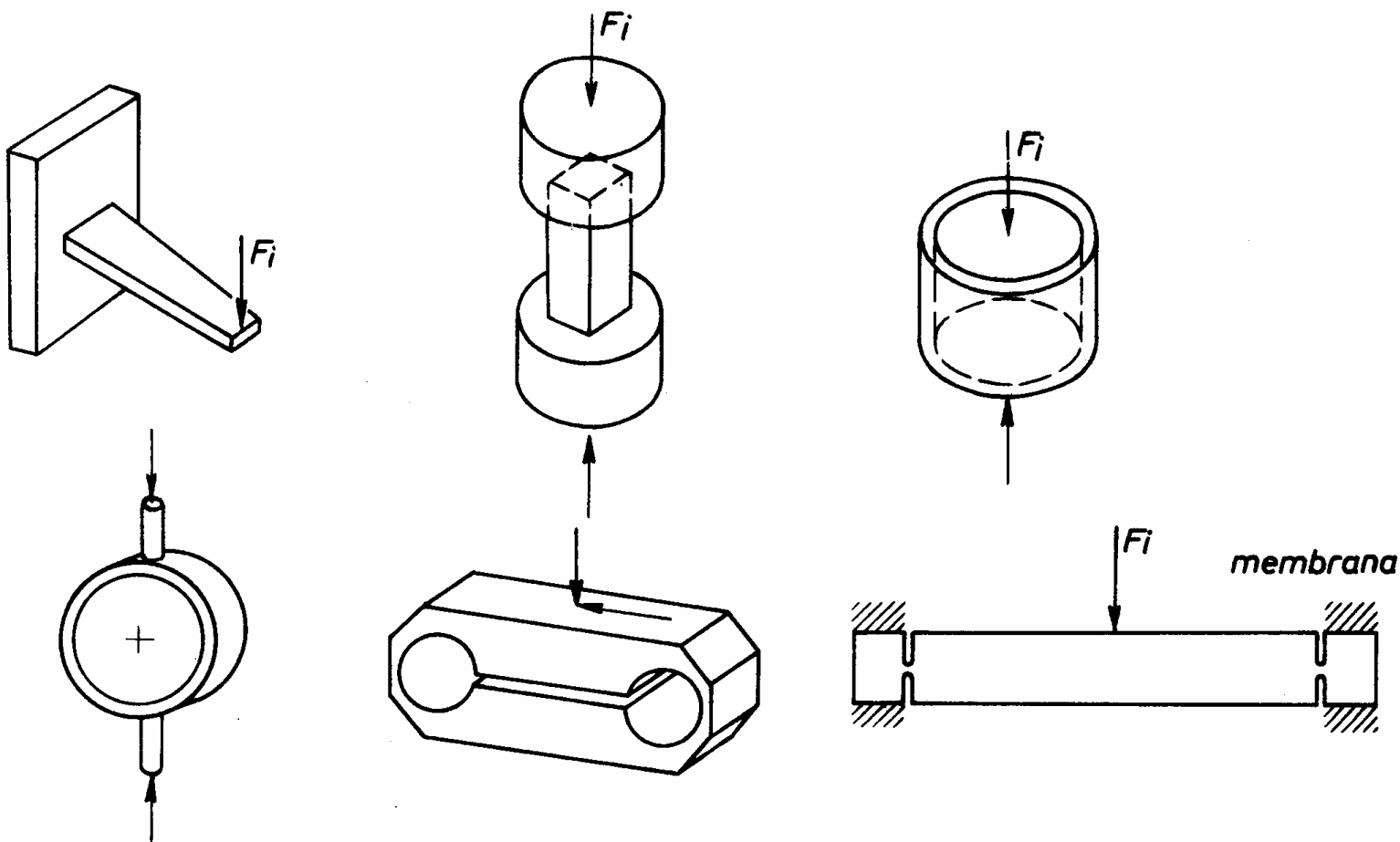
$$(F_i - p_o A) K_d K_n = p_o$$

$$p_o = \frac{F_i}{\frac{1}{K_d K_n} + A} \approx \frac{F_i}{A},$$

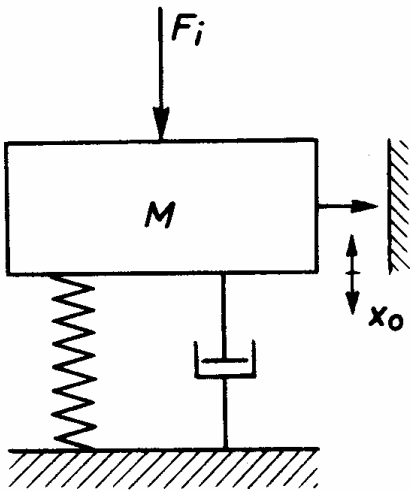
če je izpolnjen pogoj $K_d K_n \gg 1$



Osnovne metode merjenja sil z deformacijo elastičnega sensorja (ad 5)



Elastični senzor za merjenje sil

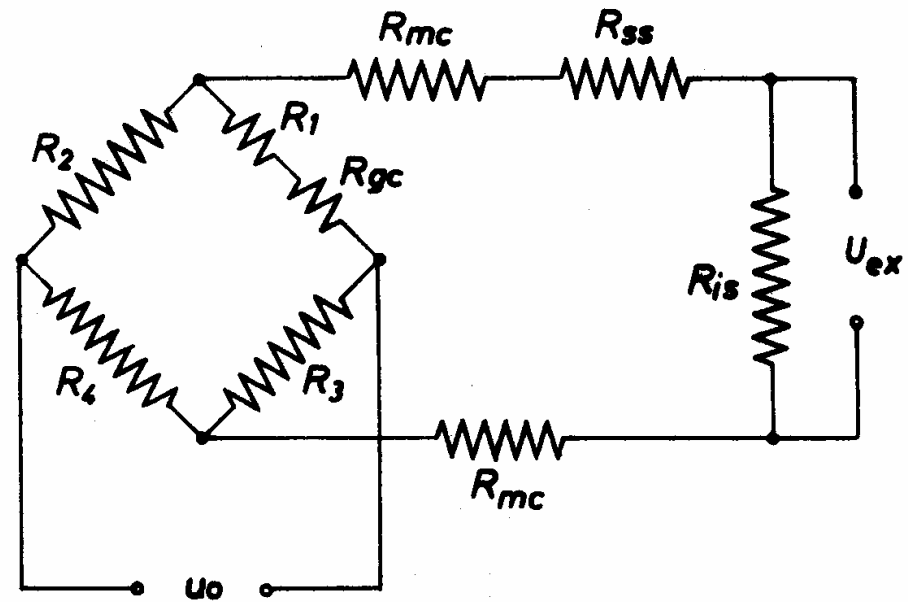
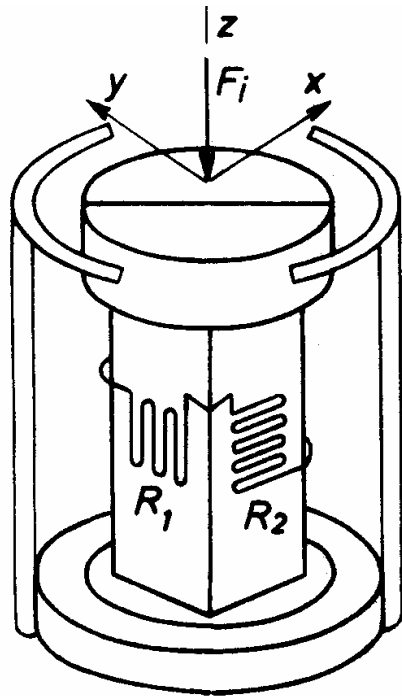


$$F_i - K_s x_o - B D x_o - M D^2 x_o = 0$$

$$\frac{x_o}{F_i}(D) = \frac{K}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta D}{\omega_n} + 1}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{M}}; \quad \zeta = \frac{B}{2\sqrt{K_s M}}; \quad K = \frac{1}{K_s}$$

Merjenje sile z merilnimi trakovi (1)



Merjenje sile z merilnimi trakovi (2)

Uporaba merilnih trakov pri merjenju sil

Faktor ojačanja merilnega traku:

$$K = \frac{dR}{R} / \frac{dL}{L} \rightarrow dR = K \cdot R \cdot \varepsilon = K \cdot R \cdot \frac{\sigma}{E}$$

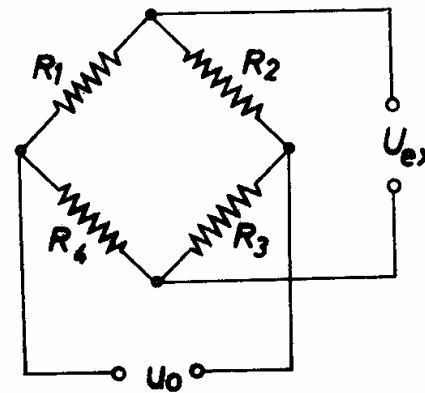
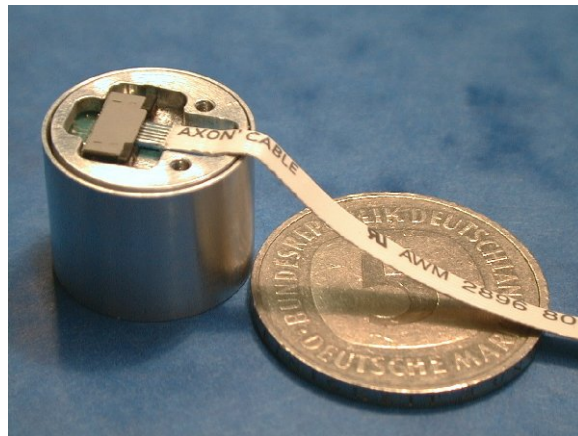
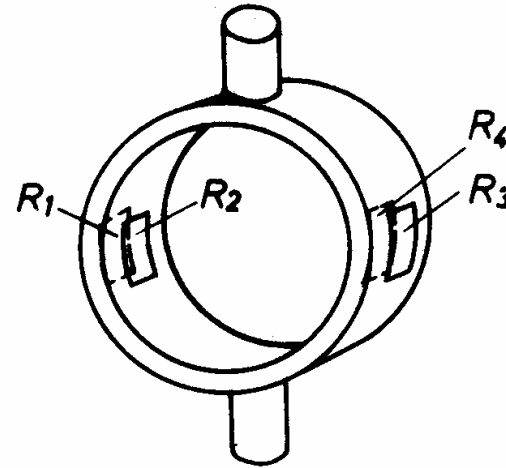
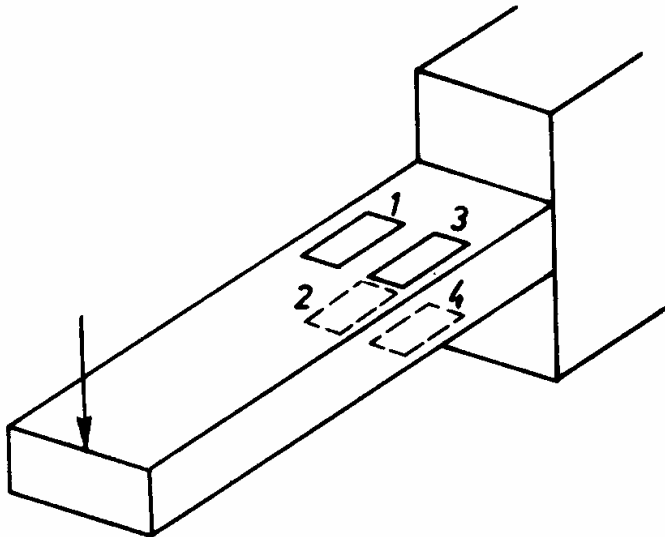
$$U_o = \frac{N_{MT}}{4R} \cdot dR \cdot U_{ex} = \frac{N_{MT}}{4} \cdot K \cdot U_{ex} \cdot \frac{1}{E} \cdot \sigma$$

Razmerje koristni signal – šum

$$\frac{U_o}{U_{T\check{S}}} = \left\{ \frac{10}{1}, \dots, \frac{6}{1} \right\}$$

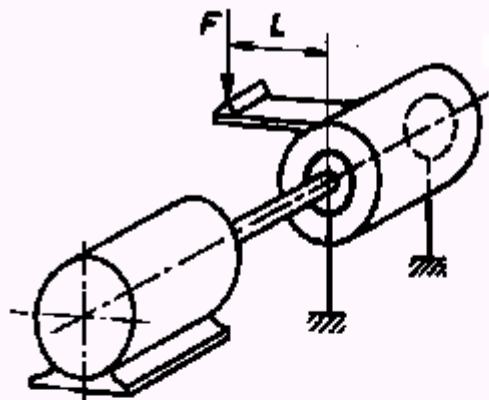
$$U_{T\check{S}} = \sqrt{4 \cdot K_{BZ} \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

Senzorji z obroči in nosilci za merjenje sil

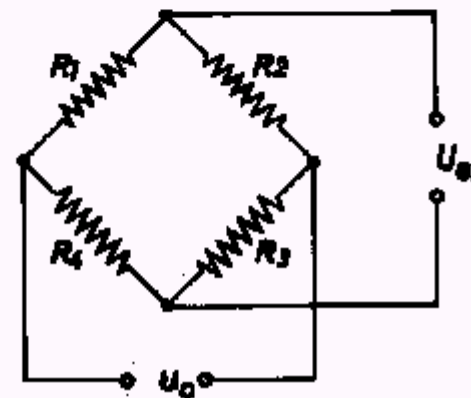
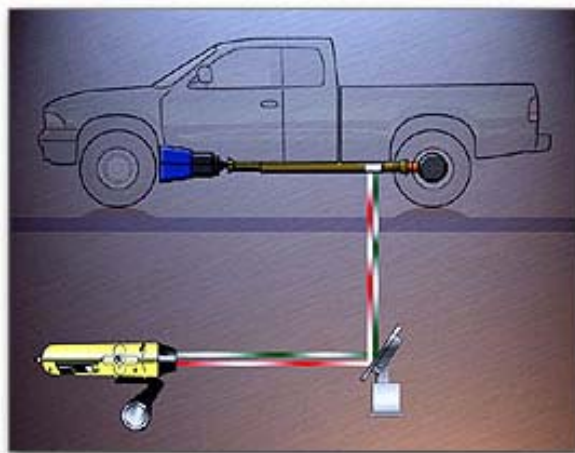
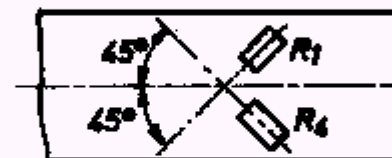
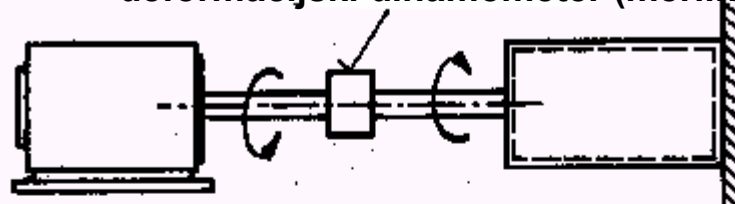


Merjenje vrtilnih momentov na rotirajočih gredeh

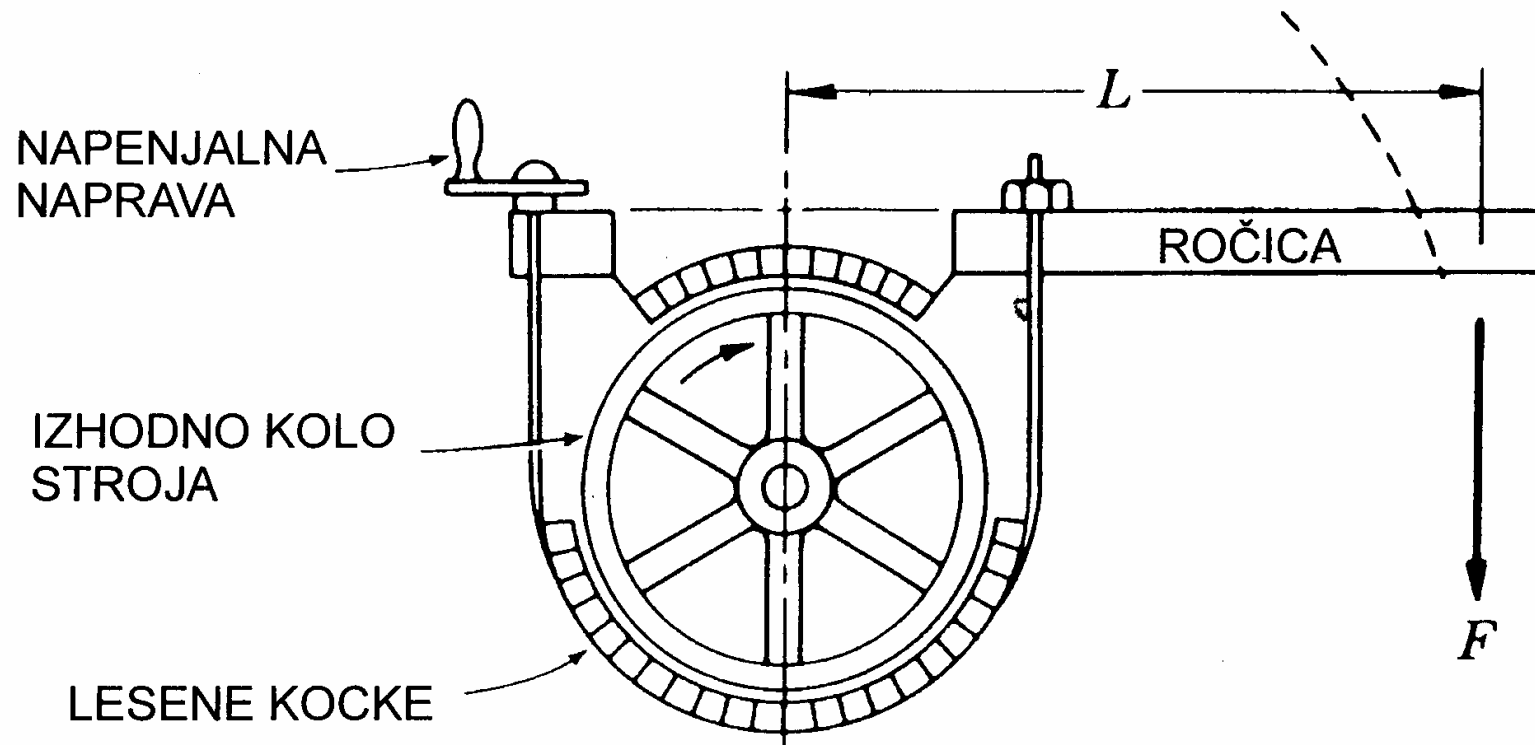
absorbcijski dinamometer (induktivni, prony, ...)



deformacijski dinamometer (merilni trakovi, ...)



Princip delovanja Prony-jeve zavore



Senzorji vrtilnega momenta - primer



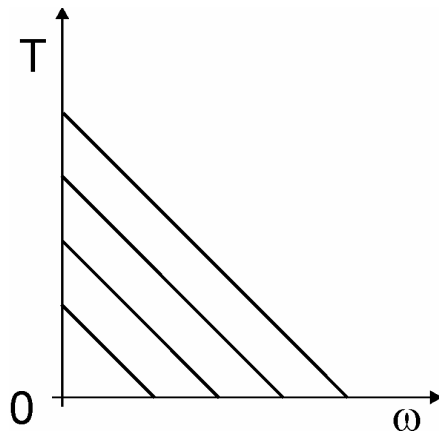
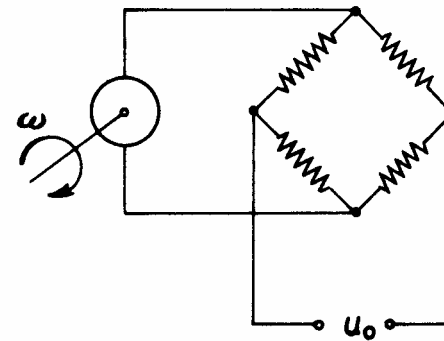
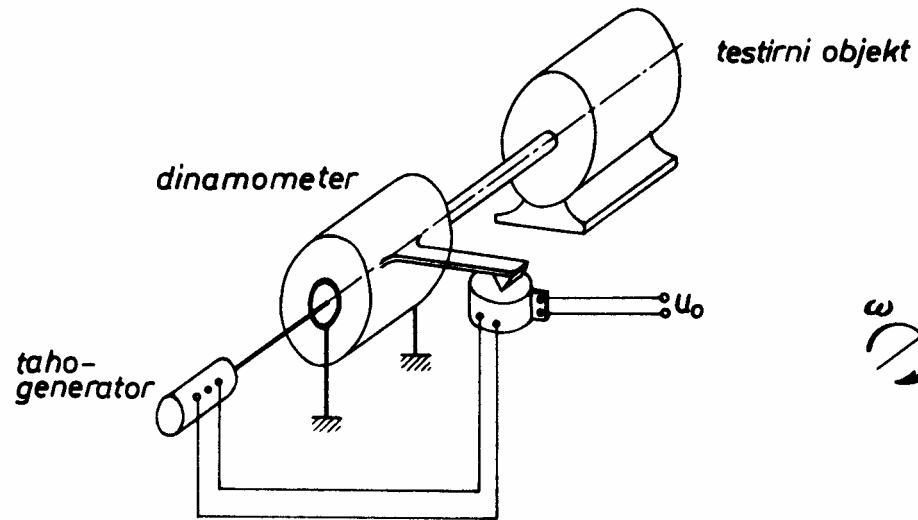
Senzorji vrtilnega momenta

Za statične meritve (ne-rotirajoč)
Tipi 8624, 8627, 8628, 8632



- ❑ Merilno območje od 0 ...1 Nm do 0 ... 5 kNm
- ❑ Merilna negotovost 0,2% (0,1% Opcija)
- ❑ zanesljivost in robustnost
- ❑ enostavno rokovanje
- ❑ standardiziran izhodni signal

