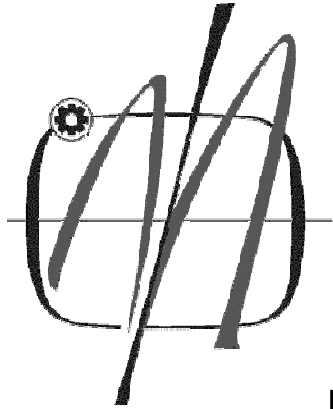


Mašinski Fakultet Univerziteta u Beogradu



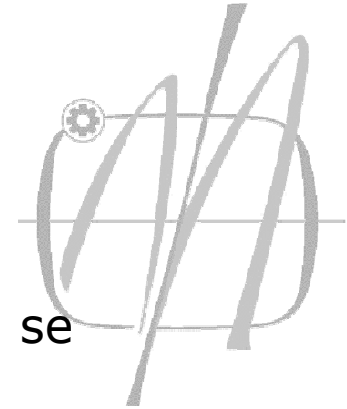
Eksperimenti i simulacije

Dr Aleksandar Marinković, vanredni profesor

Sistemi za akviziciju (DAQ) davači i senzori

Sreda 25.03.2015.

Eksperimenti i simulacije

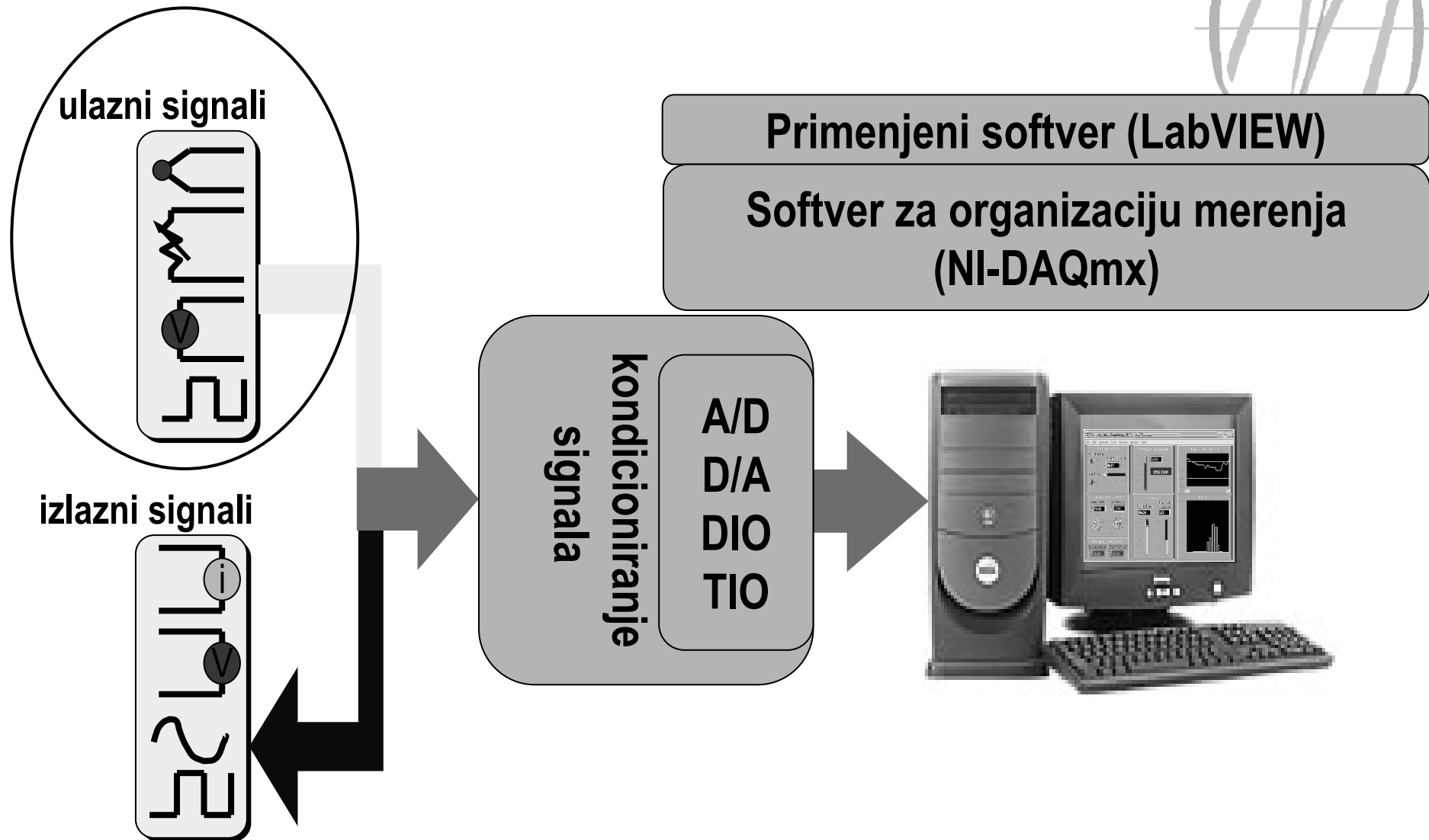


Realizacija savremenih eksperimentalnih istraživanja obavlja se formiranjem tzv. akvizicije podataka merenja (DAQ).

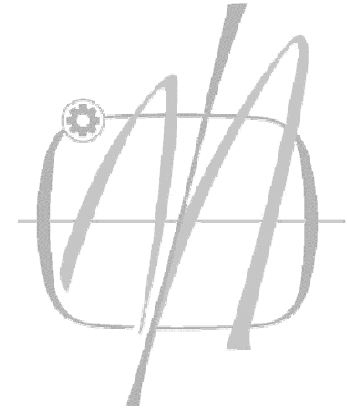
DAQ obuhvata:

- Detekciju određenih veličina u obliku signala (senzori);**
- Obrada signala (kondicioniranje);
- Transformaciju signala (pretvarači A/D konverzija);
- Sakupljanje podataka eksperimenata;
- Obrada i skladištenje podataka

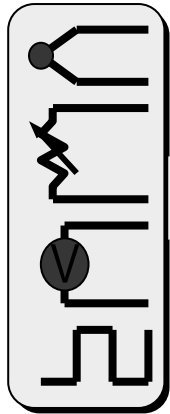
Šta je DAQ sistem?



Detektori ulaznog signala



ulazni signali



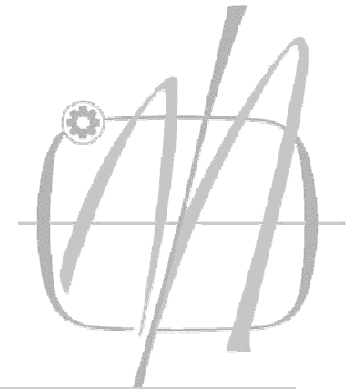
Davači i senzori za praćene veličine:

- Senzori i pretvarači za pomeranje;
- Opterećenje (sile i momenti);
- Senzori i detektori pritiska;
- Senzori i detektori za temperaturu...

Većina pomenutih detektora i davača zasnovana je na **principu mernih traka**, kao jednim od osnovnih principa na kojima je zasnovan rad senzora

Senzori i pretvarači pomerenja

Robust, precise, reliable:
Inductive displacement transducers, ideal for use in industry.



Displacement transducers	WA-T	WA-L	WI
Measurement principle	Inductive		
Design	Probe	Plunger	Probe
Non-linearity	0.2% or 0.1%	0.2% or 0.1%	0.2%
Cable electronics, 0.5V...10V output	optional	optional	no
Nominal (rated) measuring range (displacement)	2 mm	2 mm	2 mm
mm	100 mm	500 mm	10 mm
Special characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Good temperature stability Large measuring range 	<ul style="list-style-type: none"> Good temperature stability 	<ul style="list-style-type: none"> Very compact design



... for your application

Important in numerous applications of process control: measuring displacement.



Production of specialist components for automotive suppliers: HEM monitors assembly



Quality assurance in electro-mechanical press systems

Senzori i pretvarači za silu



Force transducers	U2B	U9B	U3	U93	U10M	SLB700A	C2	C9B
Measurement principle	Strain gauges							
Direction of force	Tensile and compressive						Pressure	
Design								
Non-linearity	0.2	0.5	0.2	0.5	0.06	0.2	0.5	
Nominal (rated) force	50 N		50 N		500 μm/m		50 N	
N	500 N	50 N	500 N	1 kN	1.25 kN	200 kN		50 N
kN	200 kN	50 kN	100 kN	50 kN	500 kN	200 kN		50 kN
Special characteristics	- Versatile usage, main use: Test benches	- Miniature force transducers	- Lateral force-insensitive	- Highly compact - Robust - TEDS	- High dynamic oscillation width - Precise - Double bridge design - TEDS	- Hermetically sealed - Analog output 0V ... 10V or 4 mA ... 20mA	- Hermetically sealed - Low overall height	- Miniature force transducers

... for your applications
Safely and reliably determining forces...
a must in numerous applications:



Cracking components

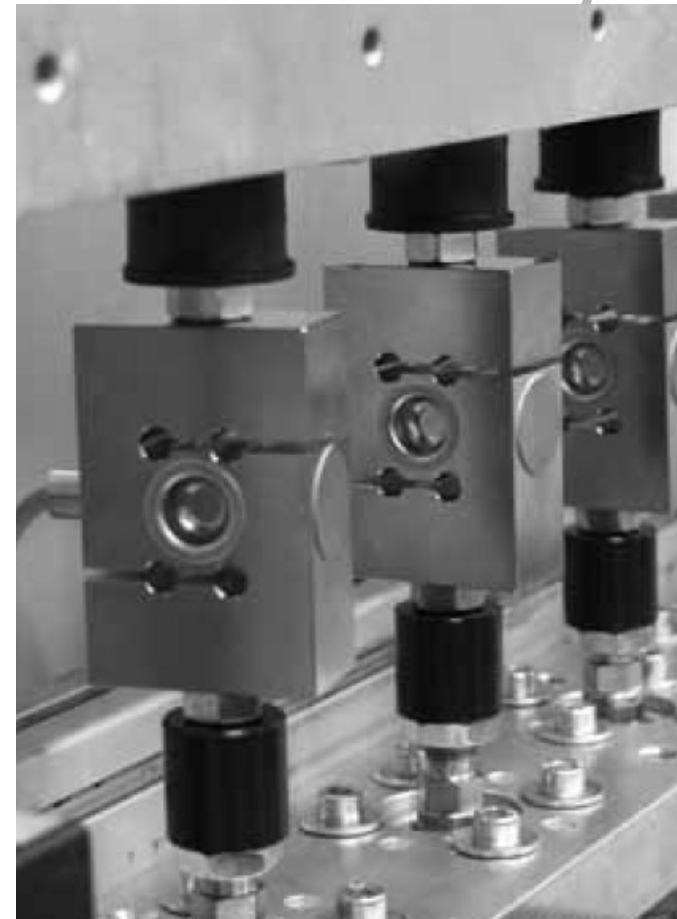
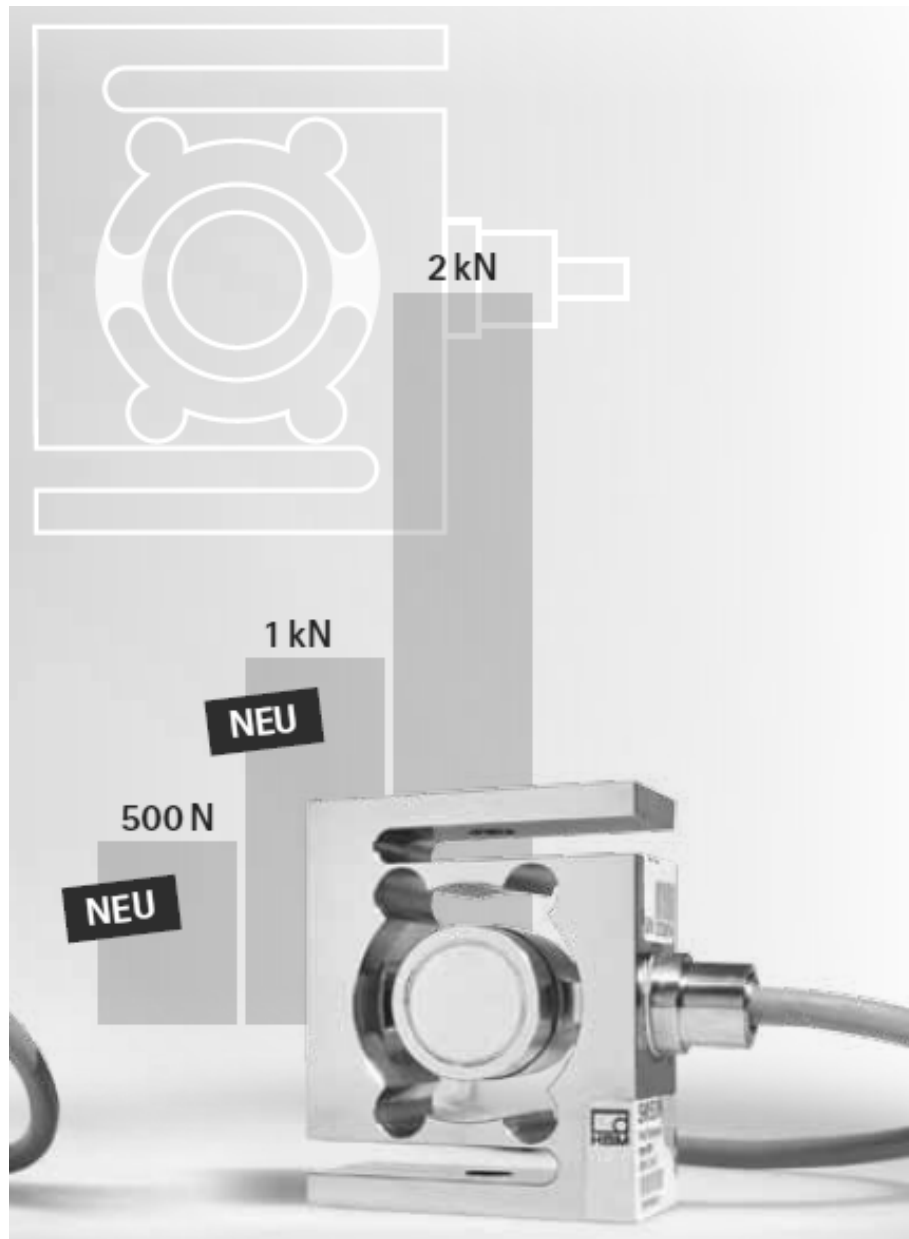
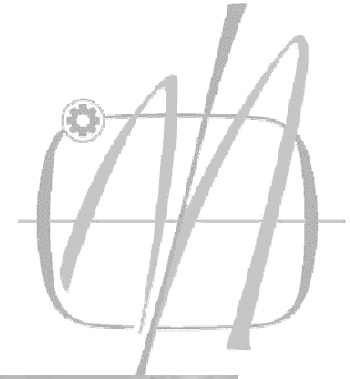