Trenutno merjenje moči



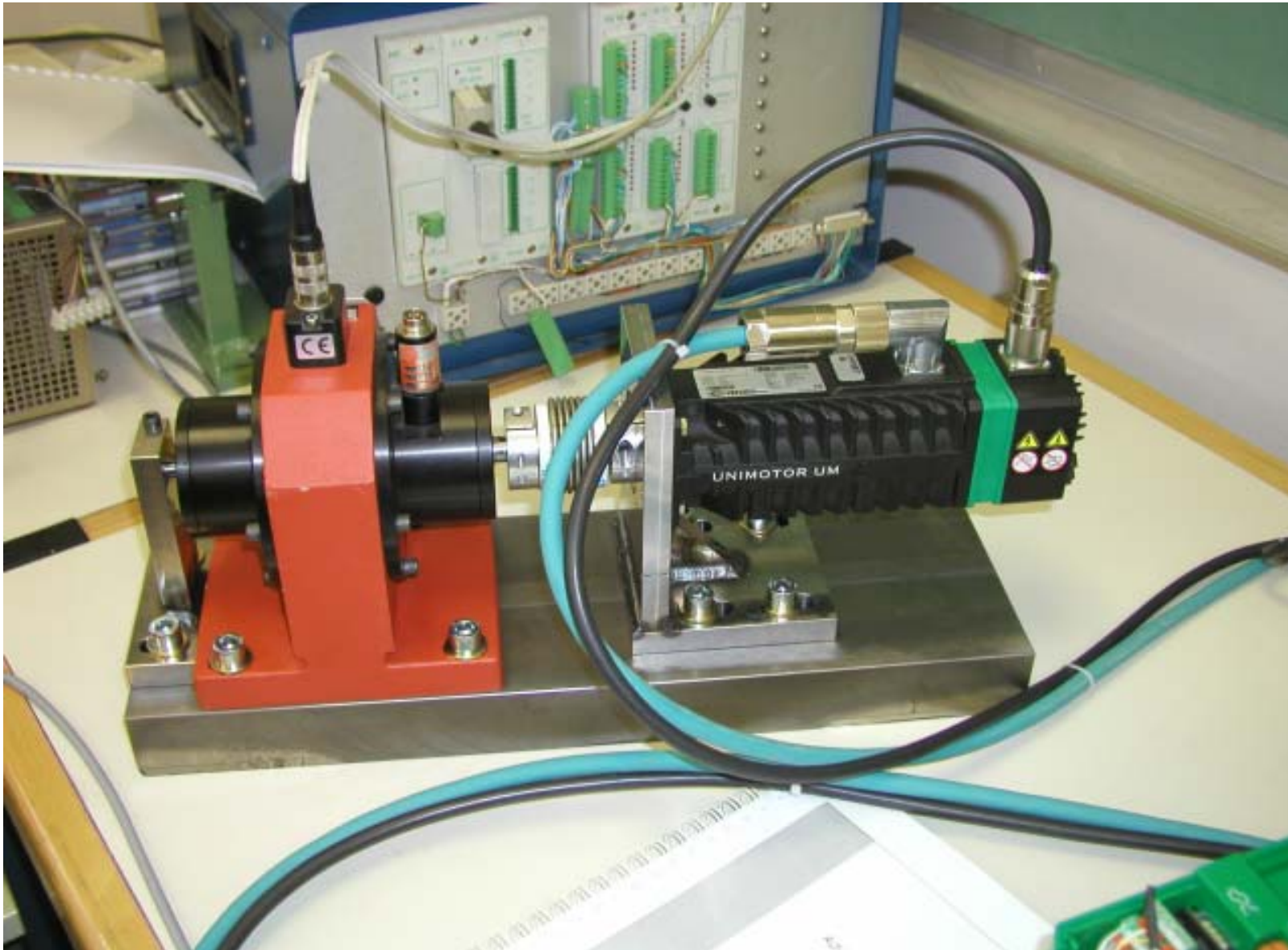
$$P = \frac{dW}{dt} = F \cdot v$$

$$P = M \cdot \omega;$$

$$M = r \cdot F \rightarrow P = r \cdot F \cdot \omega$$

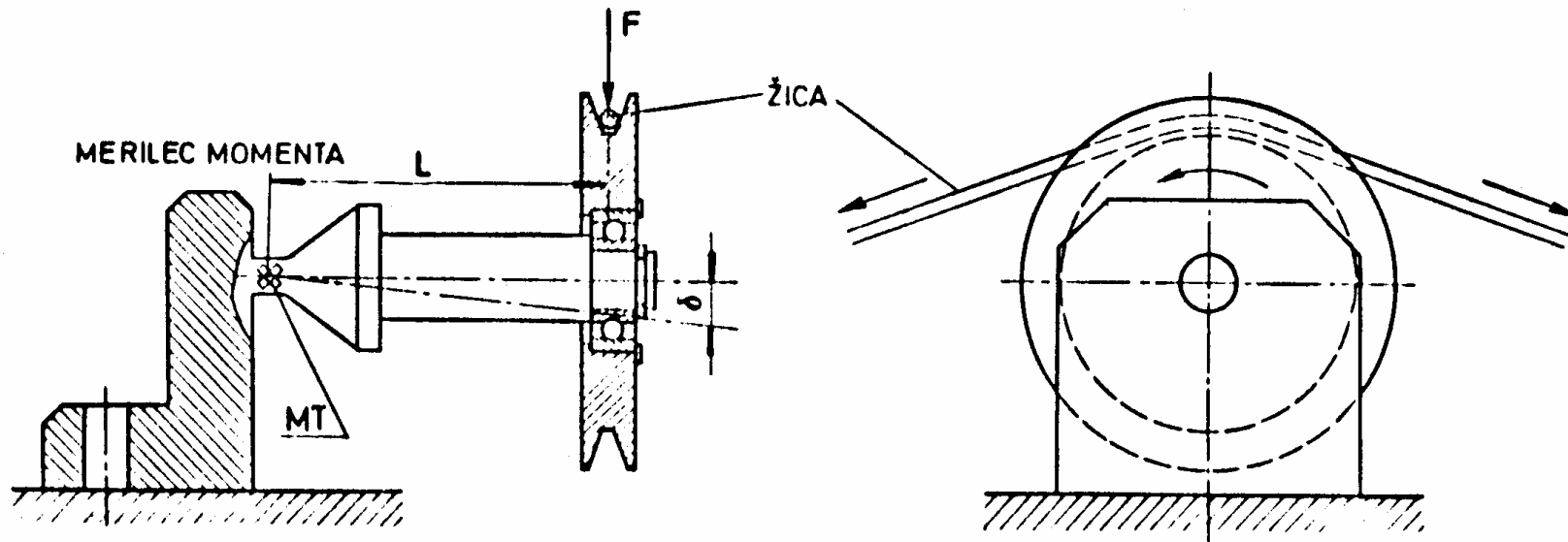
$$P \propto U_0 = \frac{N_{MT}}{4} \cdot K_{MT} \cdot r \cdot F \cdot U_{ex}(\omega)$$

Merjenje momentne karakteristike motorja



Merjenje sile v žici ali sukancu

MERILNO OBMOČJE min max
0 - 0,05N 0 - 50N



PRIMARNI SENZOR - ELASTIČNI NOSILEC
SEKUNDARNI SENZOR - MERILNI TRAK MT

7. Elementi za pretvorbo in manipulacijo signalov

**Funkcijski elementi
II.del**

Moduli za pretvorbo in manipulacijo signalov (1)

Splošno:

1. ojačevalniki
2. filtri
3. ostali elementi

1. Ojačevalniki:
 - a) splošne lastnosti
 - b) mostiščne vezave
 - c) ojačevalniki z nosilno frekvenco
 - d) DC – ojačevalniki
 - e) operacijski ojačevalniki
 - f) ojačevalniki naboja
 - g) impedančni pretvorniki

Moduli za pretvorbo in manipulacijo signalov (2)

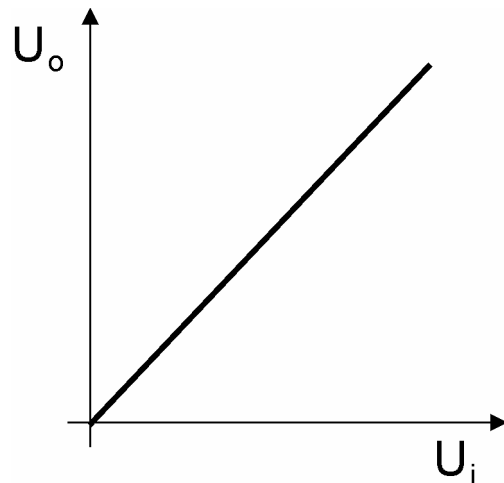
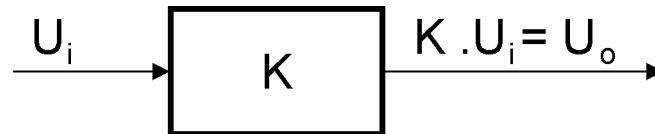
2. Filtri:

- a) vrste filtrov
- b) nizko pasovni filtri
- c) visoko pasovni filtri
- d) ozko pasovni filtri
- e) transferna funkcija filtra

3. Ostali elementi:

- a) A/D pretvornik
- b) analizator
- ...

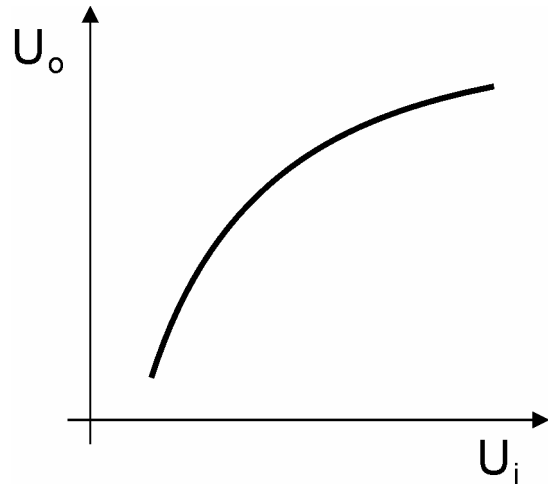
Splošne lastnosti in vrste ojačevalnikov (1a)



Linearni ojačevalec

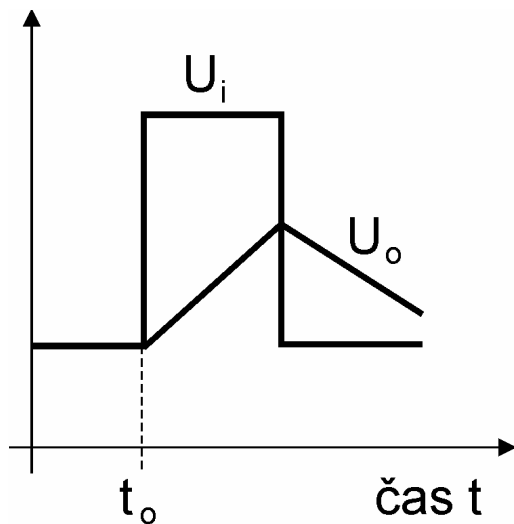
$$U_o = K U_i$$

Splošne lastnosti in vrste ojačevalnikov (1a)



Semilogaritemski ojačevalnik

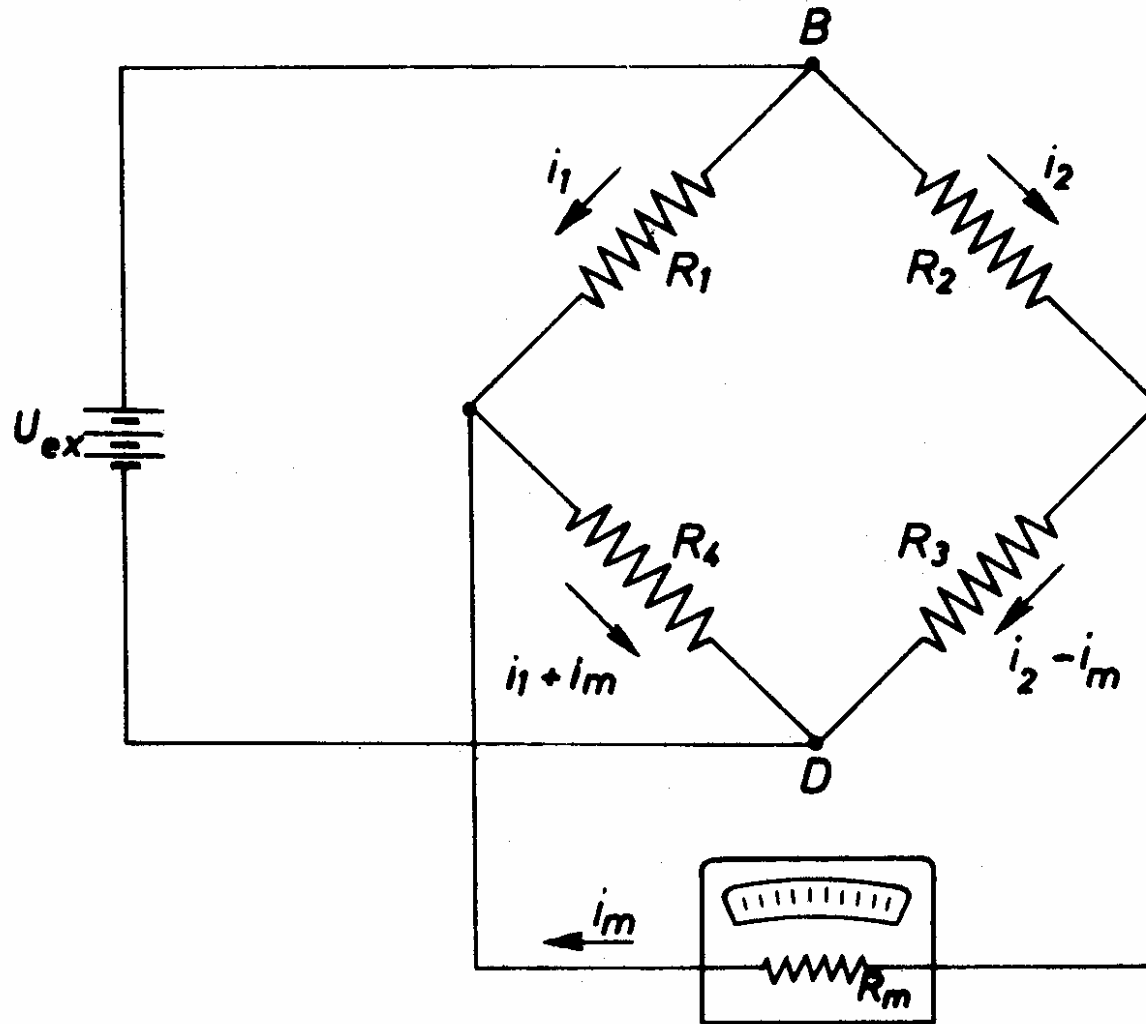
$$U_o = \ln U_i$$



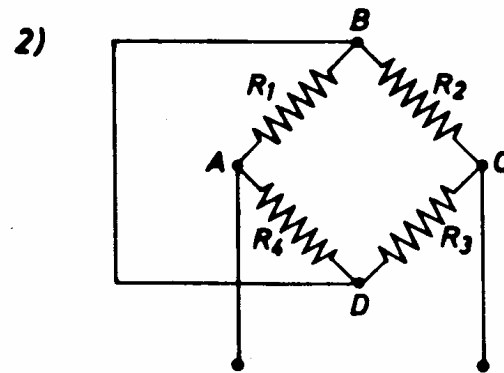
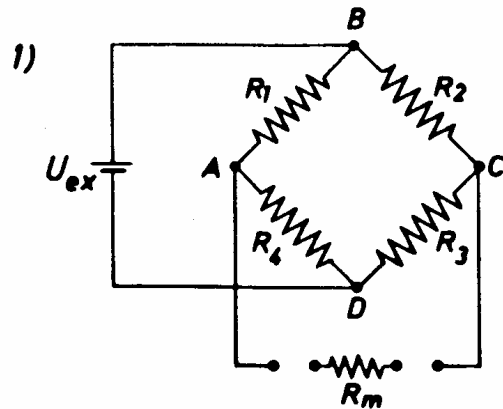
Operacijski ojačevalnik

$$U_o = \int_{t_o}^t U_i dt$$

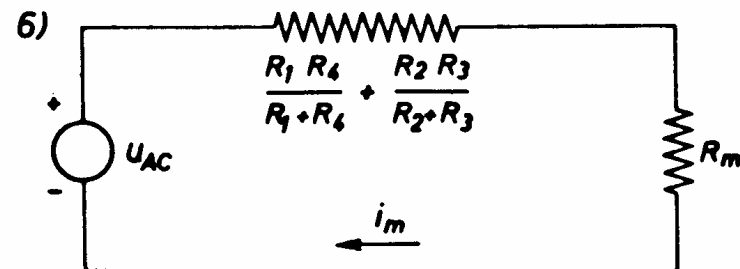
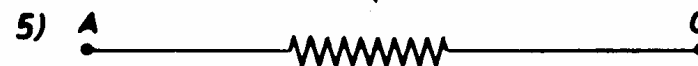
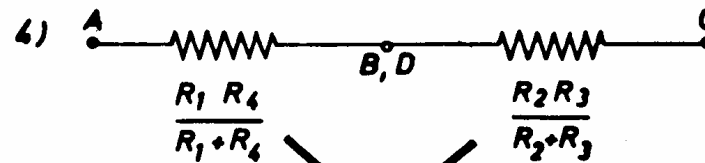
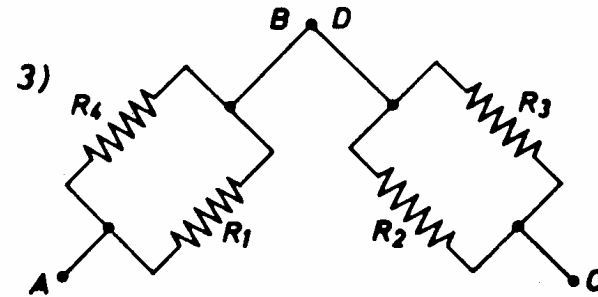
Wheatstonov mostič (1b)



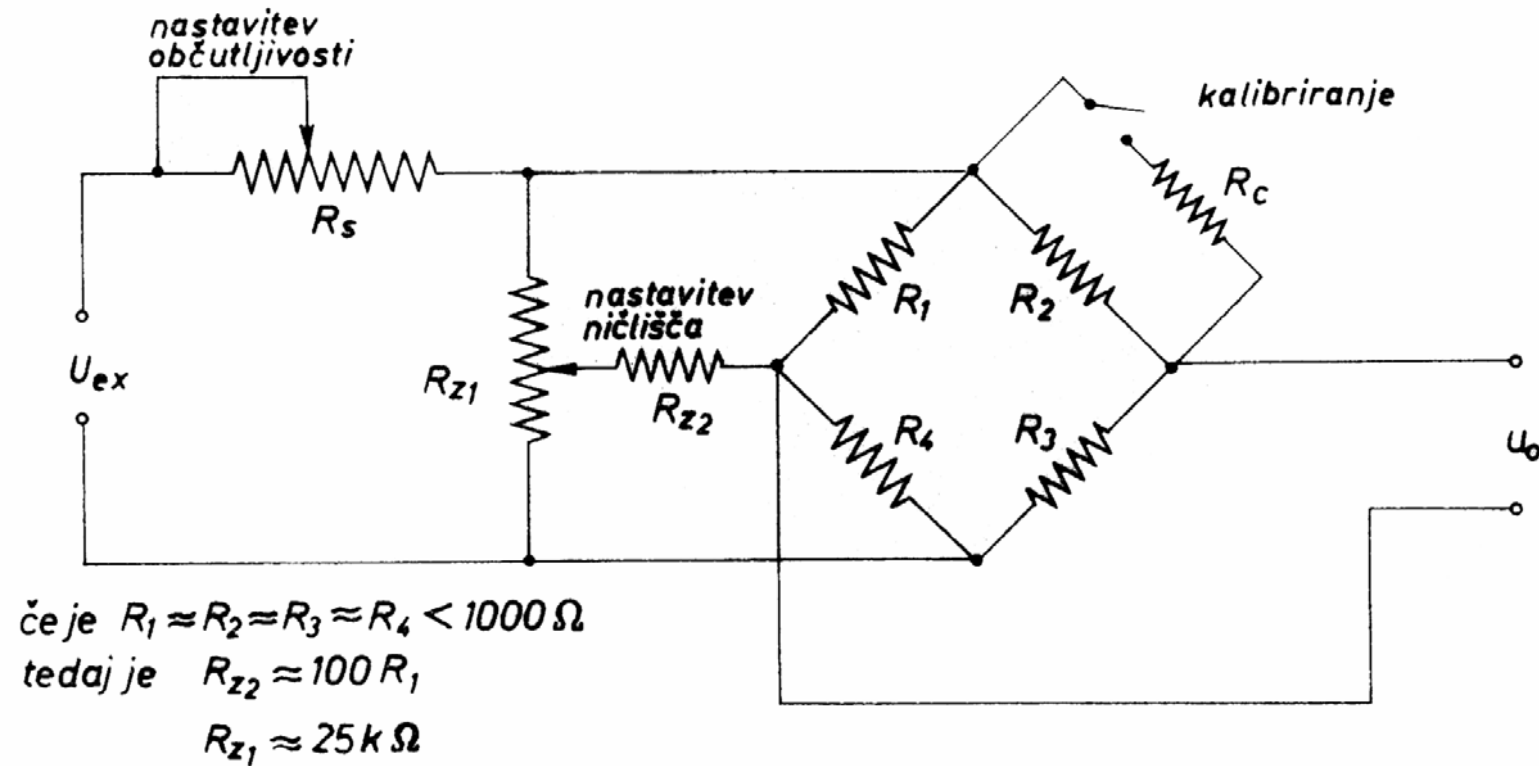
Theveninova analiza Wheatstonovega mostiča (1b)



Nadomesti baterijo z
njeno notranjo upornostjo
(\approx predpostavi enaka 0)

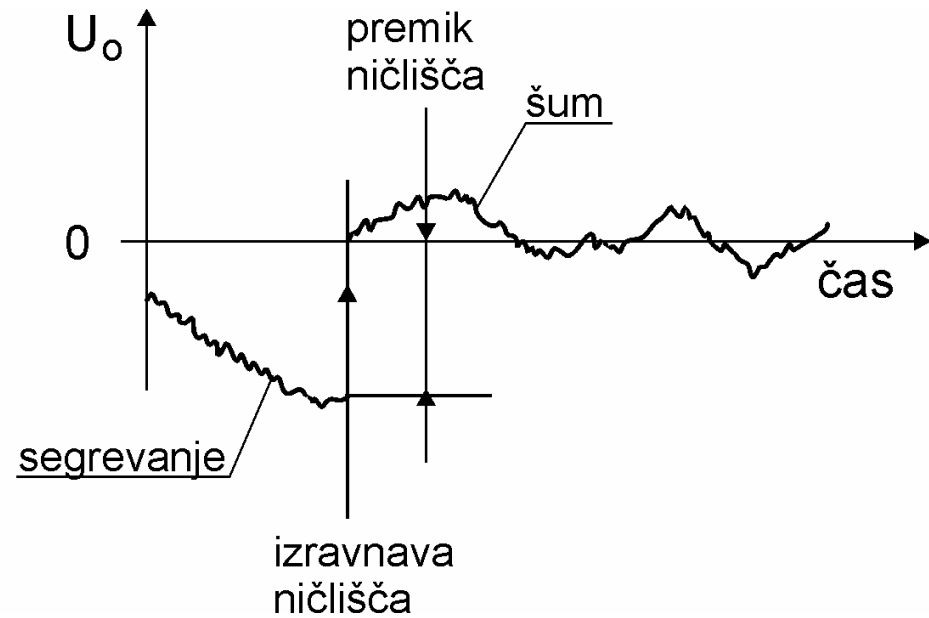
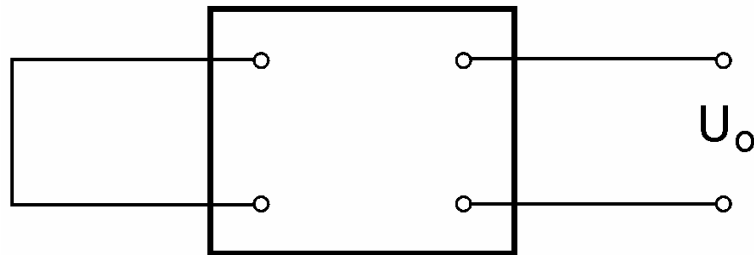


Elementi mostiča za nastavitve občutljivosti kalibriranja in ničlišča (1b)

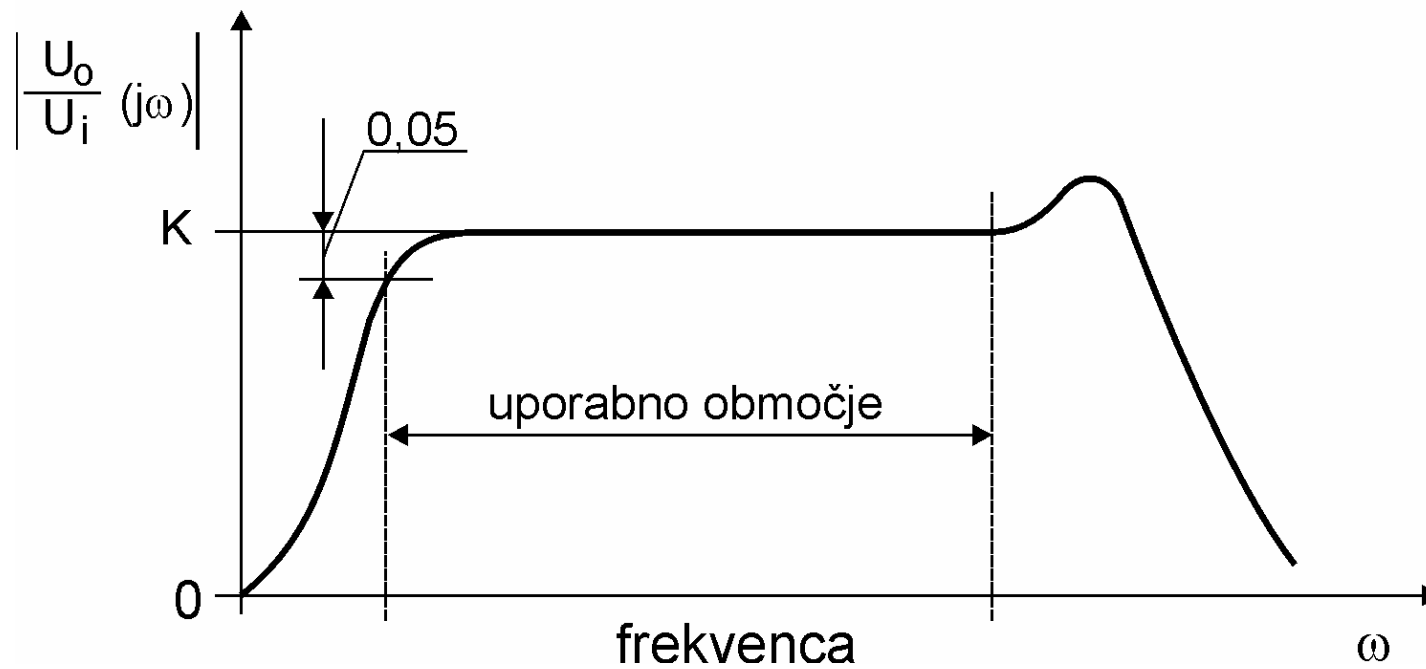
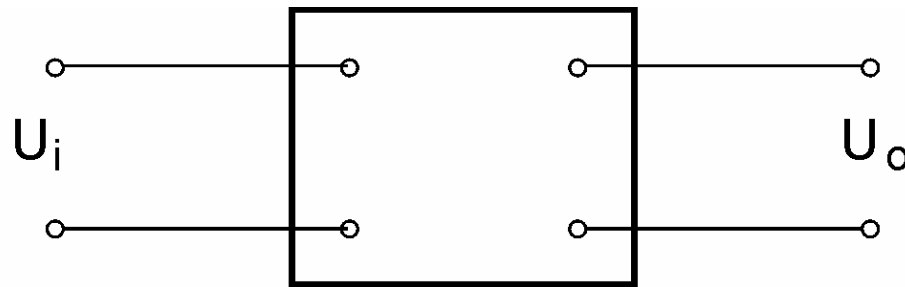


Premik ničlišča ojačevalnika in šumi

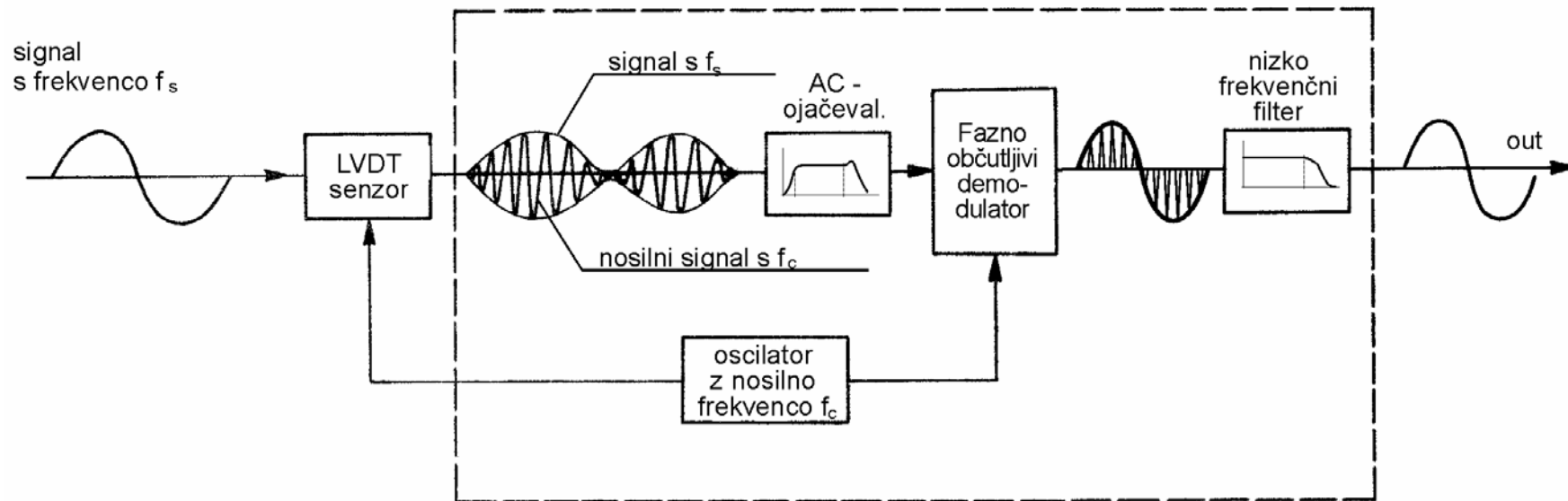
input v
kratkem stiku



Frekvenčni odgovor AC ojačevalnika



Ojačevalnik z nosilno frekvenco (amplitudna modulacija) (1c)



Tipična nosilna frekvenca $f_c = 2, 5, 10, 50$ kHz

Odziv LVDT sistema (amplitudna modulacija (1))

Poglejmo odziv LVDT sistema v časovnem prostoru

ako je merjena pot $x_i = x_{i0} \sin(\omega_i t)$

in napajalna (nosilna) napetost $U_c = U_{c0} \sin(\omega_c t)$, potem je modulirani signal sledeč:

$$U_M = K_L U_{c0} \sin(\omega_c t) x_{i0} \sin(\omega_i t) = K_L U_{c0} x_{i0} \sin(\omega_c t) \sin(\omega_i t) = \\ \frac{1}{2} K_L U_{c0} x_{i0} [\cos((\omega_c - \omega_i)t) - \cos((\omega_c + \omega_i)t)]$$

Pri tem smo označili $K_L = [(M_1 - M_2) / R_p]$.

Odziv LVDT sistema (amplitudna modulacija (2))

Modulirani signal je:

$$U_M = K_L x_{io} \sin(\omega_i t) U_{co} \sin(\omega_c t)$$

in fazno občutljivi demodulirani signal: $U_o = K_L x_{io} \sin(\omega_i t) |U_{co} \sin(\omega_c t)|$

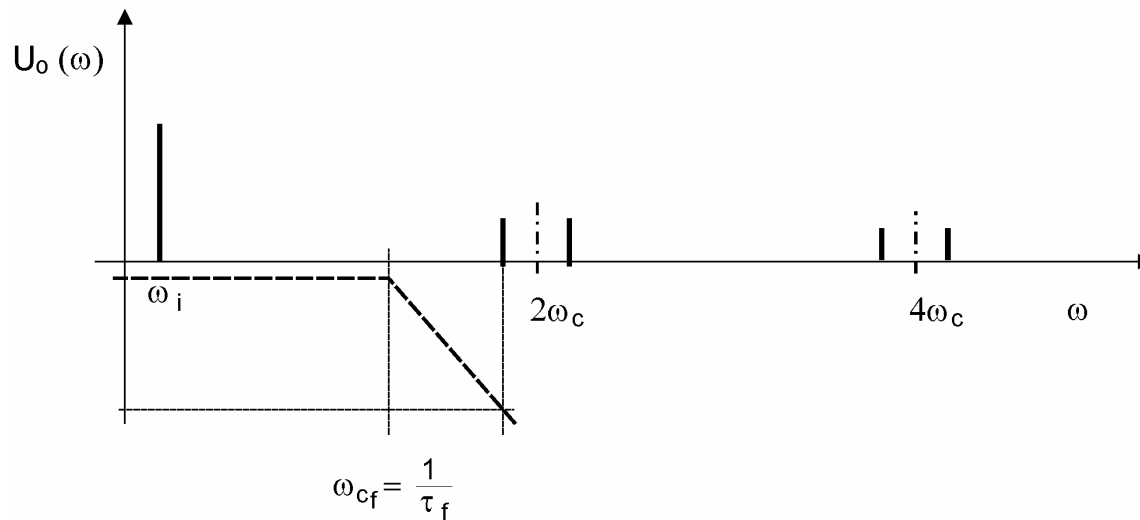
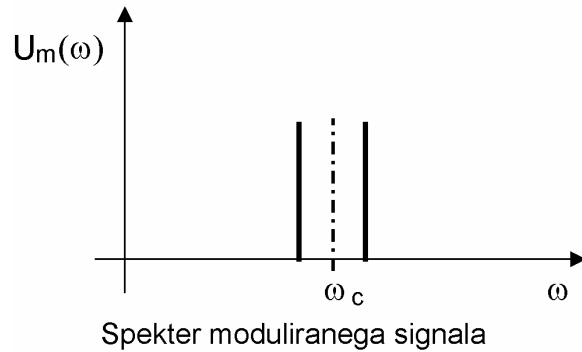
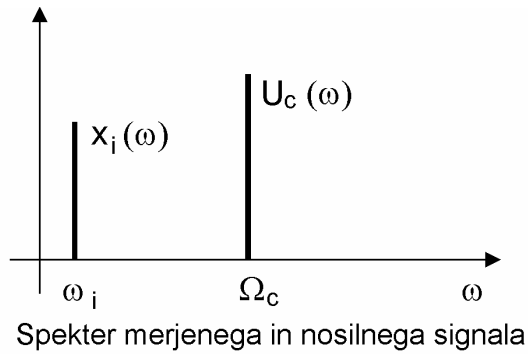
Ker je $|U_{co} \sin(\omega_c t)|$ periodična funkcija jo lahko izrazimo s Fourierjevo vrsto:

$$|U_{co} \sin(\omega_c t)| = \frac{2U_{co}}{\pi} \left(1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega_c t - \frac{2}{15} \cos 4\omega_c t + \dots + \frac{2}{1-4n^2} \cos 2n\omega_c t \right)$$

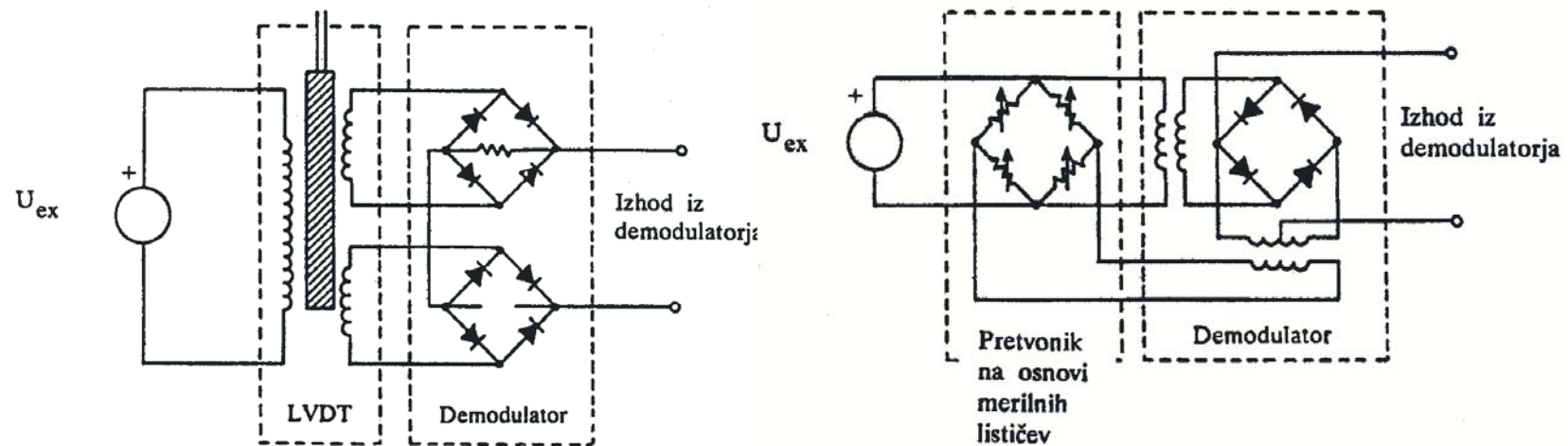
Sledi fazno občutljivi demodulirani signal:

$$U_o = \frac{2K_L x_{io} U_{co}}{\pi} \sin \omega_i t - \frac{2K_L x_{io} U_{co}}{3\pi} [\sin(2\omega_c + \omega_i)t - \sin(2\omega_c - \omega_i)t] - \dots$$

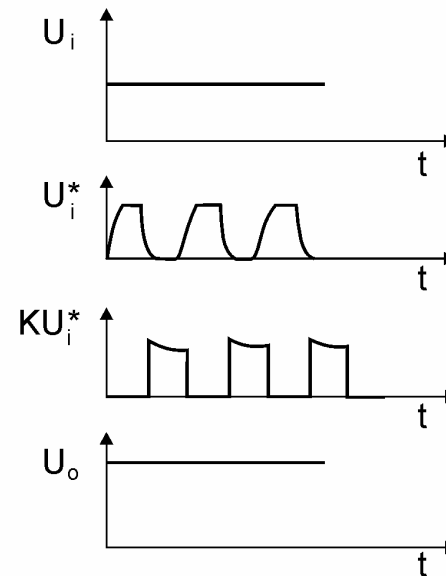
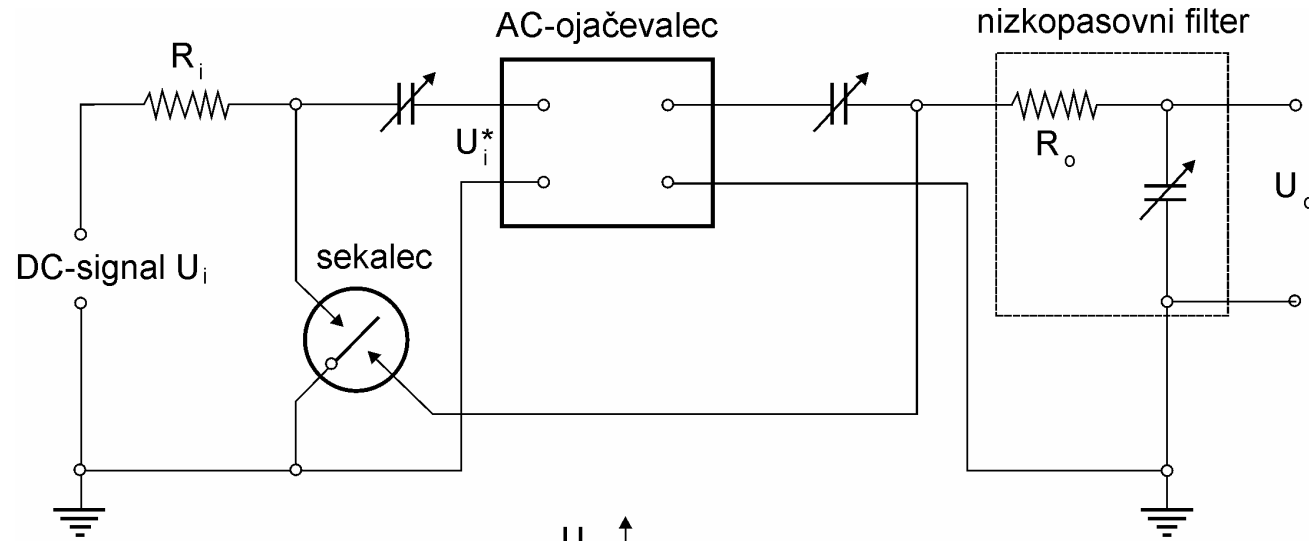
Odziv LVDT sistema v frekvenčnem prostoru (amplitudna modulacija (3))



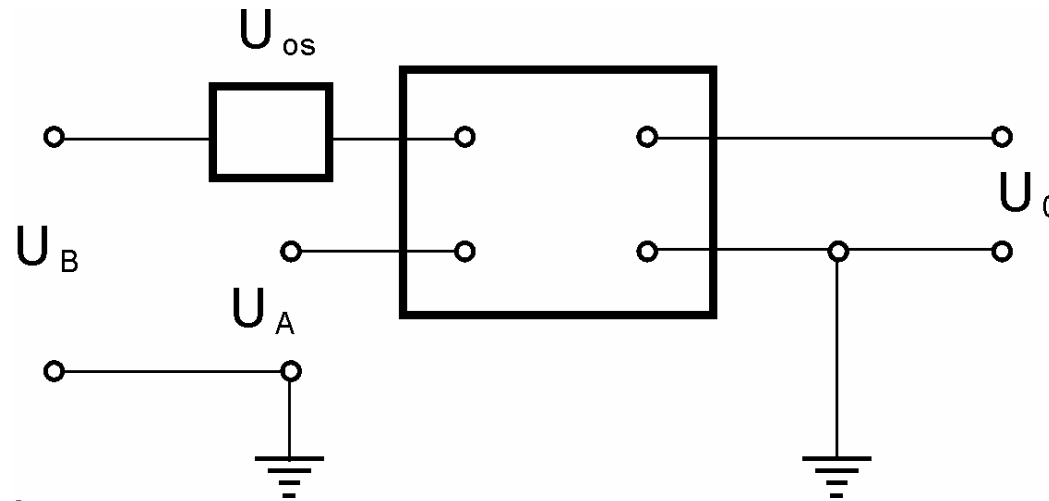
Struktura demodulatorja za senzorje vrste LVDT in merilnih trakov



DC - ojačevalnik z sekalcem (1d)



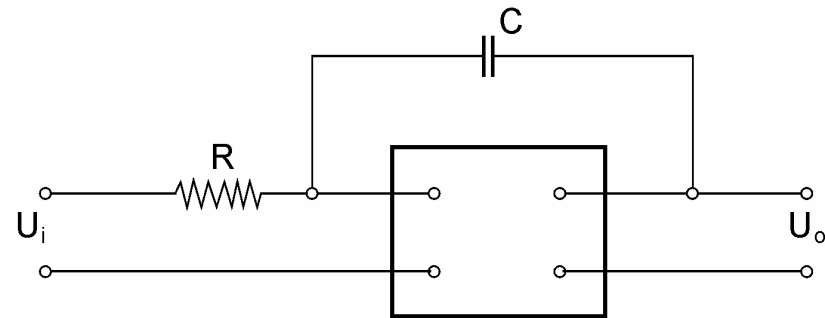
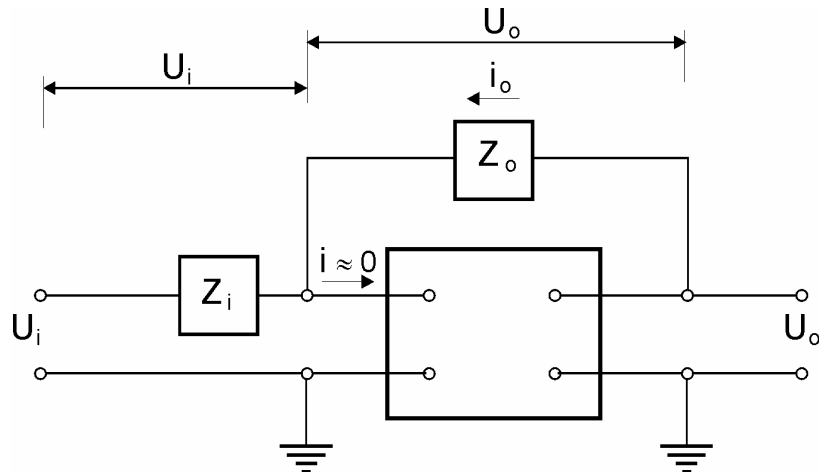
Operacijski ojačevalnik – izhodišče (1e)



$$U_0 = (U_A - U_B - U_{os}) A$$

Karakteristika	Idealna vrednost	Tipična vrednost
Faktor ojačanja A	∞	100 000 V/V
Ofset napetost U_{os}	0	$\pm 1\text{mV}$
Inputna impedanca	∞	10^5 do $10^{11}\Omega$
Outputna impedanca	0	1 do $10\ \Omega$