Safe loading of large masses



Error-free pressing of tablets

Senzori i pretvarači za silu



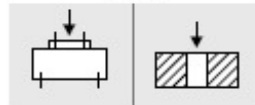
Senzori i pretvarači za silu i moment



CFT **CFW**

Piezoelectric

Pressure



1

1

5 kN

120 kN

20 kN

700 kN

- Extremely stiff
- No nominal (rated) displacement
- Calibrated

- Extremely compact
- No nominal (rated) displacement
- Mounting aids available

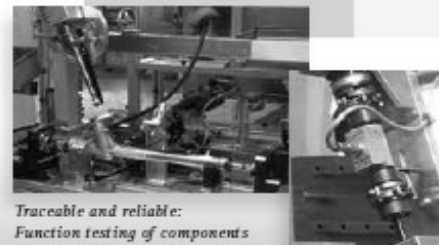


Ensuring product quality with piezoelectric sensors

Reliable and always technologically unbeaten: HBM's analog and digital torque transducers.



Torque transducer	T20	T22	T40
Measurement principle	Strain gauges		
Signal transmission	Contactless		
Design	Shaft stub Friction locking	Shaft stub Friction locking	Flange
Nominal (rated) speed	10000rpm	9000rpm	15000rpm
Output signal: Torque	±10V	±5V; 10±8mA	5/30/120kHz or 10V
Output signal: Speed/angle of rotation	360 increments/revolution	-	1,024 increments/revolution
Option, Coupling	yes	yes	yes
Non-linearity	0.1	0.3	0.03
Nominal (rated) torque	0.1 N·m 200 N·m	5 N·m	200 N·m 10 kN·m
N·m			
kN·m			
Special characteristics	- Torque and speed measurement system	- Voltage output - Current output	- Digital measured value transmission - High measuring bandwidth - Measurement flange



Traceable and reliable: Function testing of components

... for your applications

Smooth production:
Torque recording in process control.



Senzori i pretvarači pritiska



				
Pressure transducers	P3 Industrial Class	P2V	P8AP	P15
Measurement principle	 Strain gauges			
Non-linearity	0.1% or 0.2%	0.2% ... 0.3%	0.3%	1%
Integrated electronics	-	0.5V ... 10V or 4mA ... 20mA	-	0.5V ... 10V or 4mA ... 20mA
Nominal (rated) measuring range	10 bar 3000 bar	100 bar 7000 bar	10 bar 500 bar	10 bar 500 bar
Special characteristics	- Pt100 for temperature compensation	- Analog output	- Compact design - Low mass	- Analog output - Compact design



Testing of injection nozzles



© Invertek

Precise control of extreme pressures in waterjet cutting

... for your application

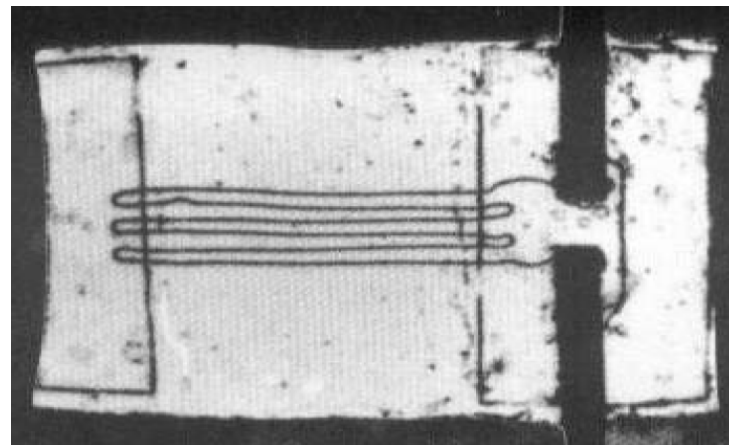
Pressure measurement during process monitoring.