Operacijski ojačevalnik (1e)



$$\frac{U_o}{U_i}(D) = -\frac{Z_o}{Z_i}$$

Z_o – operacijska impedanca izhoda

$$Z_o = \frac{U_o}{i_o}(D) = \frac{1}{CD}$$

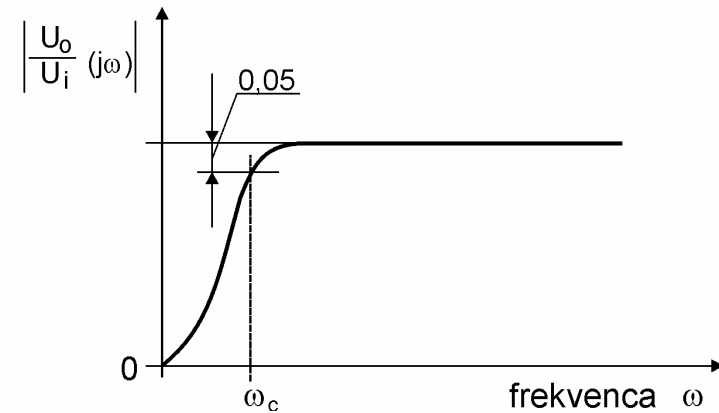
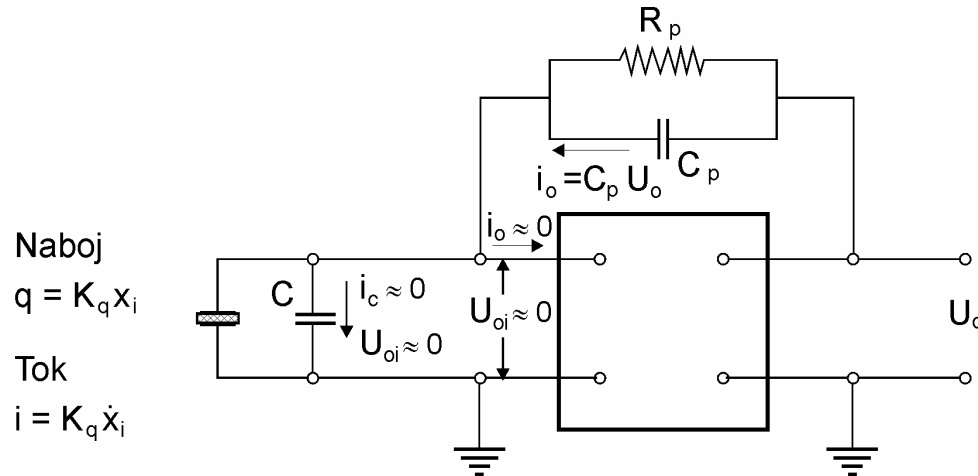
Sledi
$$\frac{U_o}{U_i}(D) = -\frac{1}{RCD}$$

Z_i – operacijska impedanca vhoda

in
$$U_o = -\frac{1}{RC} \int U_i dt$$

$$Z_i = \frac{U_i}{i_i}(D) = R$$

Ojačevalnik naboja (1f)



Če je inputna napetost $U_{oi} \approx 0$ in $i_o \approx 0$ dobimo:

$$K_q D x_i = -C_p D U_o \rightarrow U_o = -\frac{K_q x_i}{C_p}$$

transferna funkcija

$$\frac{U_o}{x_i}(D) = \frac{K \tau D}{\tau D + 1} ;$$

občutljivost

$$K = \frac{K_q}{C_p} ;$$

časovna konstanta

$$\tau = R_p C_p$$

za kremenčev senzor je $C_p \approx 10^1 \div 10^5 \text{ pF}$;

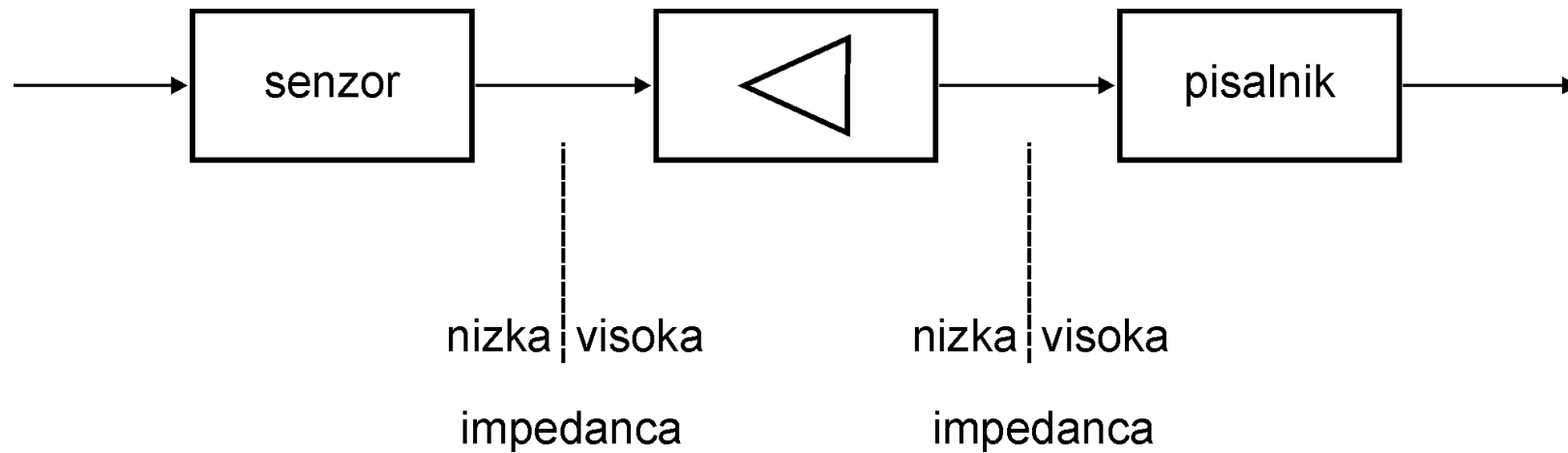
$R_p \approx 10^{10} \div 10^{14} \Omega$

za keramične senzorje je $C_p \approx 10^1 \div 10^3 \text{ pF}$;

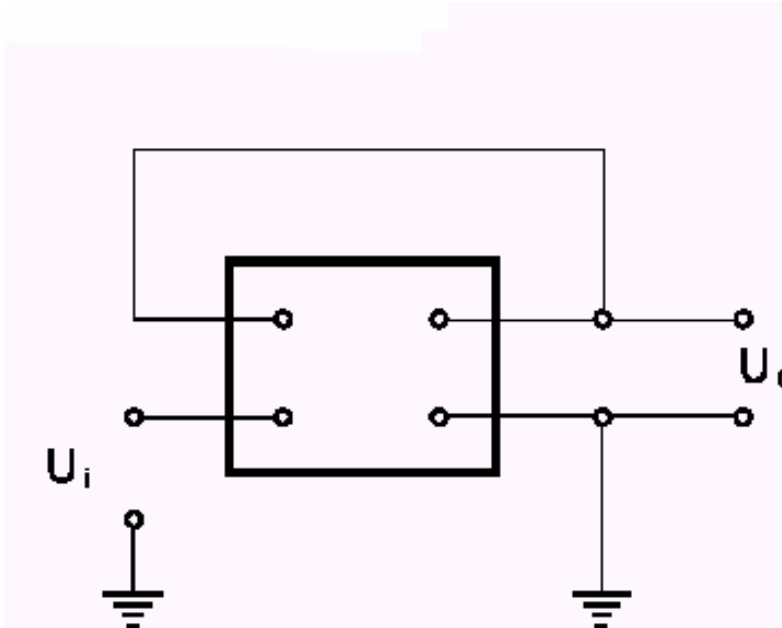
$R_p \approx 10^8 \div 10^{10} \Omega$

Impedančne značilnosti

inputna impedanca \gg outputna impedanca



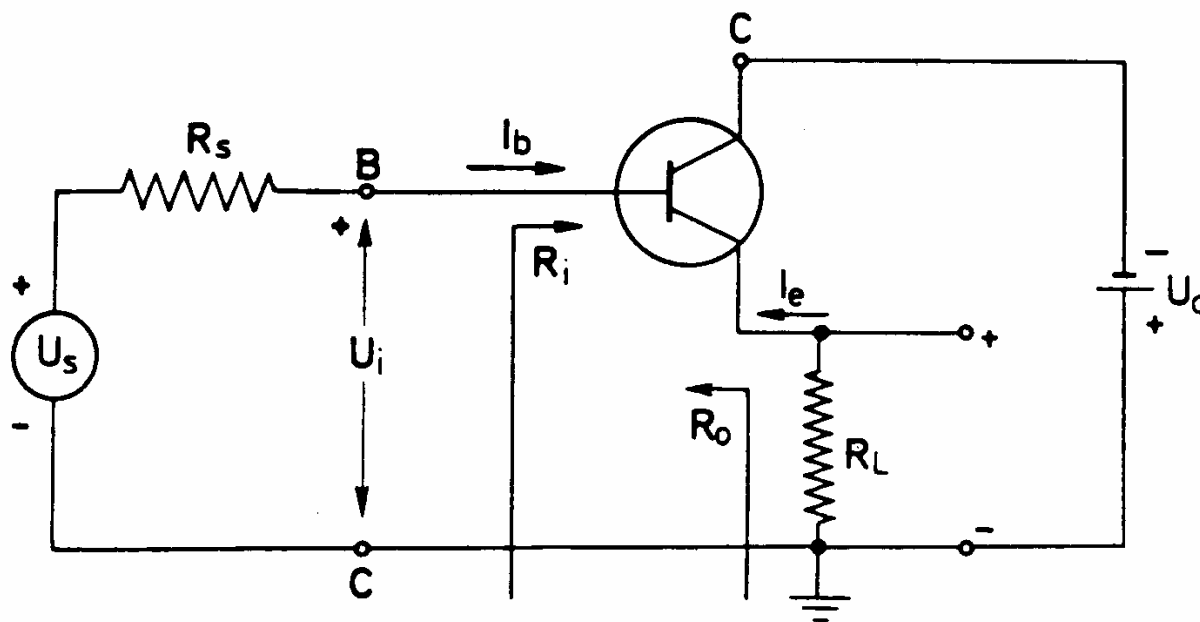
Sledilec napetosti (močnostna ojačitev / vmesni ojačevalnik (1g))



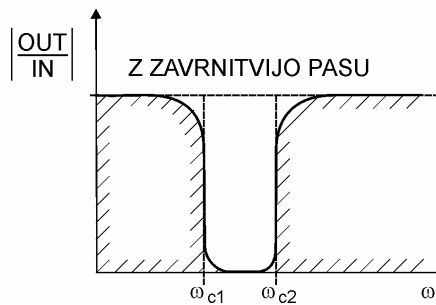
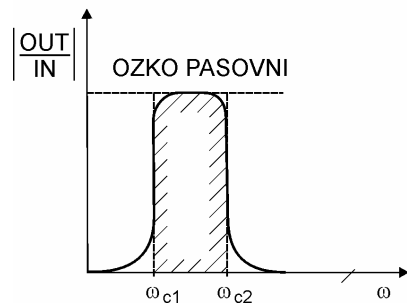
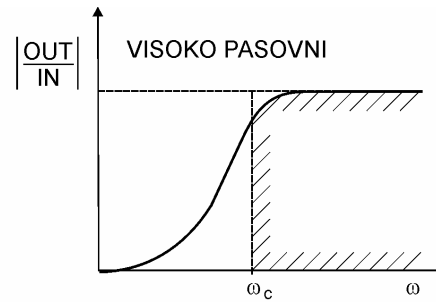
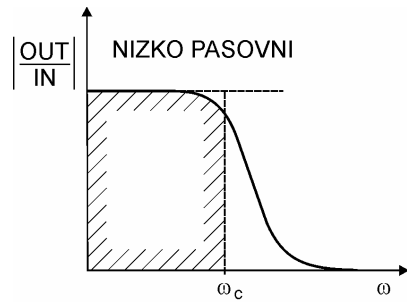
$$U_0 = (U_i - U_0 - 0) \infty$$

$$\frac{U_0}{\infty} = 0 = U_i - U_0 \rightarrow U_0 = U_i$$

Električna shema emitrskega sledilca napetosti (1g)



Vrste filtrov in lastnosti (2a)



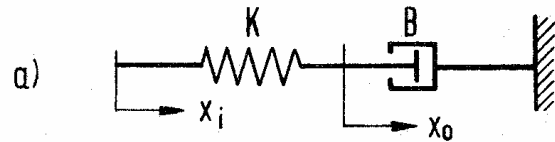
Nizko pasovni filter

$$\frac{U_o}{U_i}(D) = \frac{1}{1 + \tau D}$$

Visoko pasovni filter

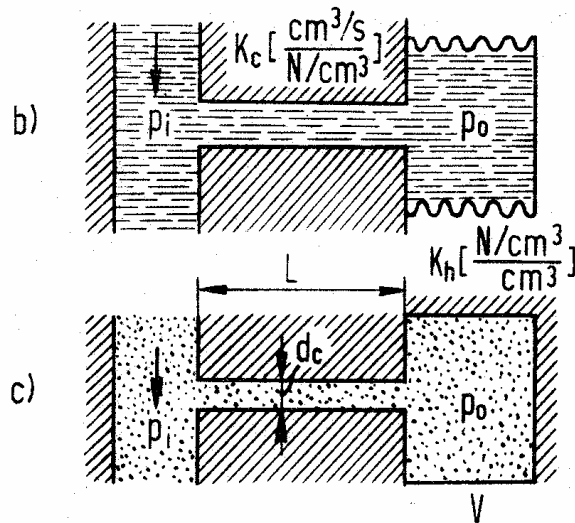
$$\frac{U_o}{U_i}(D) = \frac{\tau D}{1 + \tau D}$$

Nizko pasovni filtri (2b)



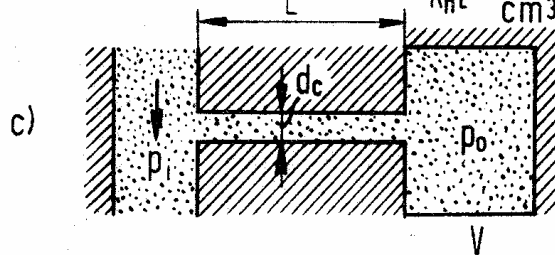
MEHANSKI
FILTER

$$\tau = \frac{B}{K}$$



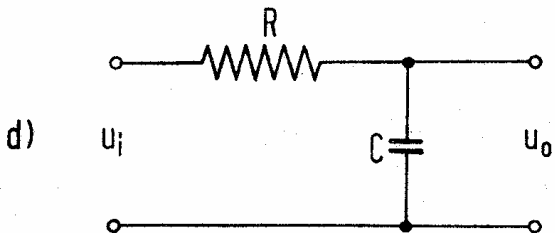
HIDRAVLICNI
FILTER

$$\tau = \frac{1}{K_n K_c}$$



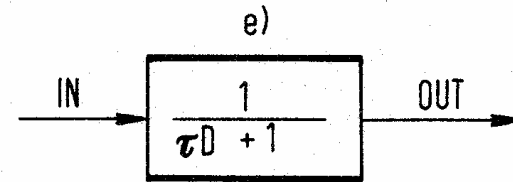
PNEVMATICNI
FILTER

$$\tau = \frac{128 \mu L V}{\pi \gamma p d_c^3}$$



ELEKTRICNI
FILTER

$$\tau = RC$$

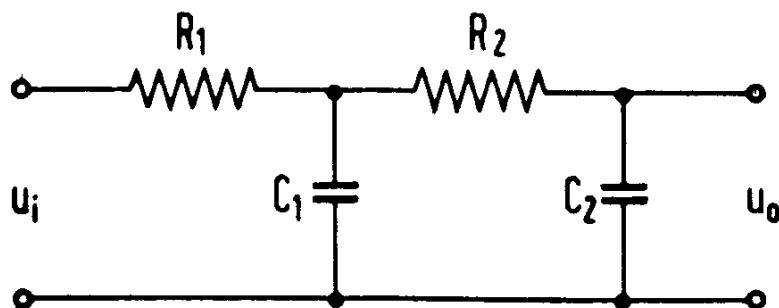


μ = viskoznost

γ = razmerje spec. toplot

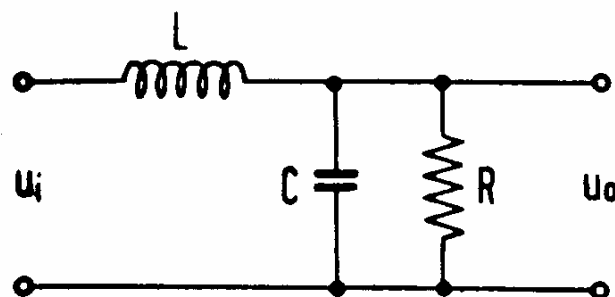
p = povprečni pritisk

Nizko pasovni filtri z ostrejšo karakteristiko (2c)



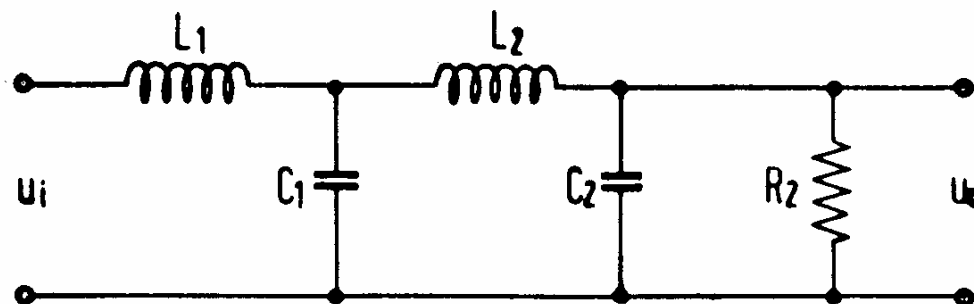
VEZAVA RC - ENOT

TE KOMBINACIJE ($R_1 C_1, R_2 C_2, R_3 C_3$)
SE LAHKO PONAFLJAJO

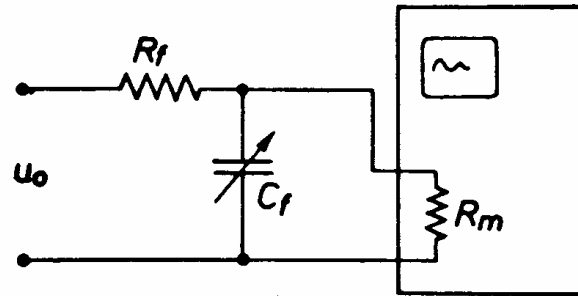


VEZAVA LCR - ENOT

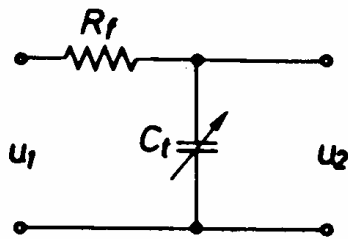
TE KOMBINACIJE ($L_1 C_1, L_2 C_2 \dots$)
SE LAHKO PONAFLJAJO



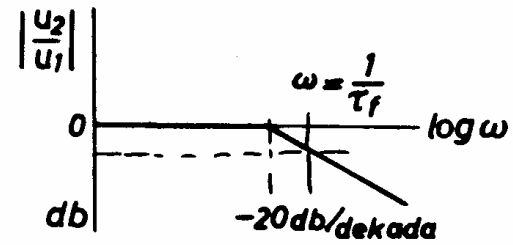
Frekvenčni odgovor RC-filtrov (2e)



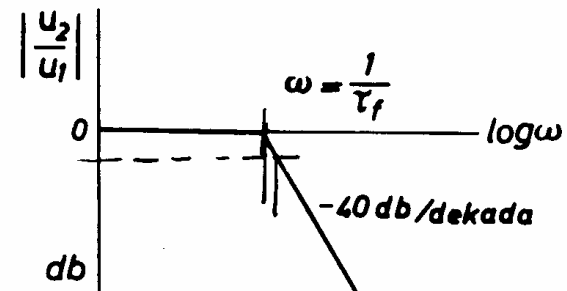
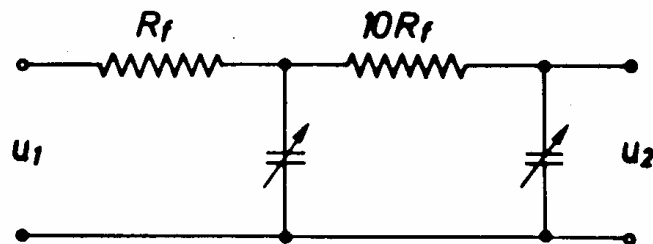
enojni RC-filter



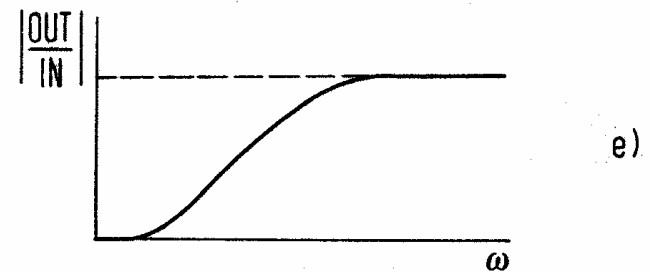
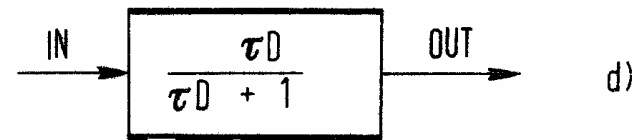
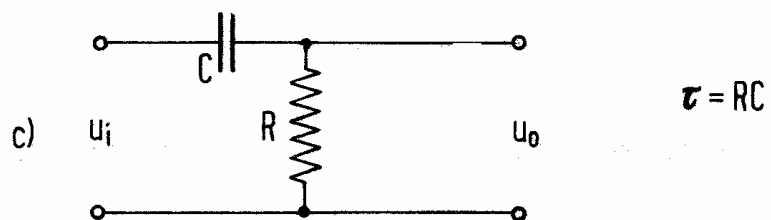
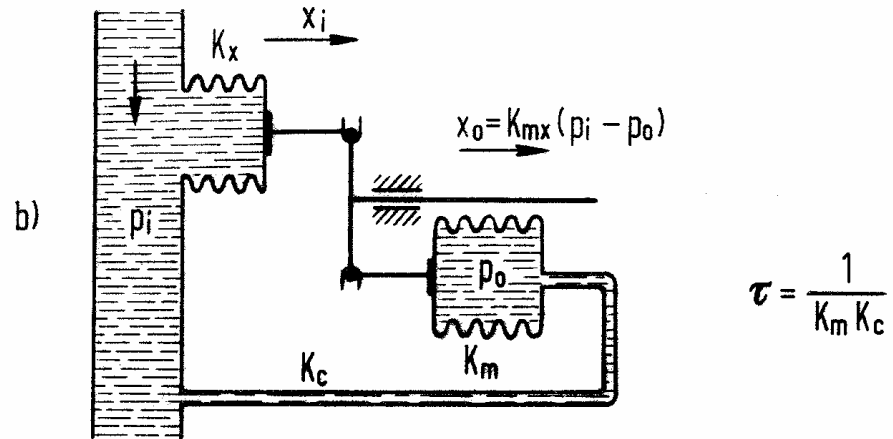
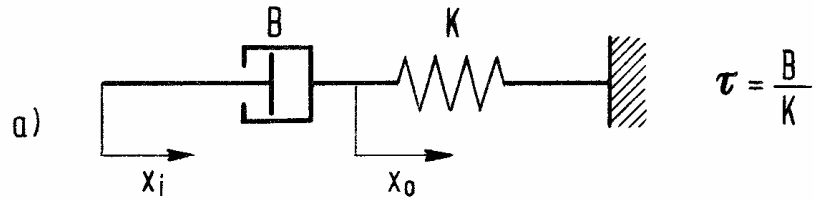
$$\frac{u_2}{u_1}(i\omega) = \frac{1}{i\omega R_f C_f + 1}$$



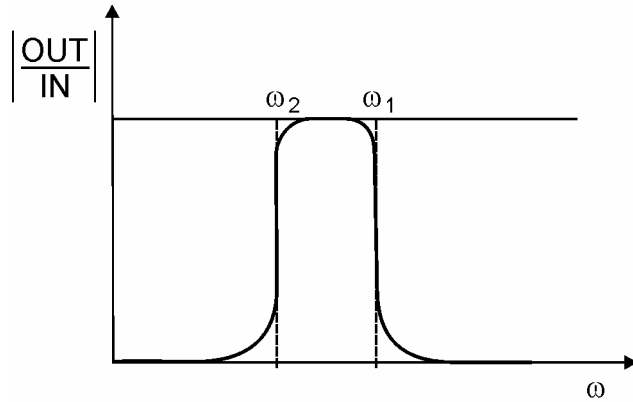
dvojni RC - filter



Visoko pasovni filter (2c)



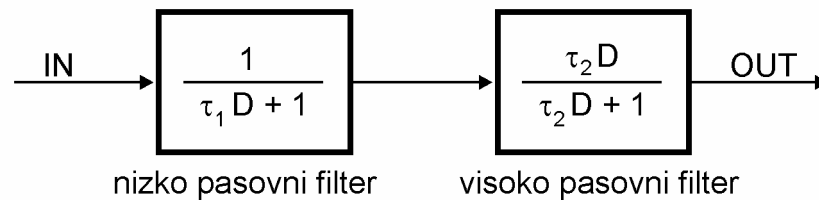
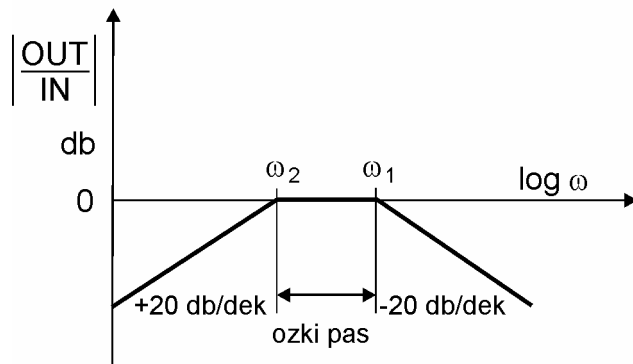
Ozko pasovni filter (2d)



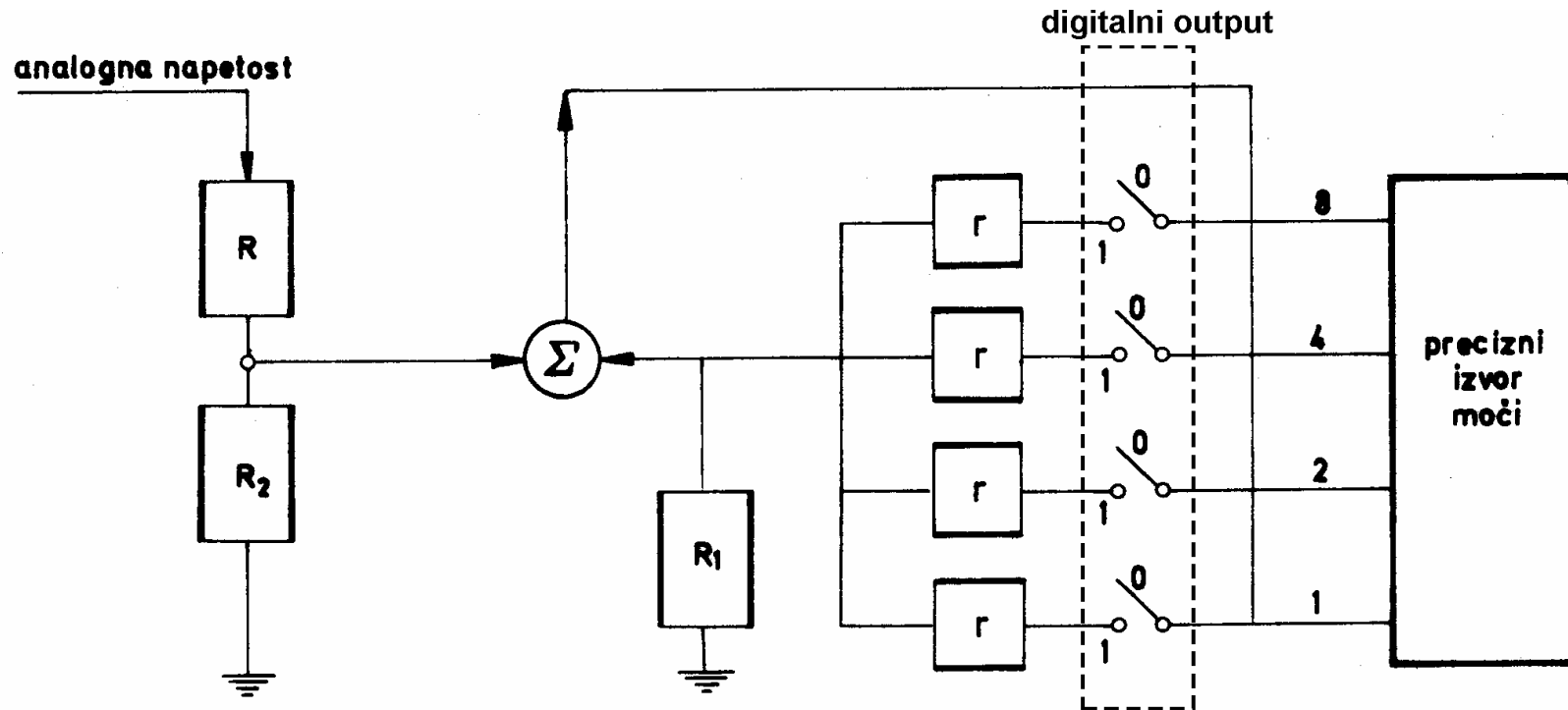
$$\omega_1 = \frac{1}{\tau_1}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\tau_2}$$

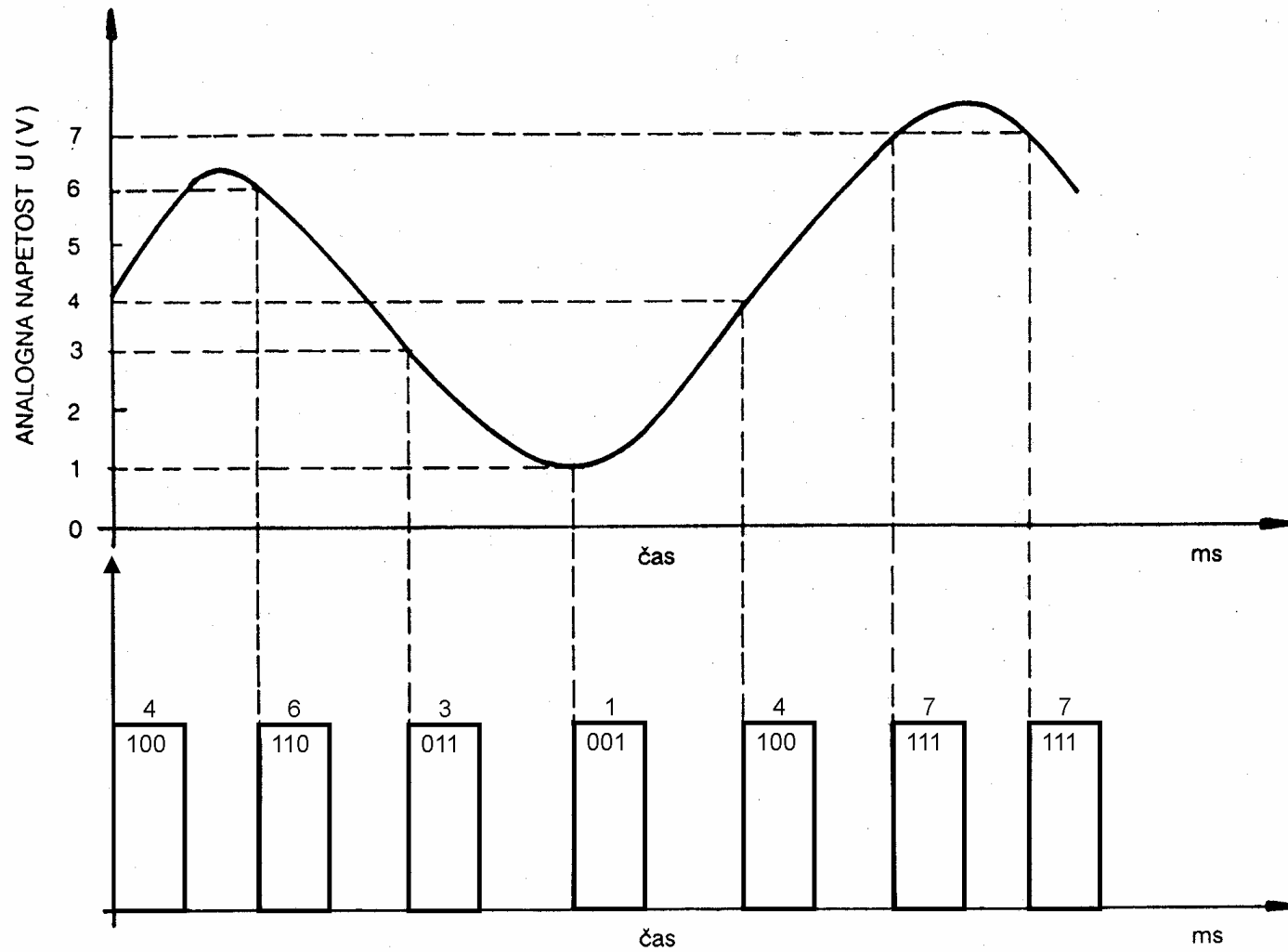
Pogoj: $\tau_2 > \tau_1$



AD pretvornik za pretvorbo in manipulacijo signalov (3)

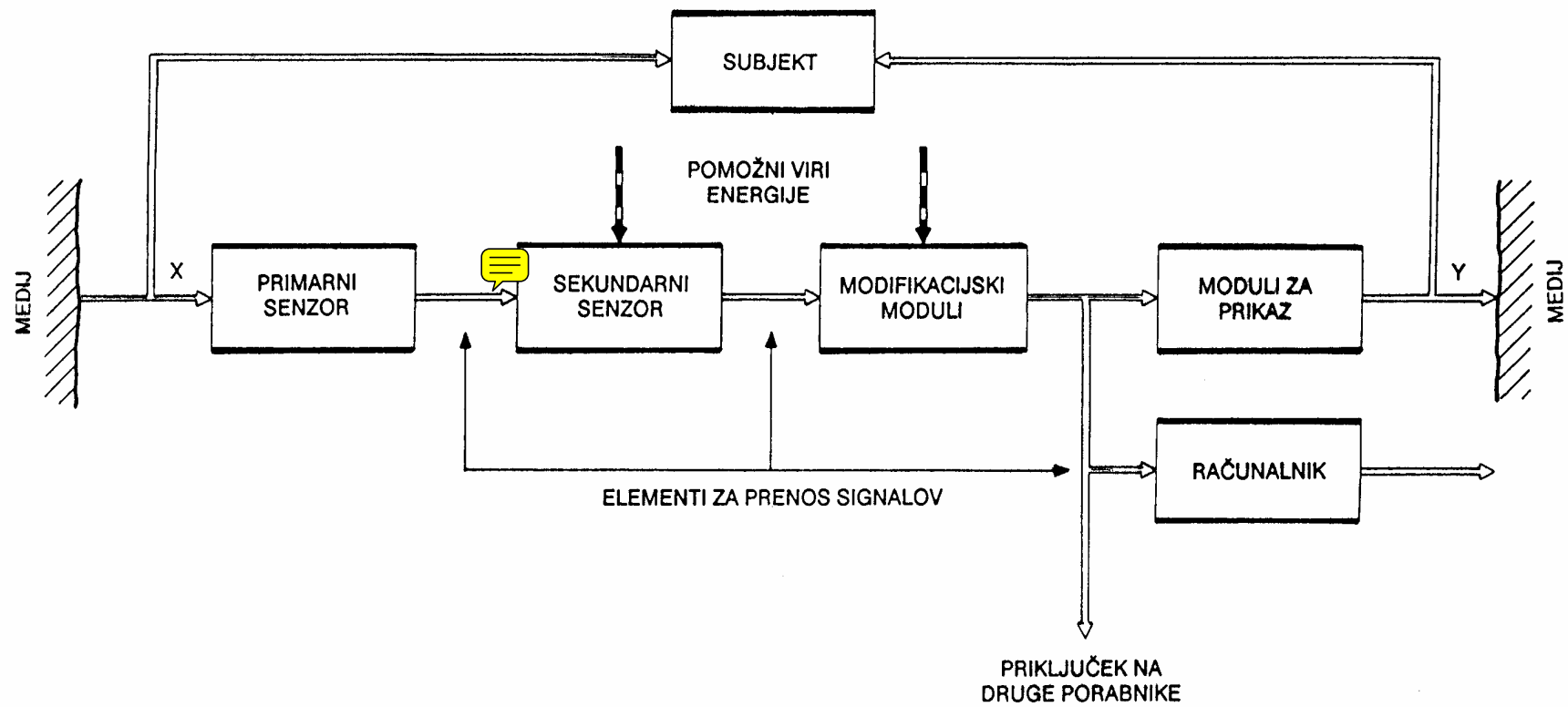


Transformacija analognega signala v digitalnega (3)