Merne trake

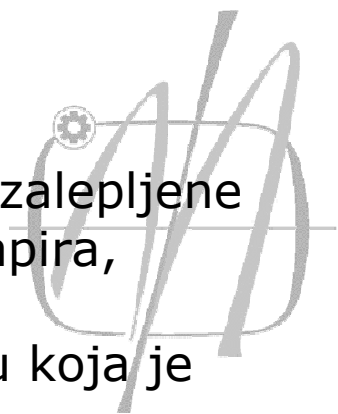
Merne trake koje se koriste za merenje deformacija. One su jedan od Najčešće korišćenih mernih pretvarača, jer su jeftine, neznatne krutosti i male dužine. Može se koristiti za merenja statički i dinamički opterećenih konstrukcija. Merne trake se još koriste i kao pretvarači za merenje sile, pritiska, obrtnog momenta, ubrzanja i tsl.

Razvoj merenih traka se veže za sam kraj 19-og i početak 20-og veka. 1856. godine **Lord William Thompson** opisuje efekat proporcionalne promene Omovog otpora kod bakarnih provodnika pri izduženju, pri tome **ne primenivši to** u praktičnoj primeni. 1938. godine su dva naučnika, **E.E. Simons i A.C. Ruge** nezavisno jedan od drugog došli do sličnog otkrića. Profesor A.C. Ruge je **konstruisao svoju prvu mernu** traku rešavajući problem tornja za vodu koji će biti otporan na zemljotrese, kao i mogućnost merenja dinamičkih naprezanja na vrhu tog tornja.

- 1941. Baldwin-Southwark Co. SAD prva masovna proizvodnju mernih traka.
- 1952. HBM iz Darmstadt-a, koji 1963. god. uvodi u masovnu proizvodnju i folijske merne trake.

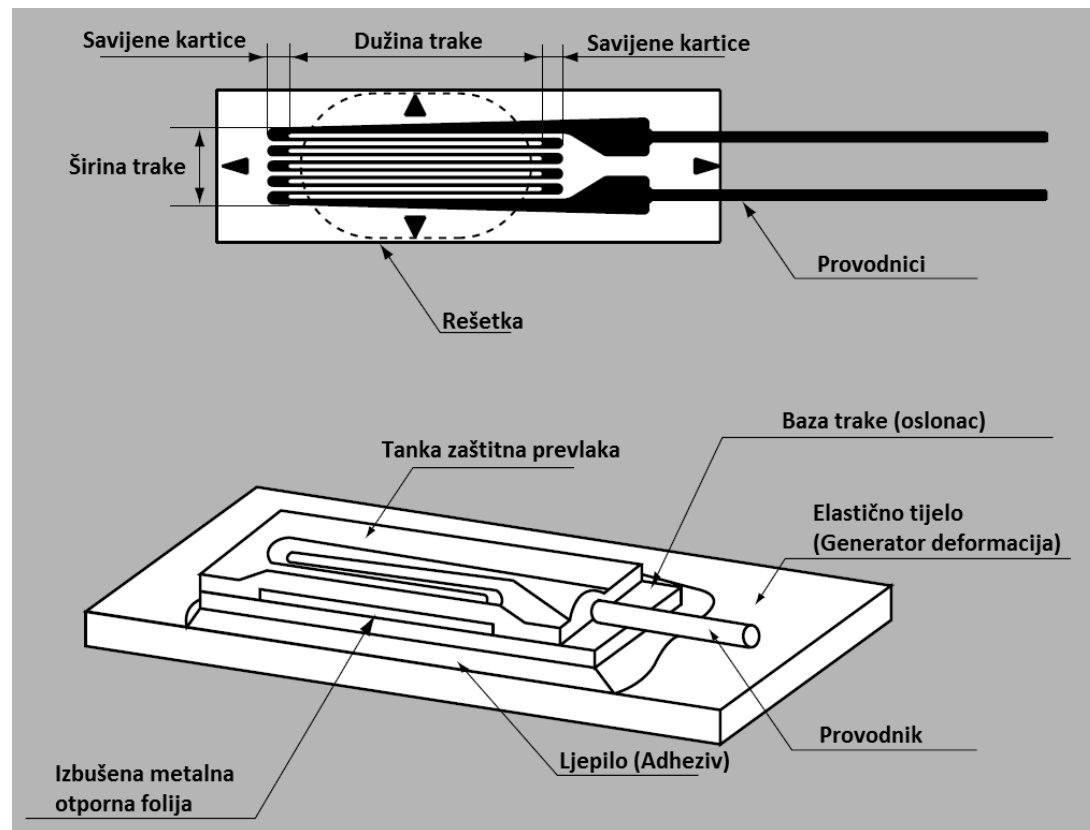
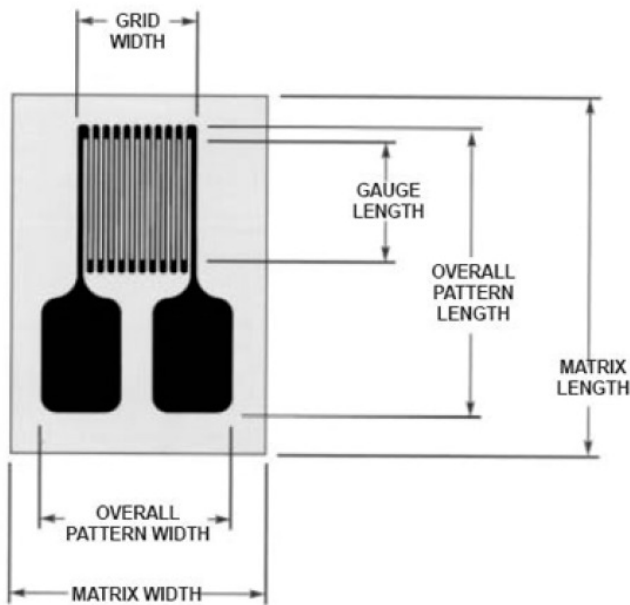


Merne trake



Merna traka se sastoji od žice savijene nekoliko puta a zatim zalepljene posebnim lepkom na njen noseći element koji može biti od papira, sintetičke mase, metalne folije i slično.

Savijena žica se preko nosećeg elementa lepi na konstrukciju koja je izložena delovanju opterećenja usled čega se deformiše.



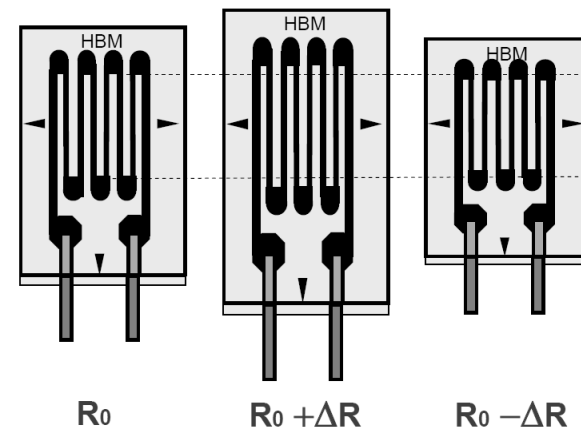
Merne trake



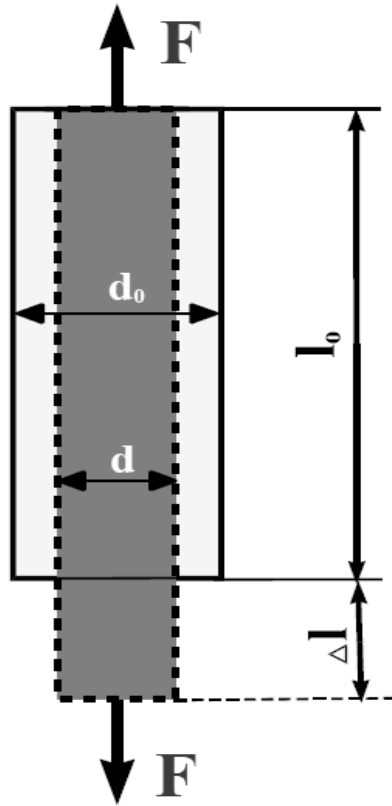
- Promena električnog otpora po jedinici dužine mora biti relativno velika i veliki koeficijent osetljivosti,
- Veliki specifični otpor kako bi se relativno malom dužinom žice dobio pretvarač velike otpornosti,
- Dužina žice u odnosu na poprečni presek treba da bude što veća kako bi sila po jedinici površine poprečnog preseka bila što manja. Ovaj zahtev se može ispuniti i sa žicom čiji prečnik ne prelazi 0,025 mm
- Temperaturni koeficijent žice treba da bude što manji, kako bi se što lakše izbegli uticaji promene okolne temperature na otpornost pretvarača, problem se prevazilazi korištenjem kompenzacionih traka
- Izvodi merne trake treba da se lako leme sa bakrom i da spoju daju minimalnu termoelektromotornu silu
- Merna traka treba da bude jednako osetljiva pri merenju naprezanja u oba smeru,

Promena otpornosti trake sa promenom dilatacije

$$\varepsilon = \frac{dR / R}{k}$$



Merne trake



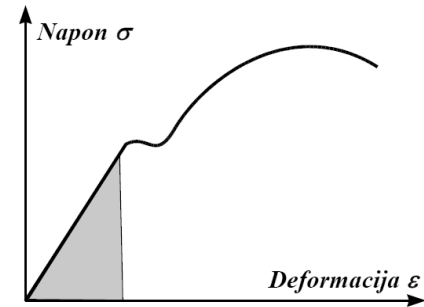
Jednoosno naponsko stanje

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

Hukov zakon

$$\sigma_n = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon_n = \frac{dl}{l} = \frac{\sigma_n}{E}$$



$$\nu = -\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_n}$$

$$\varepsilon_p = \frac{d - d_0}{d_0} = -\nu \cdot \varepsilon_n$$

A – površina poprečnog preseka

F – sila

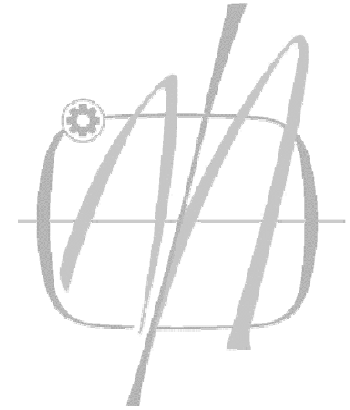
σ – napon

ε_n – deformacija u pravcu opterećenja

ε_p – poprečna deformacija

ν – Puasonov koeficijent

E – Modul elastičnosti



Primena mernih traka - zupčanici

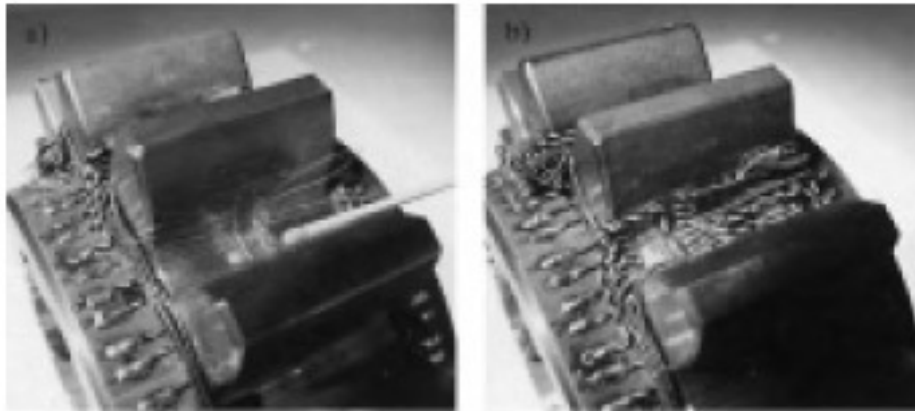
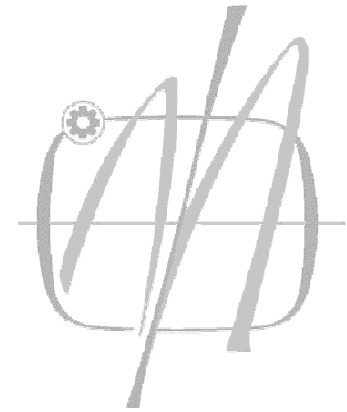


Fig. 3.2-7: Strain measurement with strain gage chains in the tooth root of a gearwheel, from 3-4.
a) mounted strain gage with matchstick to give a comparison of size
b) completed gage installation, ready for measurement

Fig. 3.2-7 illustrates an example of the application of strain gage chains for the determination of the stress distribution in the rounded section at the root of a gearwheel tooth [3-4]. Here, the tangential and transverse strains were measured with 5 chains at 50 points on the root of the tooth.