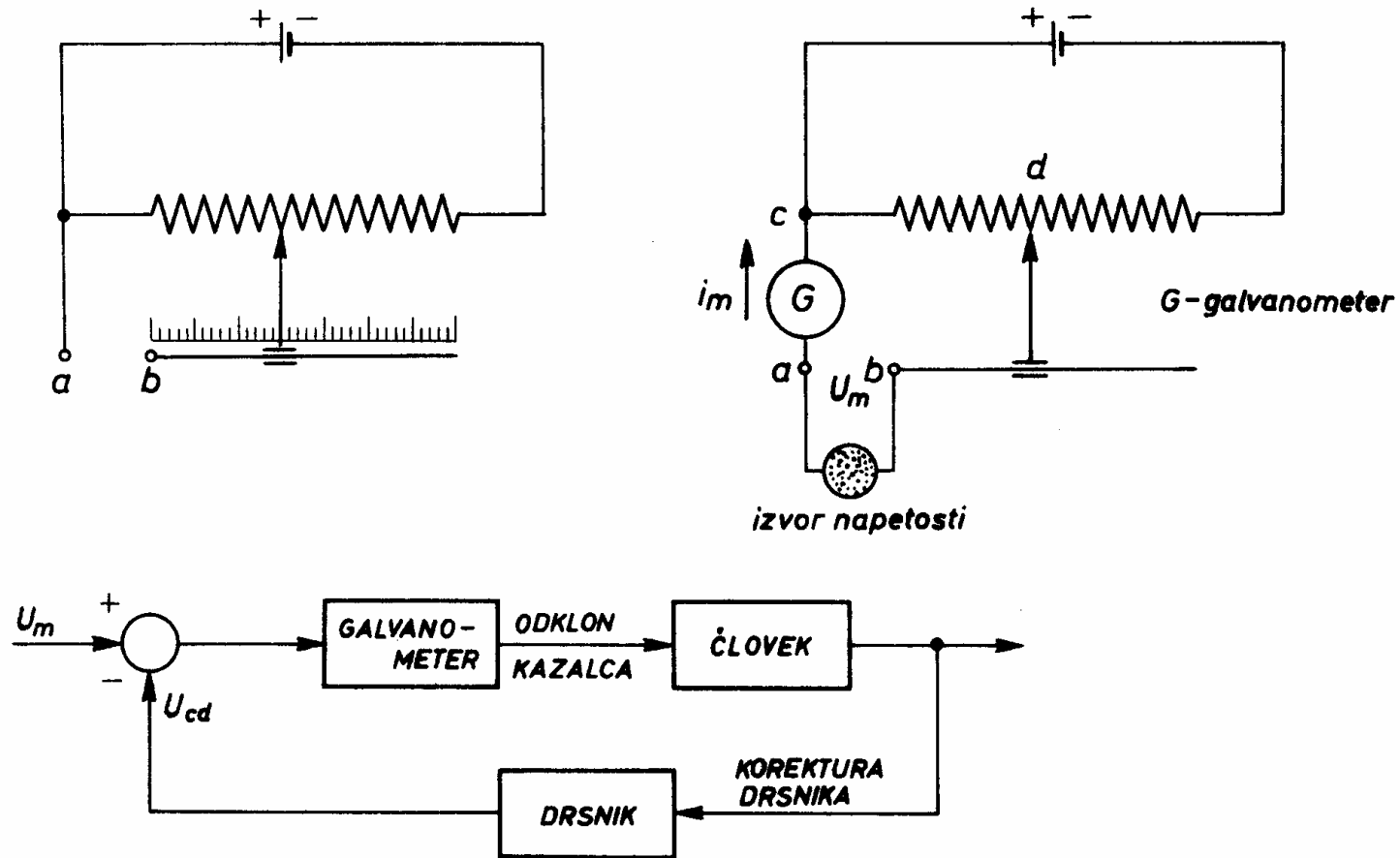
8. Elementi za prikaz signalov

Struktura merilnega sistema

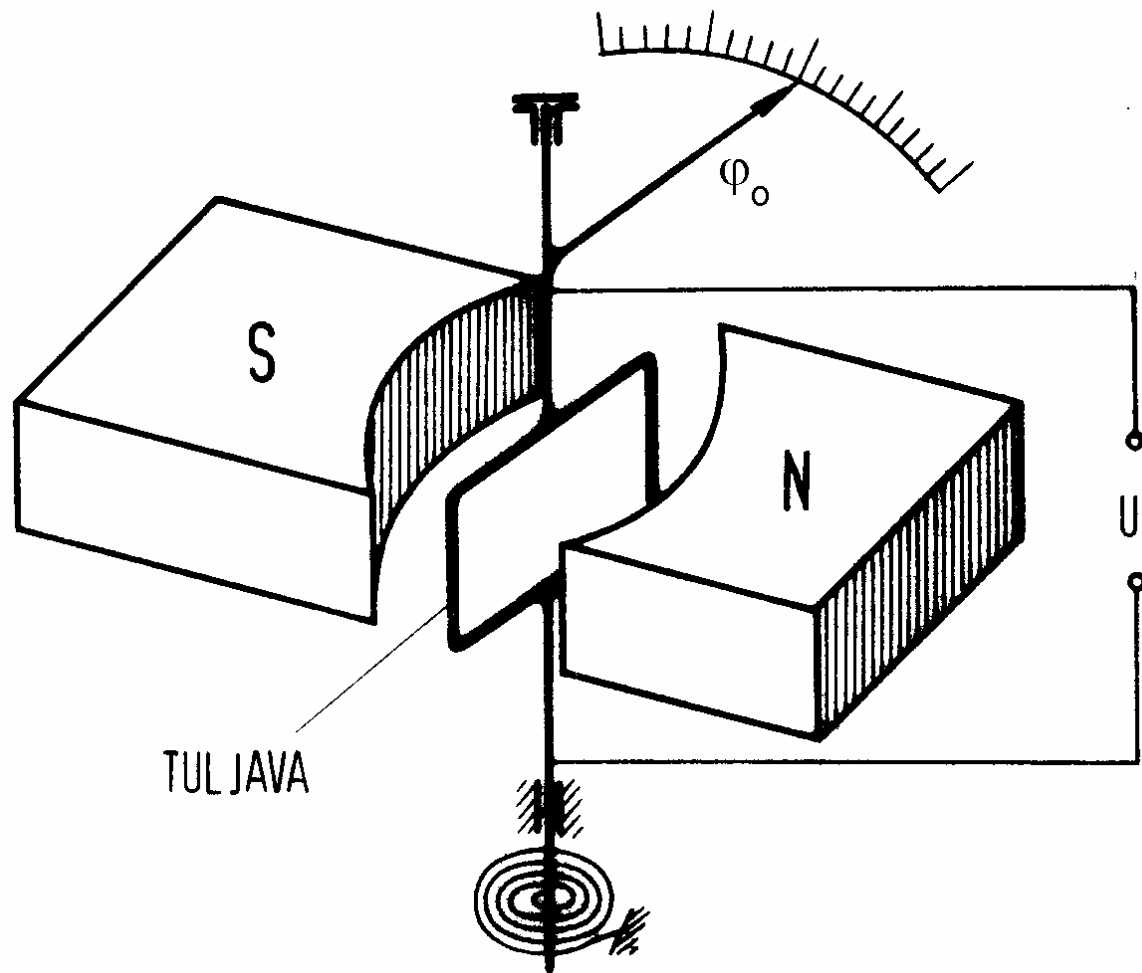


Vir: Peklenik

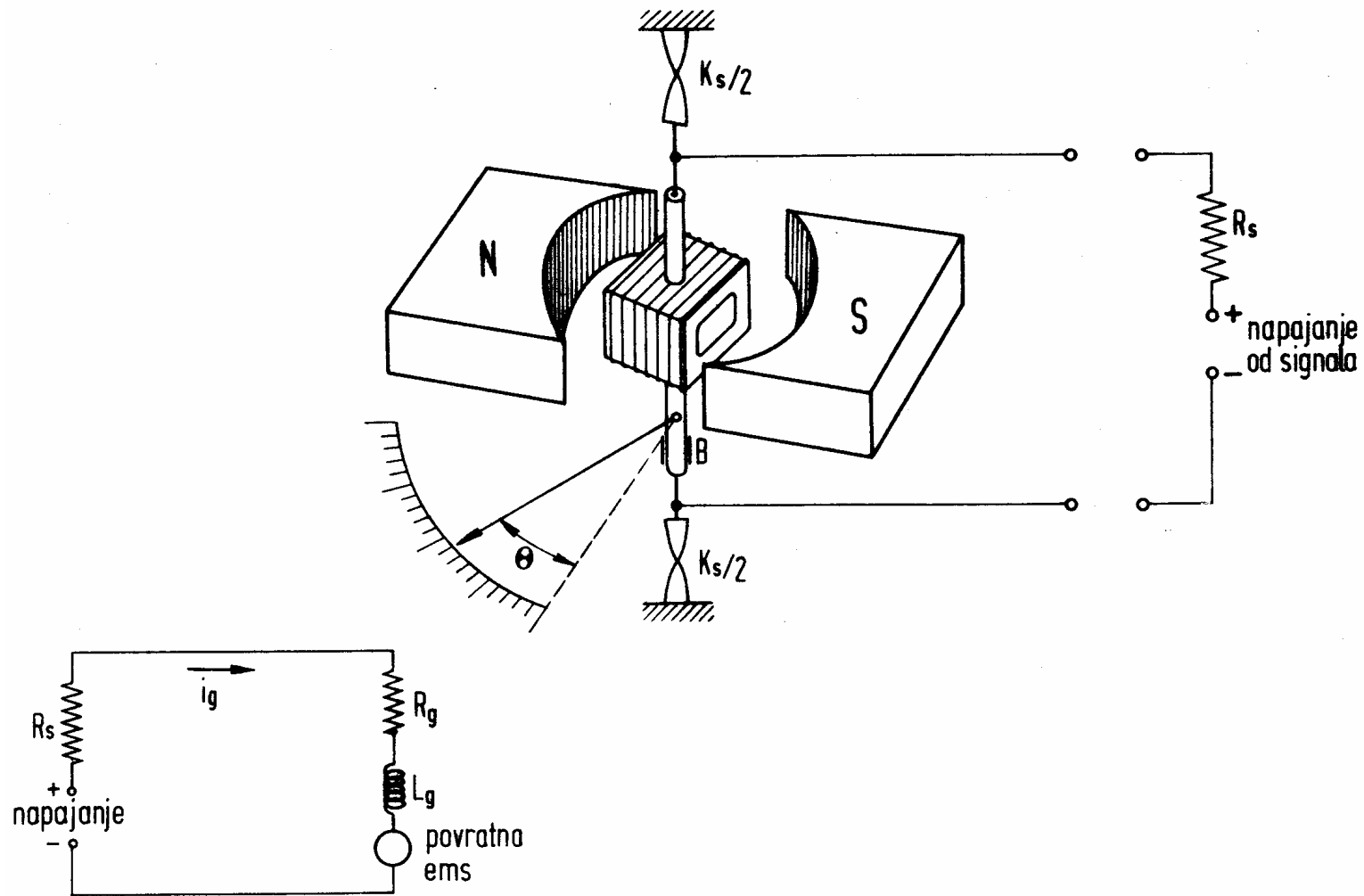
Merjenje napetosti na potenciometru



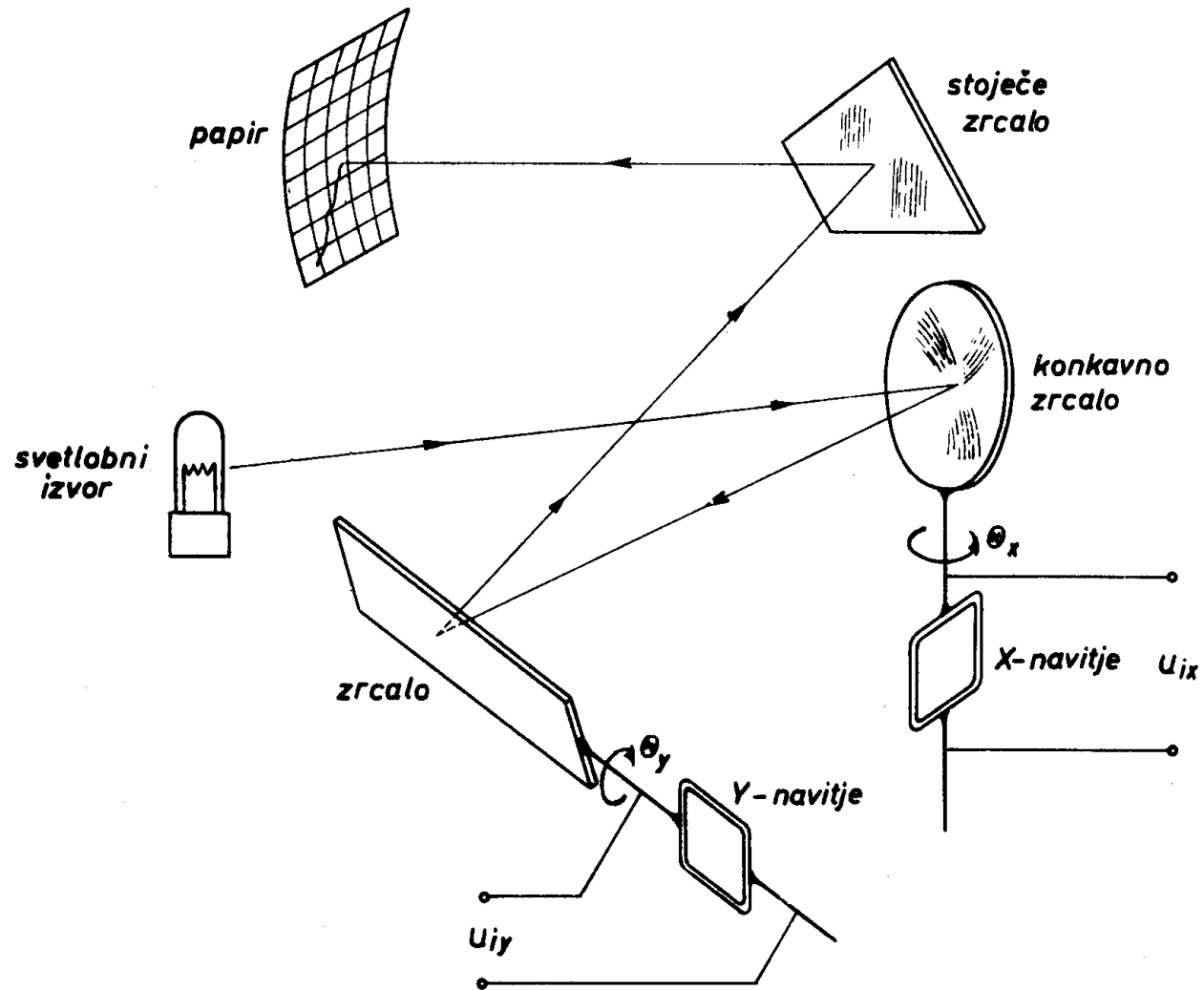
Analogni DC-ampermeter (D' Arsenalovo gibanje)



Galvanometer



X-Y galvanometer



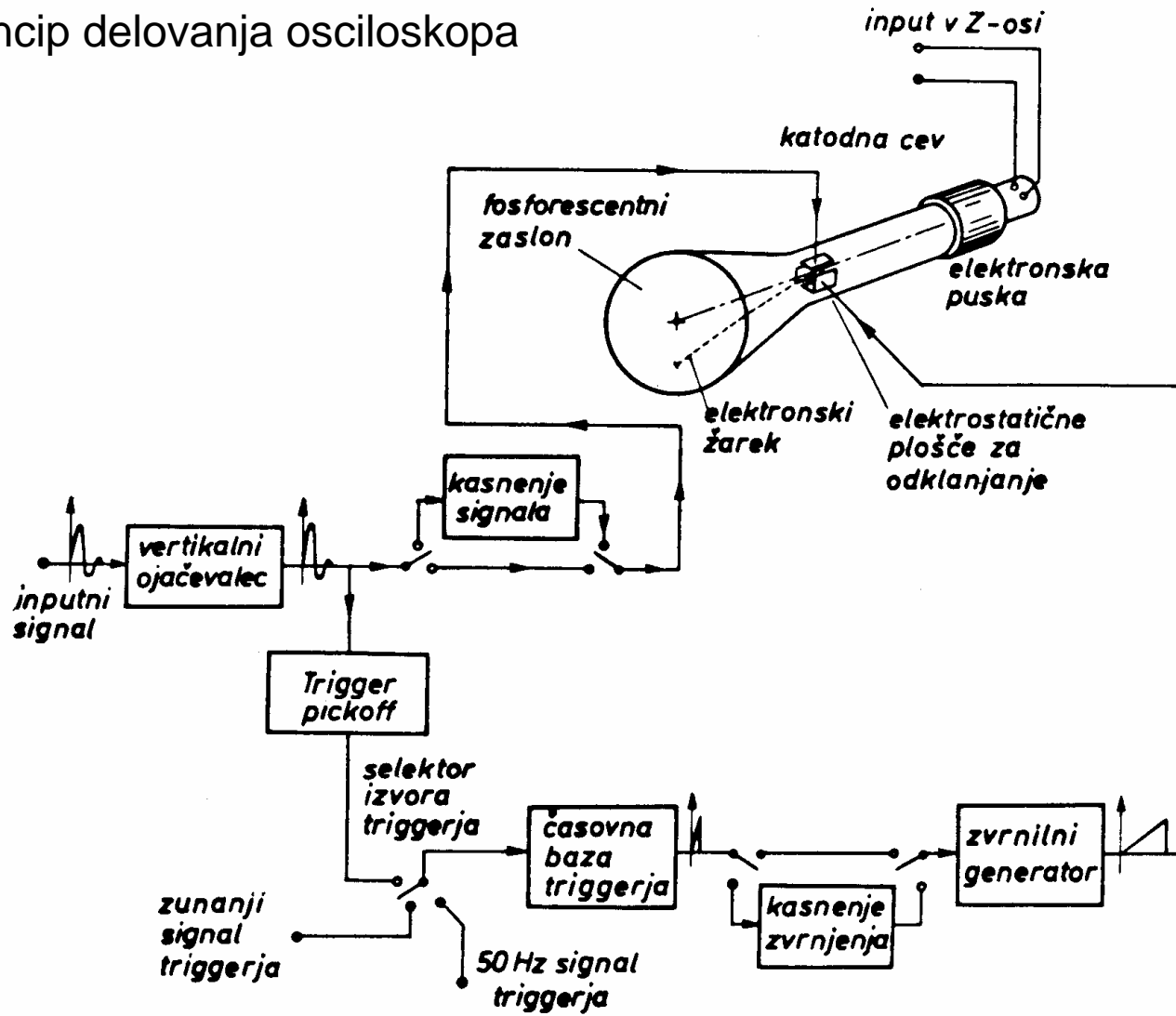
Družini galvanometrov

	Nedušena lastna frekvenca Hz	Frekvenčni odgovor $\pm 5\%$ Hz	Zunanja upornost za opt. dušenje ohm	Upornost tuljave ohm	Občutljivost mm/mA	Max. odklon $\pm 2\%$ nelinear. mm
Elektromagnetno dušenje	40	0 - 24	120	20	340	200
	40	0 - 24	350	35	562	200
	100	0 - 60	120	32	227	200
	100	0 - 60	350	67	400	200
	200	0 - 120	120	53	110	200
	400	0 - 240	120	116	30	200
Tekočinsko dušenje	1000	0 - 600	} 20 ÷ 1000	37	0,89	200
	1650	0 - 1000		25	0,27	200
	3300	0 - 2000		31	0,10	150
	5000	0 - 3000		37	0,06	87
	8000	0 - 4000		33	0,07	50

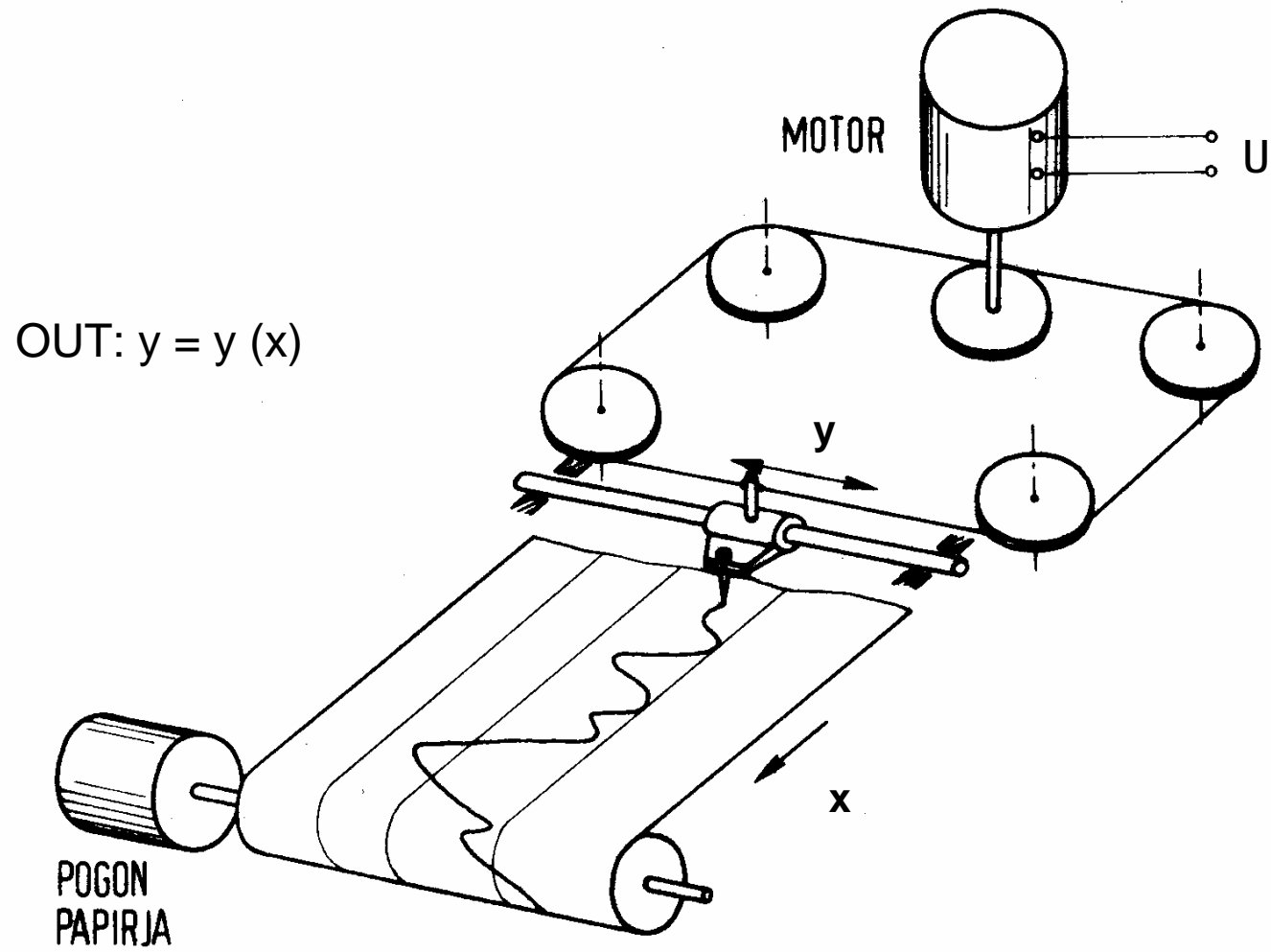
Vir: Honeywell

Osciloskop

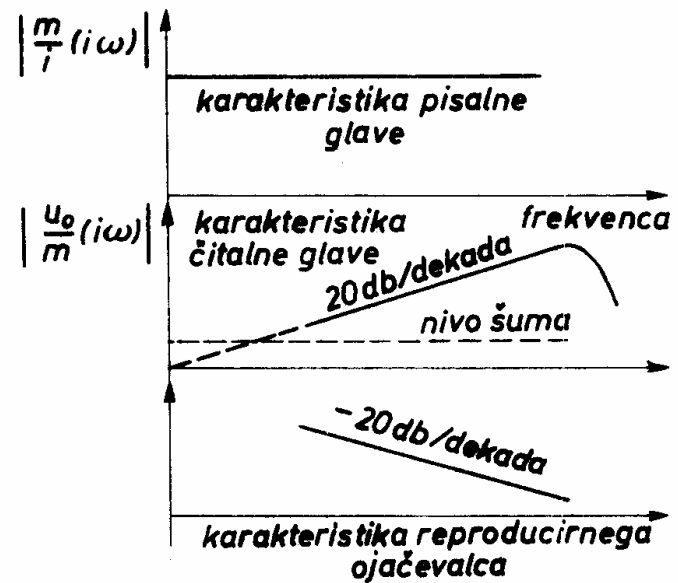
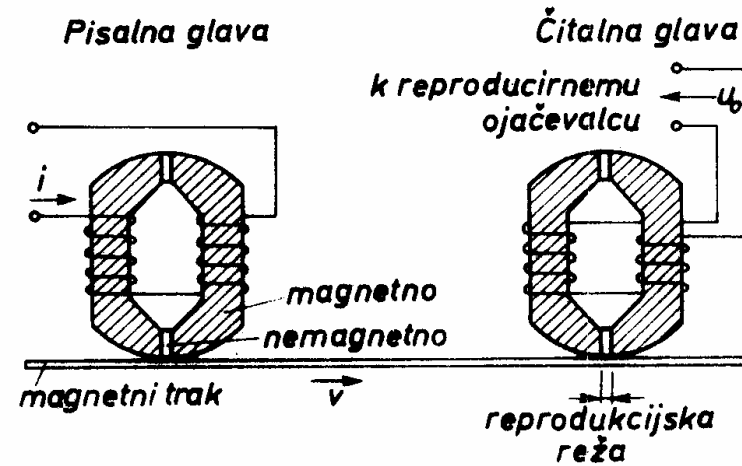
Princip delovanja osciloscopa



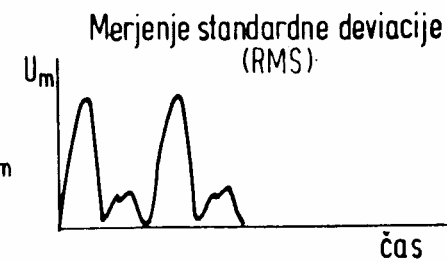
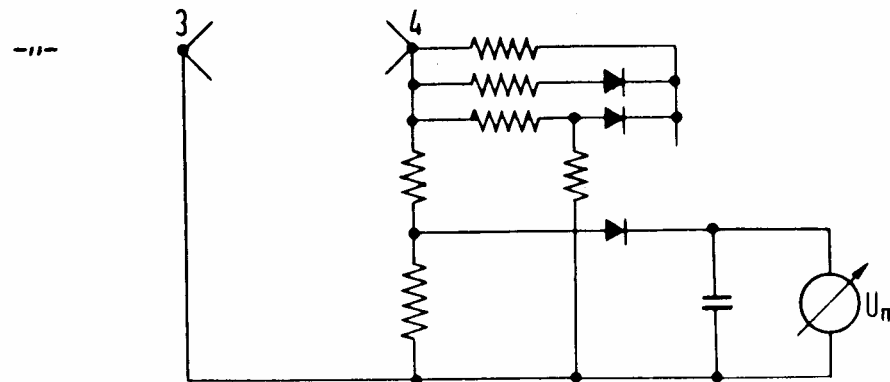
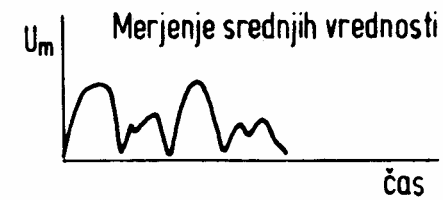
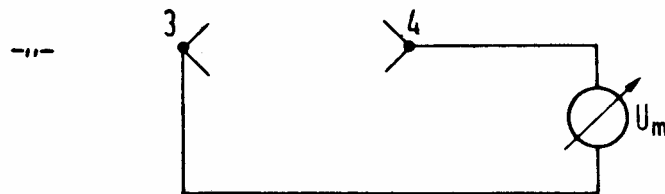
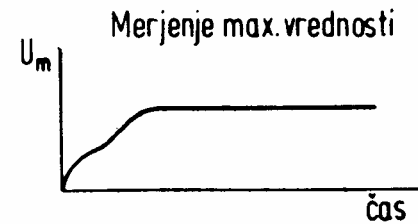
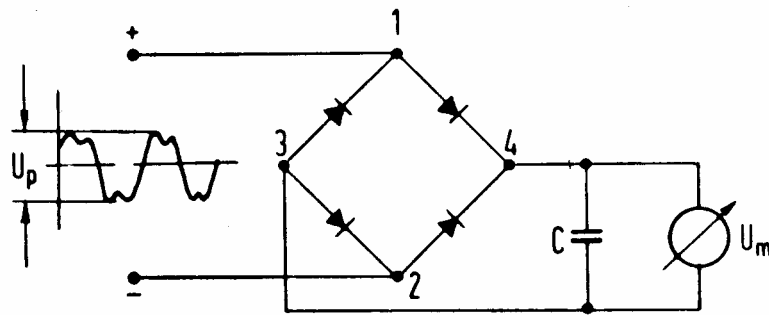
Pisalnik



Princip delovanja merilnega magnetofona in njegove karakteristike



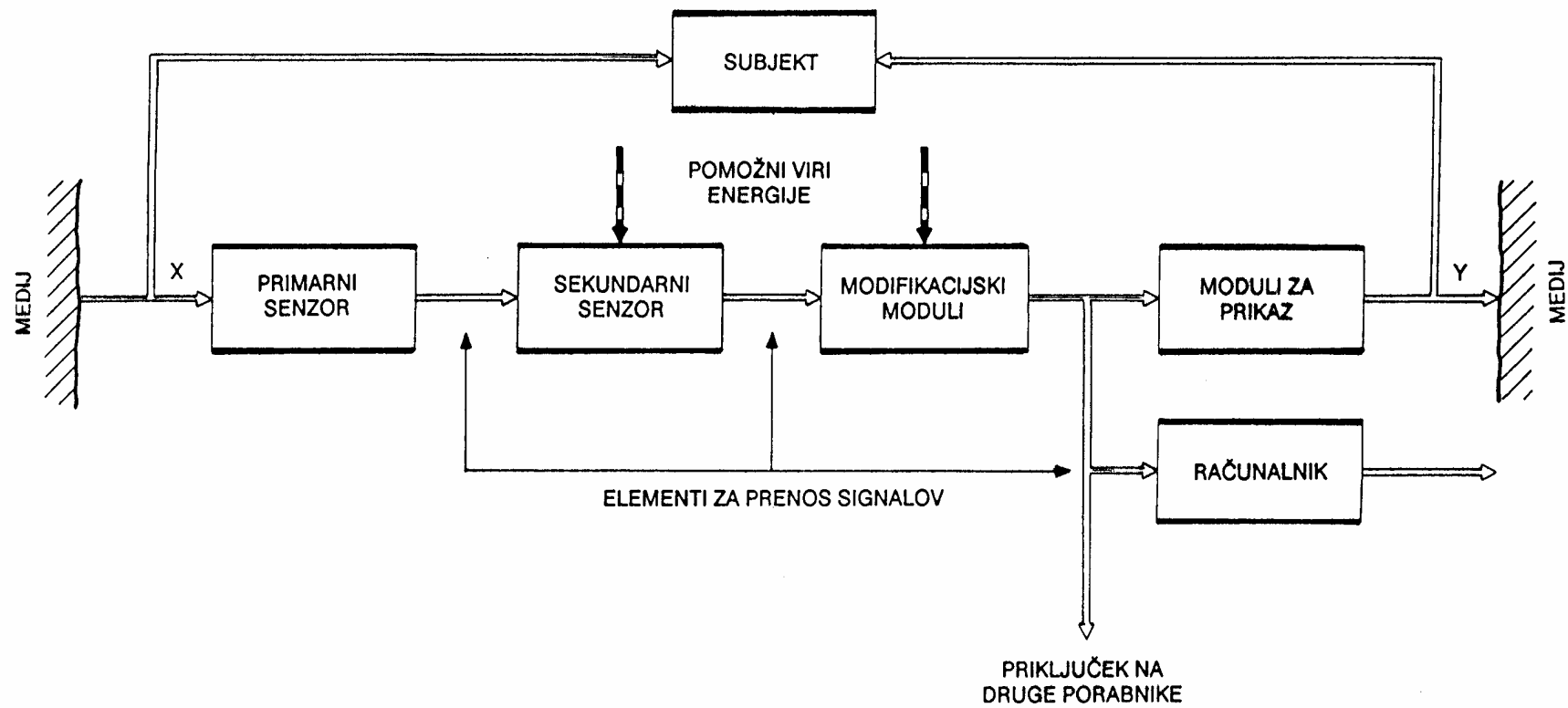
Merjenje maksimalnih, srednjih vrednosti ter standardnih devijacij



9. Elementi za prenos signalov

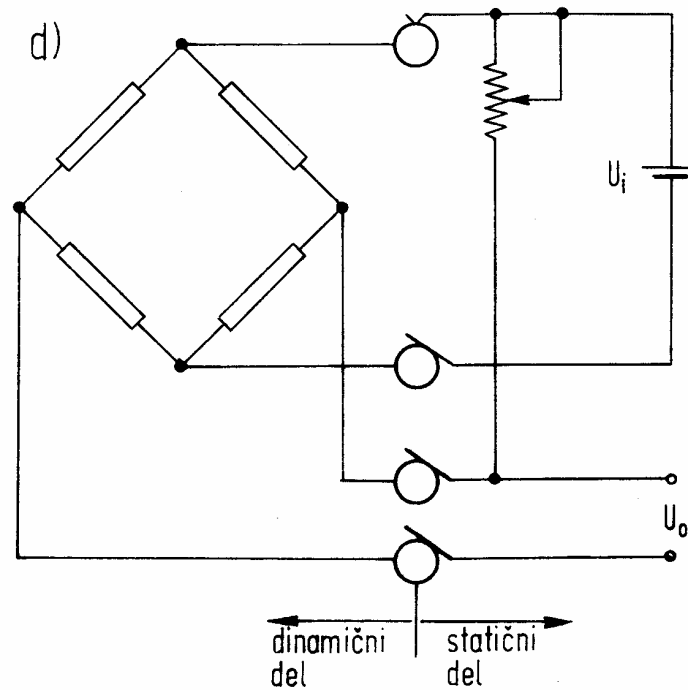
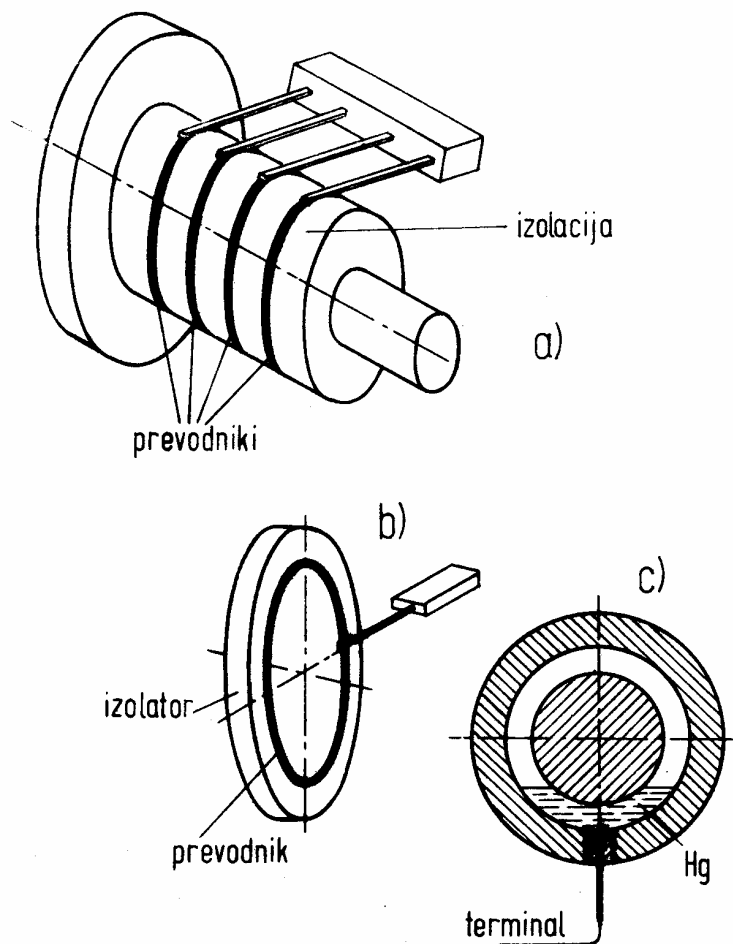
Funkcijski elementi
II.del

Struktura merilnega sistema



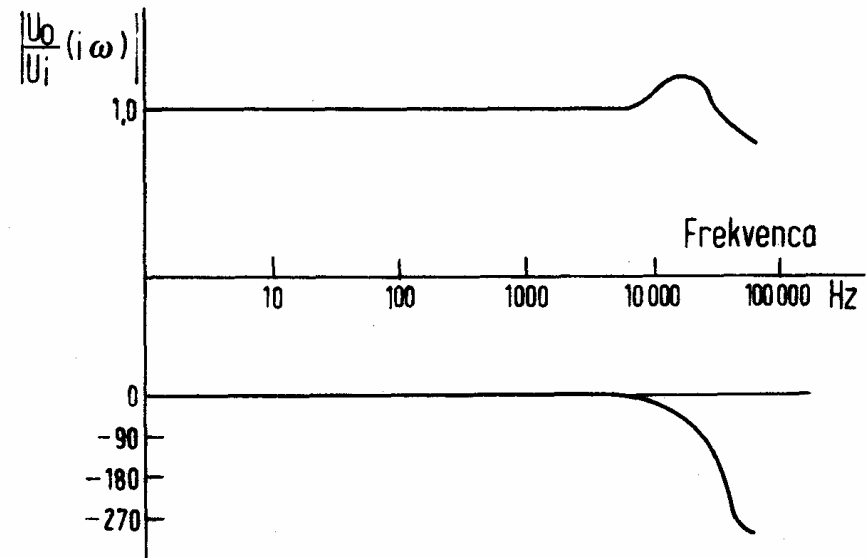
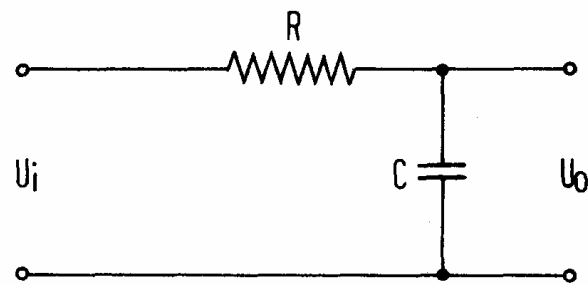
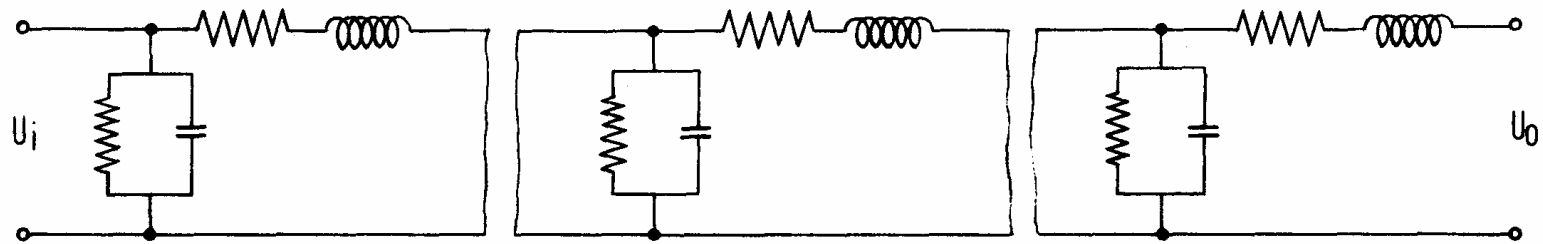
Vir: Peklenik

Drсни obroč

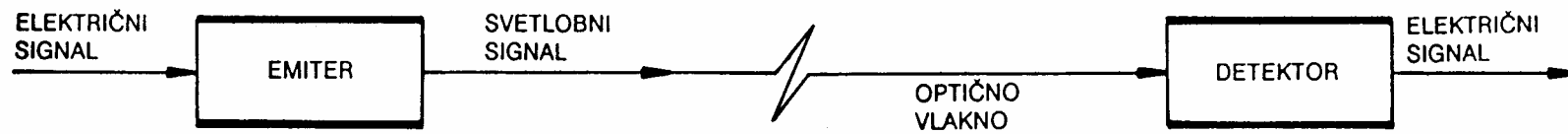


Transmisijski (koaksialen) kabel - model in frekvenčni odgovor

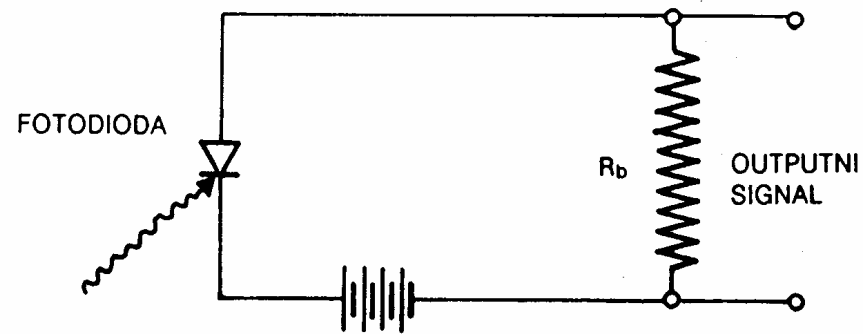
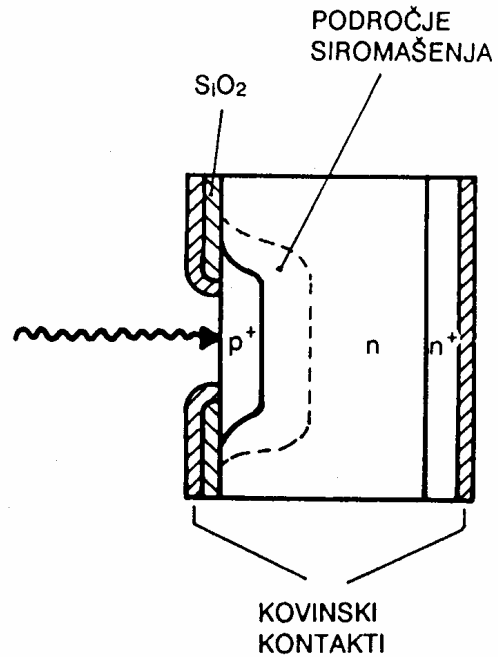
TRANSMISIJSKI KABEL S PORAZDELJENIMI PARAMETRI



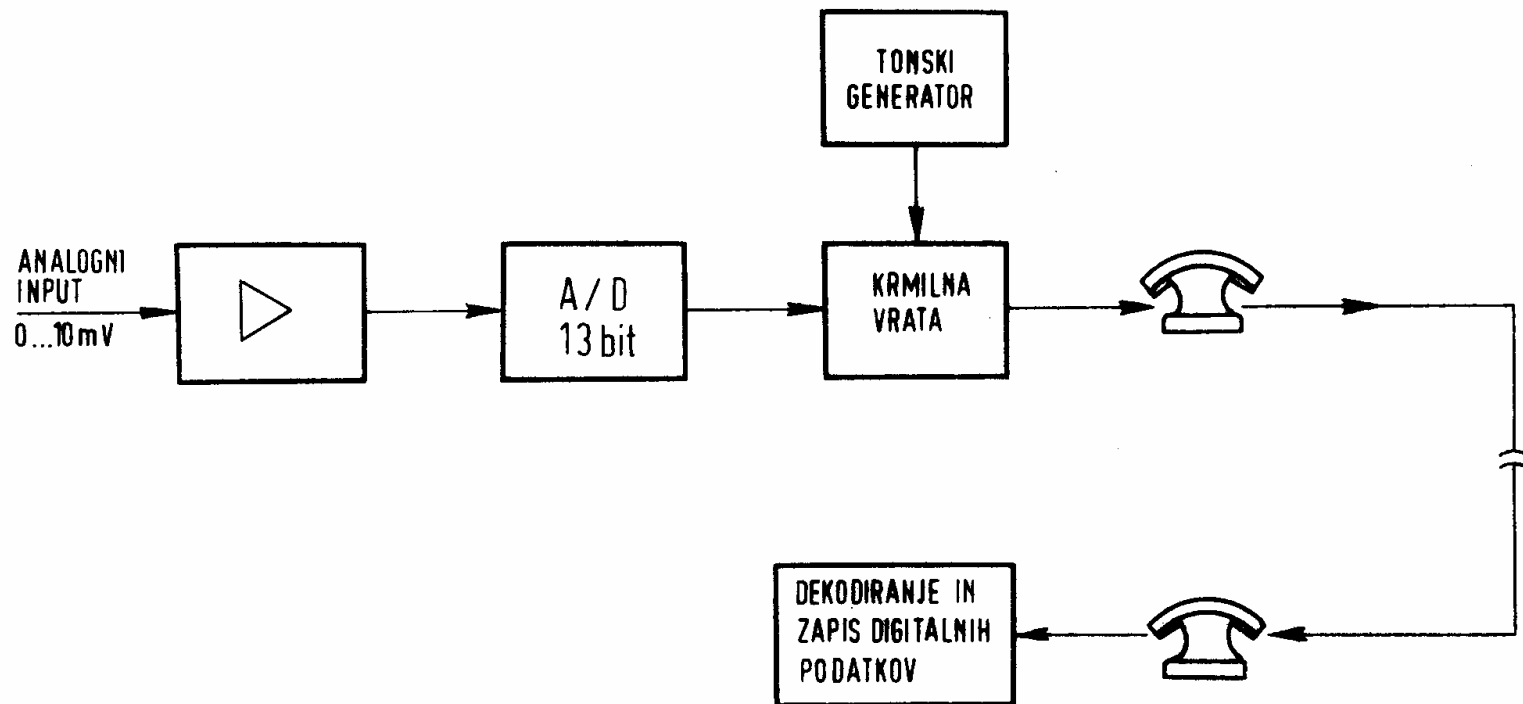
Komunikacijski sistem osnovan na optičnem vlaknu



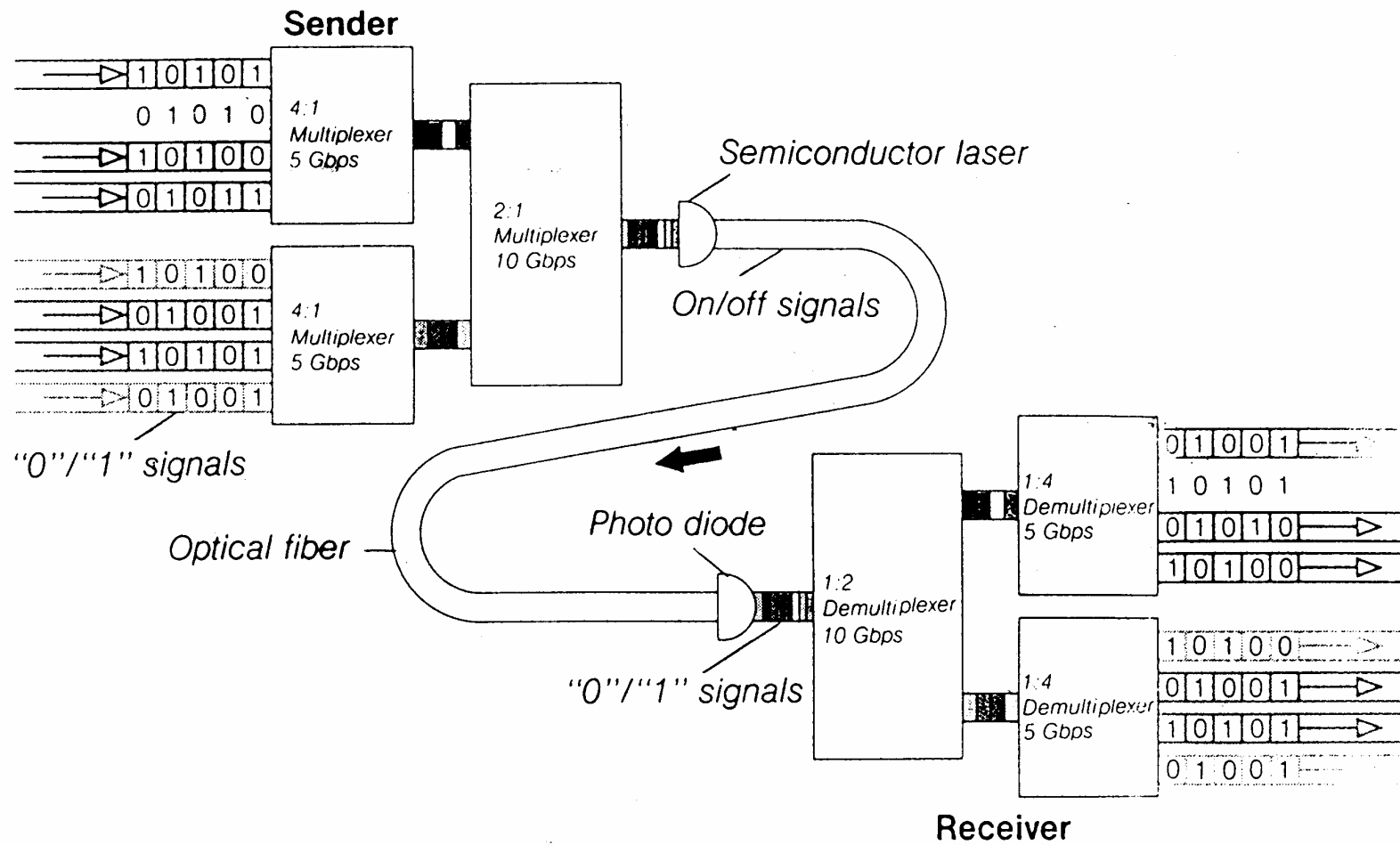
Struktura silicijeve fotodiode in električna shema v fotokonduktivnem načinu