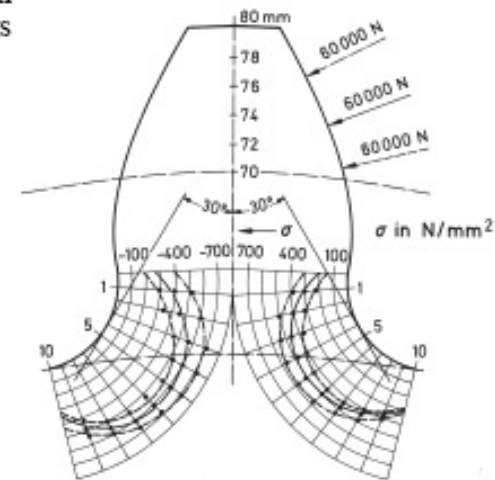
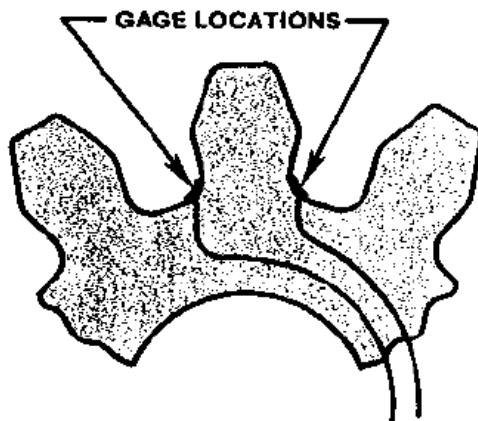
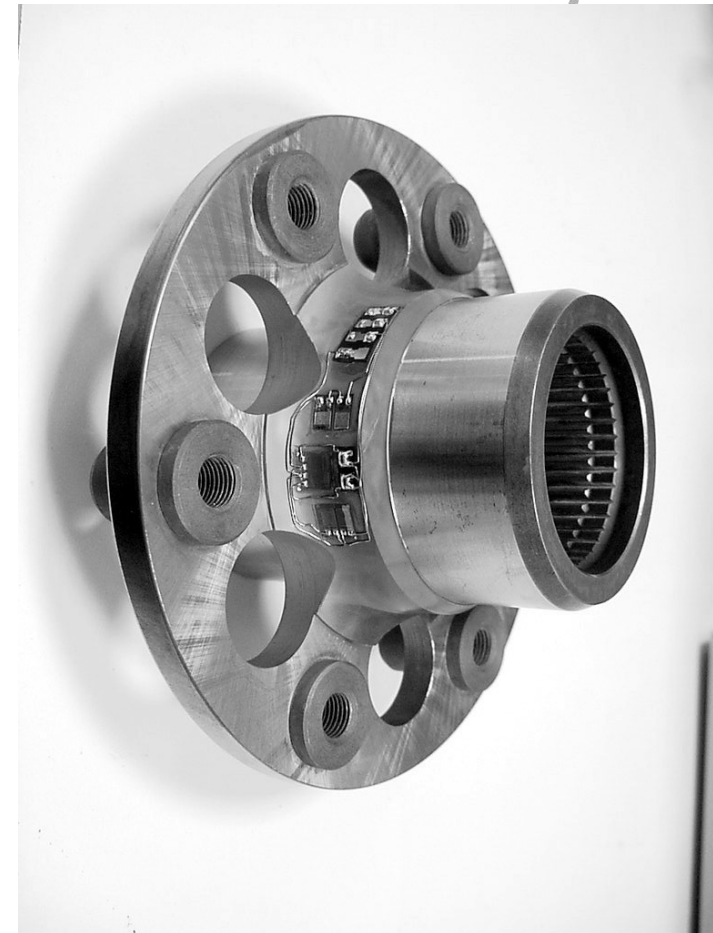
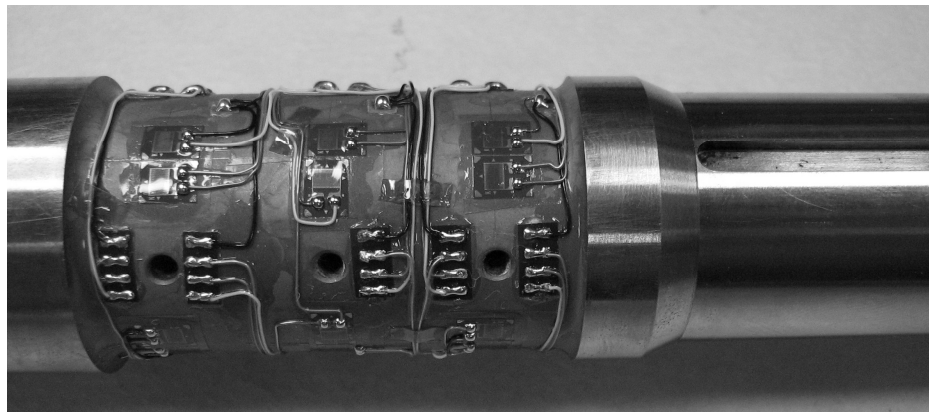
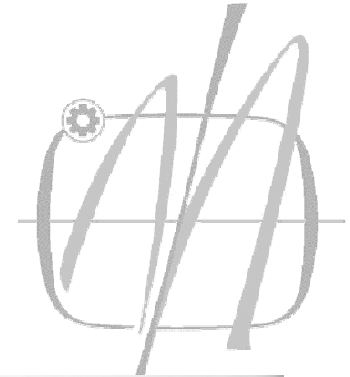


Fig. 3.2-8: Tangential stresses in the rounded section of the root of a gearwheel tooth.

Primena mernih traka drugi mašinski elementi



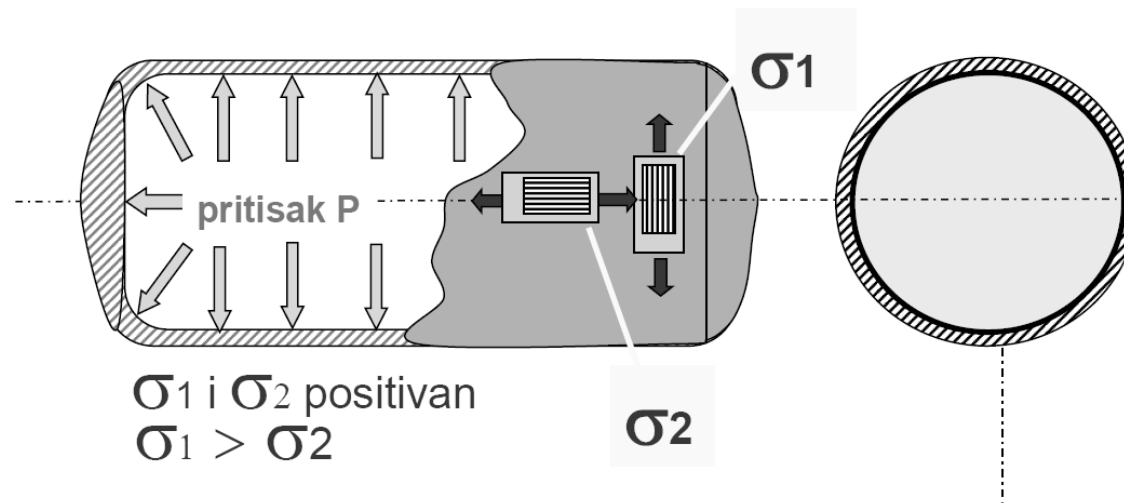
Merne trake – dvoosno naponsko stanje

U slučajevima ispitivanja objekata kod kojih su **poznati pravci glavnih Napona**, transferzalna deformacija se može izračunati proširenim obrascem Hukovog zakona:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)$$

Na primeru posude pod pritiskom, na čijoj površini vlada ravansko naponsko stanje, možemo odrediti napone pomoću primene ovih obrazaca.