Telefonski prenos digitalnih podatkov

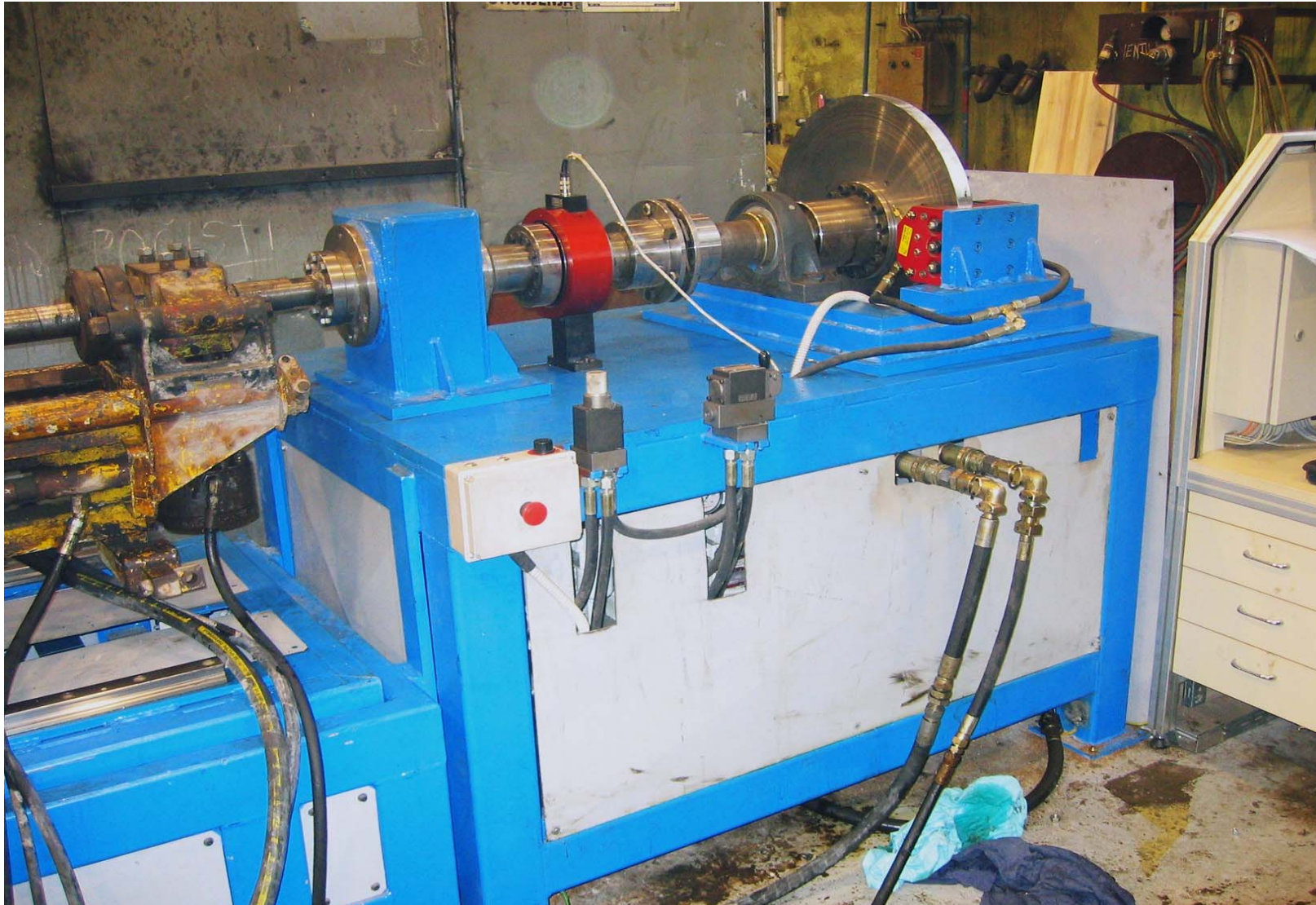


Primer sistema za prenos digitalnih signalov

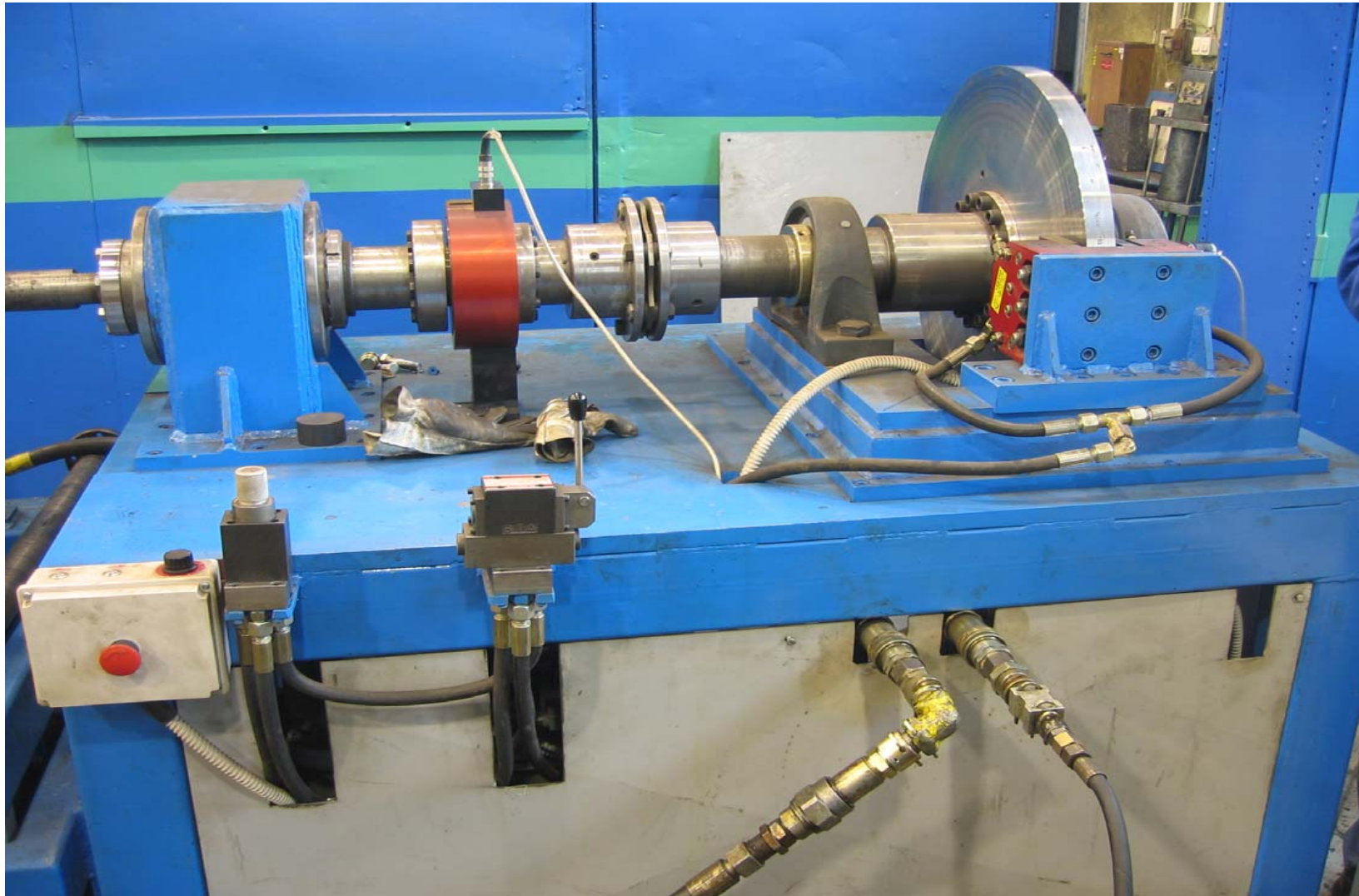


III. del Primeri

Sistem za testiranje rudarskih vrtalnih garnitur (preizkušanje)



Sistem za testiranje rudarskih vrtalnih garnitur (preizkušanje)



Merilni sistem za merjenje hitrosti nihanj (primer)



Priloge

Priloga 1

Merske enote SI sistema

Priloge

MERSKE ENOTE SI SISTEMA
osnovne enote

Veličina	OSNOVNA ENOTA SI	
	ime	znak
Dolžina	meter	m
Masa	kilogram	kg
Čas	sekunda	s
Električni tok	amper	A
Termodinamična temperatura	kelvin	K
Množina (snovi)	mol	mol
Svetilnost	kandela	cd
Ravninski kot (dopolnilna enota)	radian	rad
Prostorski kot (dopolnilna enota)	steradian	sr

MERSKE ENOTE SI/SISTEMA - izpeljane enote

	IZPELJANA ENOTA SI			
Frekvenca	herc, hertz	Hz		s^{-1}
Sila	njuten, newton	N		$kg \cdot m/s^2$
Tlak, napetost	paskal, pascal	Pa	N/m^2	$kg/m \cdot s^2$
Energija, delo, toplota	džul, joule	J	$N \cdot m \dots W \cdot s$	$kg \cdot m^2/s^2$
Moč, energijski tok, toplotni tok	vat, watt	W	J/s	$kg \cdot m^2/s^3$
Elektrina (naboj)	kulon, coulomb	C		A.s
Električna napetost, lastna (vsebovana) napetost, električni potencial	volt	V	W/A	$kg \cdot m^2/A \cdot s^3$
Električna kapacitivnost	farad	F	$A \cdot s/V$	$A^3 \cdot s^4/kg \cdot m^2$
Električna upornost	om, ohm	Ω	V/A	$kg \cdot m^2/A^2 \cdot s^3$
Električna prevodnost	simens, siemens	S	$A/V \cdot m$	$A^2 \cdot s^3/kg \cdot m^3$
Magnetni pretok	veber, weber	Wb	V.s	$kg \cdot m^2/A \cdot s^2$
Gostota magnetnega pretoka	tesla	T	Wb/m^2	$kg /A \cdot s^2$
Induktivnost	henri, henry	H	$V \cdot s/A$	$kg \cdot m^2/A^2 \cdot s^2$
Celzijeva temperatura	stopnja Celzija	$^{\circ}C$	$t_K - 273,15 K$	273,15 K
Svetlobni tok	lumen	lm		cd.sr
Osvetljenost	luks, lux	lx	lm/m^2	cd.sr/ m^2
Aktivnost radioaktivnega vira	bekerel, becquerel	Bq		
Absorbirana doza ionizirajočega sevanja	grej, grey	Gy		
Ekvivalentna doza ionizirajočega sevanja	sivert, sievert	Sv		

Priloga 2

Meroslovje - slovarček pogostejših izrazov v meroslovju

Priloge

MEROSLOVJE - SLOVARČEK POGOSTEJŠIH IZRAZOV V MEROSLOVJU**Meroslovje**

Veda o merjenju.

Merilno načelo

Znanstvena podlaga merjenja.

(Merjena oz. merljiva) veličina

Lastnost pojava, telesa ali snovi, ki se lahko razlikuje kakovostno in ugotavlja količinsko.

Merjeni signal

Veličina, ki predstavlja merjeno veličino in je z njo funkcijsko povezana.

Vplivna veličina

Veličina, ki ni merjena veličina, vendar vpliva na rezultat merjenja.

(Merska) enota

Dogovorno določena in sprejeta veličina, s katero se primerjajo druge istovrstne veličine, da bi izrazili njihovo velikost glede na to veličino.

Vrednost (veličine)

Velikost določene veličine, ki je izražena kot merska enota, pomnožena s številom.

Prava vrednost (veličine)

Vrednost, ki ustreza definiciji določene veličine. Opombe: (1) To je vrednost, ki bi se dobila z idealnim merjenjem; (2) Prave vrednosti so po naravi neugotovljive.

Dogovorjena prava vrednost (veličine)

Vrednost, pripisana določeni veličini, ki je včasih z dogovorom sprejeta kot tista vrednost, ki ima za dani namen primerno negotovost. Opomba: na danem kraju se lahko kot dogovorjena prava vrednost vzame vrednost, ki je realizirana z referenčnim etalonom.

Mednarodni sistem enot, SI

Koherentni sistem enot, ki ga je sprejela in priporočila Generalna konferenca za uteži in mere (CGPM). Temelji na naslednjih sedmih osnovnih enotah:

Veličina	Osnovna enota SI	
	Ime	Simbol
Dolžina	meter	m
Masa	kilogram	kg
Čas	sekunda	s
električni tok	amper	A
termodinamična temperatura	kelvin	K
množina snovi	mol	mol
Svetilnost	kandela	cd

Merilna metoda

Logično zaporedje generično opisanih operacij, ki se uporabljajo pri merjenju.

Merilni sistem

Komplet merilnih instrumentov in druge opreme, zbranih za določene meritve.

Merilni instrument, merilo

Naprava, katere namen je, da se sama ali skupaj z dodatnimi napravami uporablja za merjenje.

Senzor

Element merilnega instrumenta ali merilne verige, ki je neposredno pod vplivom merjene veličine.

Primeri: a) termočlen termoelektričnega termometra; b) rotor turbinskega merilnika toka; c) Bourdonova cev manometra; d) plovec merilnika nivoja; e) fotocelica spektrofotometra.

Merilno območje (delovno območje)

Niz vrednosti merjenih veličin, za katere je pogrešek merilnega instrumenta v okviru zahtevanih meja. opomba: "Pogrešek" se ugotovi glede na dogovorjeno pravo vrednost.

Merjenje, meritev

Niz operacij, s katerimi se ugotovi vrednost veličine.

Merilni rezultat

Z merjenjem dobljena vrednost, pripisana merjeni veličini. Merilni rezultat je popoln, če ima podano pripadajočo merilno negotovost.

Nepopravljeni rezultat

Merilni rezultat pred korekcijo sistematičnega pogreška.

Popravljeni rezultat

Merilni rezultat po korekciji sistematičnega pogreška.

Ponovljivost (merilnih rezultatov)

Ujemanje rezultatov zaporednih meritev iste merjene veličine, opravljenih pod enakimi pogoji merjenja. opombe: (1) Ti pogoji se imenujejo pogoji ponovljivosti. (2) Pogoji ponovljivosti obsegajo: isti merilni postopek; istega opazovalca; isti merilni instrument, uporabljen pod enakimi pogoji; isti kraj; ponavljanje v kratkem časovnem obdobju. (3) Ponovljivost se lahko izrazi količinsko z upoštevanjem značilnosti raztrosa merilnih rezultatov.

Obnovljivost (merilnih rezultatov)

Ujemanje merilnih rezultatov iste merjene veličin opravljenih pri spremenjenih pogojih merjenja.

Opombe: (1) Za veljavnost obnovljivosti je treba navesti pogoje, ki so bili spremenjeni. (2) Spremenjeni pogoji lahko obsegajo: merilno načelo, merilno metodo, merilca, merilni instrument, referenčni etalon, kraj, pogoje uporabe, čas. (3) Obnovljivost se lahko količinsko izrazi z upoštevanjem raztrosa merilnih rezultatov. (4) Tu gre ponavadi za korigirane merilne rezultate.

Občutljivost

Razmerje med spremembo odziva merilnega instrumenta in pripadajočo spremembo vhodnega signala. Opomba: Občutljivost je lahko odvisna od vrednosti vhodnega signala.

Ločljivost (prikazovalne naprave)

Najmanjša razlika med kazanji prikazovalne naprave, ki jo je še mogoče razločiti. Opombi: (1) Pri digitalni prikazovalni napravi je to razlika v kazanju, ki ustreza spremembi številke na zadnjem mestu za eno enoto. (2) Ta pojem velja tudi za zapisovalno napravo

Mrtvi pas

Največje območje, v katerem se lahko vhodni signal spreminja v obe smeri, ne da bi povzročil spremembo odziva merilnega instrumenta. Opombi: (1) Mrtvi pas je lahko odvisen od hitrosti spremembe. (2) Včasih se mrtvi pas namenoma poveča, da bi se s tem preprečila sprememba odziva na majhne spremembe vhodnega signala.

Stabilnost

Sposobnost merilnega instrumenta, da s časom ne spreminja svojih meroslovnih značilnosti. Opombi: (1) Če se stabilnost nanaša na veličino, ki ni čas, mora biti to izrecno navedeno.

2. Stabilnost je mogoče količinsko izraziti na več načinov, na primer: s časom, v katerem se meroslovna značilnost spremeni za določeno vrednost ali s spremembo značilnosti v določenem času.

Nevplivnost

Sposobnost merilnega instrumenta, da ne vpliva na merjeno veličino. Primera: a) tehtnica je nevplivna; b) uporovni termometer, ki segreva medij, katerega temperatura naj bi meril, je vpliven.

Lezenje

Počasna sprememba meroslovnih značilnosti merilnega instrumenta.

Odzivni čas

Časovni presledek med trenutkom, ko se pojavi določena nenadna sprememba vhodnega signala, in trenutkom, ko odziv doseže določene meje okrog končne ustaljene vrednosti in ostane v njih.

Merilna točnost

Ujemanje merilnega rezultata s pravo vrednostjo merjene veličine. Opomba: "Točnost" je kvalitativen pojem.

Razred točnosti

Razred merilnih instrumentov, ki izpolnjujejo določene meroslovne zahteve, katerih namen je, da ostanejo pogreški v določenih mejah. Opomba: razred točnosti se ponavadi označuje s številom ali simbolom, ki je bil dogovorno sprejet in se imenuje oznaka razreda.

Merilna negotovost

Parameter, ki je povezan z merilnim rezultatom in označuje raztros vrednosti, ki jih je mogoče upravičeno pripisati merjeni veličini.

Opombe: (1) Ta parameter je lahko, na primer standardni odmik (ali njegov večkratnik) ali polovična širina intervala, ki ima določeno stopnjo zaupanja.

(2) V splošnem vsebuje merilna negotovost več komponent. Nekatere se lahko ovrednotijo s statistično porazdelitvijo rezultatov za niz meritev in označijo z eksperimentalnim standardnim odklikom. Druge komponente, ki jih je prav tako mogoče označiti s standardnim odklikom, so ocenjene iz privzetih porazdelitev verjetnosti na podlagi izkušenj ali drugih podatkov.

(3.) Razume se, da je merilni rezultat najboljša ocena vrednosti merjene veličine in da na raztros vplivajo vse komponente negotovosti, skupaj s tistimi, ki izvirajo iz sistematičnih vplivov, kot so npr. komponente povezane s korekcijami in referenčnimi etaloni.

(Merilni) pogrešek

Merilni rezultat minus prava vrednost merjene veličine. Opombi: (1) Ker prave vrednosti ni mogoče ugotoviti, se v praksi uporablja dogovorjena prava vrednost. (2) Kadar je treba razlikovati med "pogreškom" in "relativnim pogreškom", se prvi včasih označuje tudi kot absolutni merilni pogrešek. Ta izraz se ne sme zamenjati z absolutno vrednostjo pogreška, ki je modul pogreška.

Relativni pogrešek

Merilni pogrešek, deljen s pravo vrednostjo merjene veličine.

Opomba: Ker prave vrednosti ni mogoče ugotoviti, se v praksi uporablja dogovorjena prava vrednost.

Naključni pogrešek

Merilni rezultat minus srednja vrednost, ki bi jo dobili iz neskončnega števila meritev iste merjene veličine pod pogoji ponovljivosti.

Opombi: (1) Naključni pogrešek je merilni pogrešek minus sistematični pogrešek. (2) Ker se lahko izvede le končno število meritev, je naključni pogrešek mogoče zgolj oceniti.

Sistematični pogrešek (odstopanje)

Srednja vrednost, ki bi jo dobili iz neskončnega števila meritev iste merjene veličine, pod pogoji ponovljivosti, minus prava vrednost merjene veličine.

Opombe: (1) Sistematični pogrešek je pogrešek minus naključni pogrešek. (2) Tako kot prava vrednost, tudi sistematični pogrešek in vzroki zanj ne morejo biti v celoti poznani.

Odmik

Vrednost minus referenčna vrednost.

Etalon

Opredmetena mera, merilni instrument, referenčni material ali merilni sistem, katerega namen je, da definira, realizira, ohranja ali reproducira neko enoto ali eno ali več vrednosti veličine, tako da služi kot referenca.

Primarni etalon

Etalon, ki je izbran ali vsesplošno priznan, da ima največjo meroslovno kakovost, in katerega vrednost je sprejeta brez sklicevanja na druge etalone iste veličine. Opomba: Pojem primarnega etalona velja tako za osnovne kot za izpeljane veličine.

Mednarodni etalon

Etalon, ki je z mednarodnim dogovorom priznan, da se uporablja kot mednarodna podlaga za ugotavljanje vrednosti drugih etalonov zadevne veličine.

Nacionalni etalon

Etalon, ki je z državnim odlokom priznan kot podlaga za ugotavljanje vrednosti drugih etalonov zadevne veličine v državi.

Posredniški etalon

Etalon, ki se uporablja kot posrednik pri primerjavi etalonov.

Referenčni etalon

Etalon, na splošno največje meroslovne kakovosti, ki je na voljo na danem kraju ali v dani organizaciji in je osnova za merjenje na tem mestu.

Vzdrževanje etalona

Niz operacij, potrebnih za ohranitev meroslovnih značilnosti etalona v ustreznih mejah. Opomba: Te operacije ponavadi vključujejo občasno umerjanje, skladiščenje v ustreznih razmerah in previdnost pri uporabi.

Referenčni pogoji

Pogoji uporabe, ki so predpisani za preskušanje merilnega instrumenta ali za medsebojno primerjavo merilnih rezultatov. Opomba: Referenčni pogoji v splošnem vključujejo referenčne vrednosti ali referenčna območja za vplivne veličine, ki vplivajo na merilni instrument.

Sledljivost

Lastnost merilnega rezultata ali vrednosti etalona, ki omogoča navezavo na navedene reference, ponavadi nacionalne ali mednarodne etalone, skozi neprekinjeno verigo primerjav, ki imajo opredeljeno negotovost.

Kalibracija

Postopek, s katerim se ugotovi razmerje med vrednostmi, ki jih kaže merilo ali merilni sistem, ali vrednostmi, ki jih predstavlja materializirana mera ali referenčni material, in pripadajočimi vrednostmi, realiziranimi z etaloni.

Umerjanje, kalibracija

Niz operacij za ugotavljanje povezave med vrednostmi, ki jih kaže merilni instrument ali merilni sistem, oziroma vrednostmi, ki jih predstavlja opredmetena mera ali referenčni material, in pripadajočimi vrednostmi, realiziranimi z etaloni, pod določenimi pogoji.

Opombe: (1) Rezultat umerjanja omogoča bodisi pripis vrednosti merjenih veličin kazanju merilnega instrumenta bodisi določanje korekcij glede na kazanje. (2) Z umerjanjem je mogoče ugotoviti tudi druge meroslovne lastnosti, na primer učinek vplivnih veličin. (3) Rezultat umerjanja se lahko zapiše v listini, ki jo včasih imenujemo certifikat o umerjanju ali poročilo o umerjanju.

Naravnavanje, justiranje (merilnega instrumenta)

Postopek, s katerim se merilni instrument pripravi za delovanje, ki ustreza njegovi uporabi. Opomba: Naravnavanje je lahko avtomatsko, polavtomatsko ali ročno.

Overitev

Postopek, ki ga opravi zakonsko pooblaščen organ, s katerimi se ugotovi in potrdi, da merilo v celoti ustreza zahtevam meroslovnih predpisov.

Vir: Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja, USM, 1999.



PROFILE "

STAFF "

UNDERGRADUATE STUDY "

MEHATRONIKA "

GRADUATE STUDY "

RESEARCH "

TECHNOLOGY TRANSFER "

SERVICES "

EVENTS "

CIRP JOURNAL "

NEWS "

MEMBERS ONLY "



7 F D-GA G





"

"

F gr ct wo gpv'qhEqpv qnlcpf 'O cpwkeewt kpi 'Uł ugo u

Hcewnł 'qh'O gej cplecniGpi kpggt kpi
Wpkłgt ulł 'qh'Ni wdilcpc

Urłxgpkc

"

Hqt "o qt g'kplqt o cłkqp"eqpvc ev'vu'cv'icnquB hłłpk'łłłk