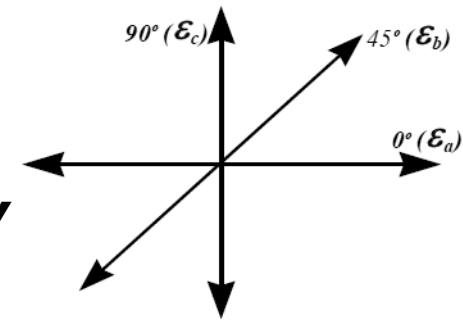


Posuda opterećena unutrašnjim pritiskom

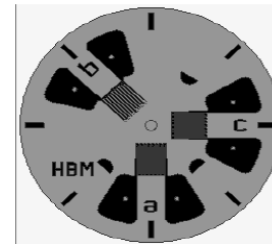
Merne trake – dvoosno naponsko stanje

Određivanje glavnih napona u slučajevima kad **glavni pravci nisu poznati**, a objekat ima kompleksnu geometriju ili opterećenje, vrši se merenjem deformacija u tri različita pravca za svaku mernu tačku (ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c). Ovaj način merenja se vrši korištenjem rozeta.

Način postavljanja mernih traka u rozete, kod merenja napona kod nepoznatih glavnih pravaca, može biti različit. Jedan od načina je **serija Y**



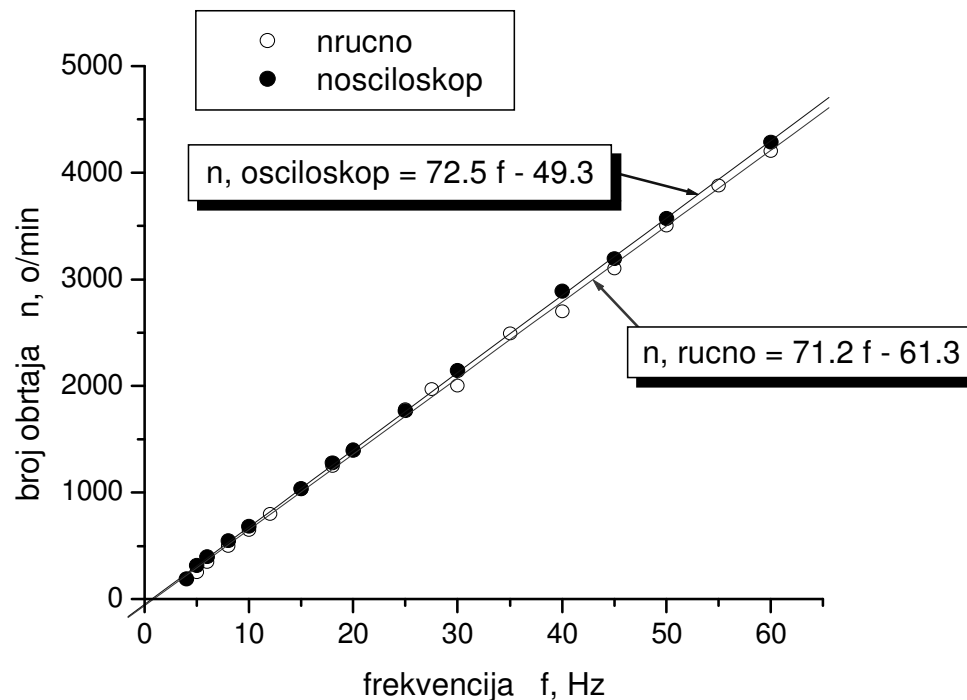
Merna vlakna se uvek povezuju kao tri nezavisna 1/4 mosta. Naponi se izračunavaju po modifikovanom obrascu za nepoznate glavne pravce



$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\mu)} \cdot \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_c - \epsilon_b)^2}$$

Kalibracija (baždarenje) merenja brzine obrtanja

Da bi se broj obrtaja glavnog vratila mogao precizno zadati i kontrolisati u toku izvođenja eksperimenta potrebno je prethodno definisati karakteristiku frekventnog regulatora. Radi utvrđivanja tačne zavisnosti broja obrtaja od frekvencije korišćena su dva postupka, pomoću mehaničkog tahometra i osciloskopom, pa su dobijene karakteristike:

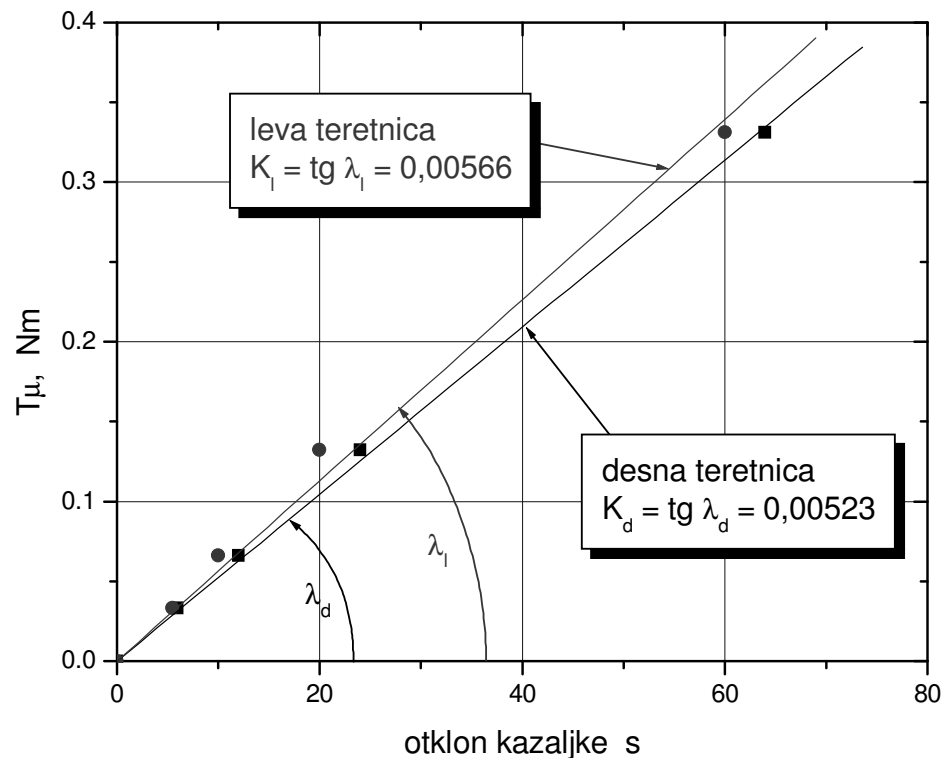


Kalibracija (baždarenje) teretnica

Pošto je zadržan već provereni način određivanja koeficijenta trenja preko veličine momenta trenja, potrebno izvršiti baždarenje dinamometara i određivanje konstanti leve i desne teretnice uređaja. Svaki od dinamometara se sastoji od elastičnog čeličnog lima na kome su zalepljene po četiri merne trake koje su povezane u pun merni most.

Pod baždarenjem dinamometara podrazumeva se zadavanje opterećenja pomoću tegova i istovremeno očitavanje mernog uređaja sa mernim trakama.

Rezultat baždarenja dinamometara čine dve prave koje predstavljaju karakteristike teretnica:



Kalibracija (baždarenje) teretnica

Primer: princip merenja trenja



Osnovna ideja je merenje vrednosti koeficijenta trenja preko veličine momenta trenja klizanja na površini dodira rukavca i čaure ležaja. Moment trenja klizanja je reaktivni moment suprostavljanja klizanju rukavca koji se obrće u čauri poroznog kliznog ležaja, pri čemu je on opterećen radijalnom silom i nalazi se u stanju mirovanja:

$$T_{\mu} = F_{\mu} \frac{d}{2}$$

Pošto se baždarenjem dinamometara obe teretnice uređaja izračunaju njihove konstante (K_l i K_d), moguće je odrediti veličinu momenta trenja u zavisnosti od otklona kazaljke instrumenta (s):

$$T_{\mu} = K_{l/d} s$$

Na osnovu veličine sile trenja može se izračunati koeficijent trenja:

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{W} = \frac{2K s}{d \cdot W}$$

gde je W – radijalna sila koja opterećuje čauru ležaja.

Povezivanje mernih traka u Wheatston-ov most

V_s - napajanje mosta jednosmernim ili naizmeničnim naponom

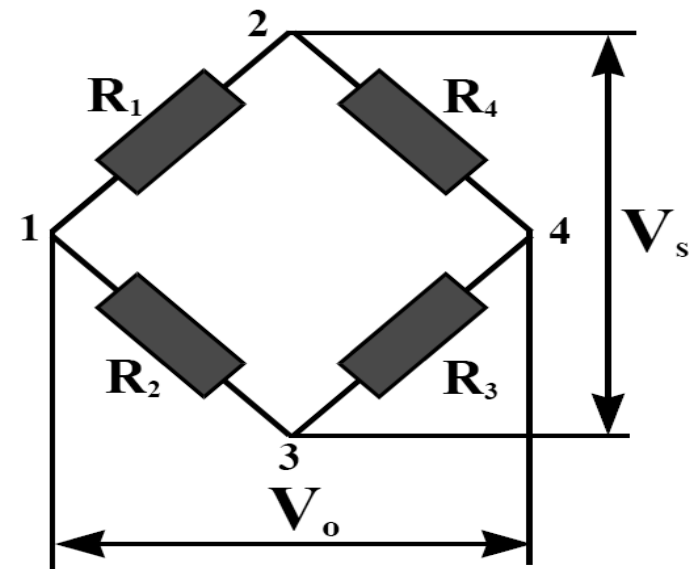
V_0 - izlazni napon koji predstavlja merni signal

Most je u ravnoteži (balansu)

$$V_0 / V_s = 0$$

U dva slučaja:

- Vrednosti otpora otpornika u mostu su jednaki: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$
- Odnos otpora otpornika u dve polovine mosta je isti: $R_1 / R_2 = R_3 / R_4$



Povezivanje mernih traka u Wheatston-ov most

Ukoliko otpornici u mostu menjaju svoje vrednosti otpora R_1 do R_4 , za neku određenu vrednost dR , tada kažemo da je most u debalansu i javlja se određeni izlazni napon V_0

Most **nije** u ravnoteži (balansu)
 $V_0 / V_S \neq 0$

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{R_1 + dR_1}{R_1 + dR_1 + R_2 + dR_2} - \frac{R_4 + dR_4}{R_4 + dR_4 + R_3 + dR_3} \right)$$

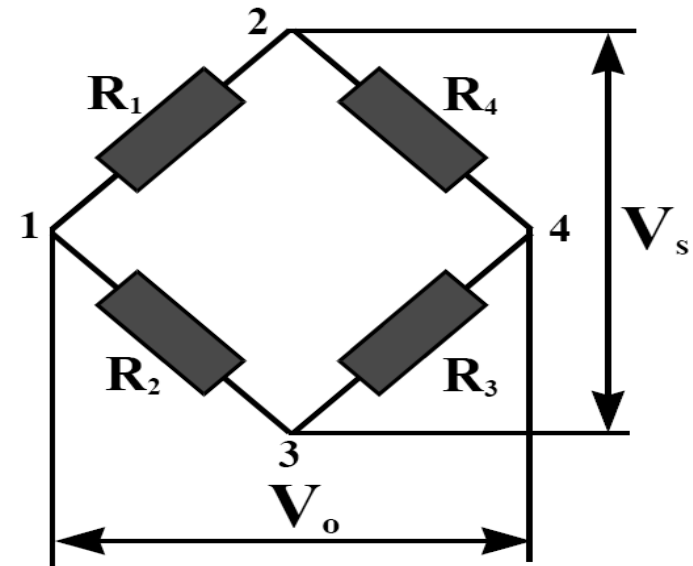
Uz pretpostavku da je $dR_i \ll R_i$:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} - \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right)$$

Korištenjem relacije $\frac{dR}{R} = k \cdot \varepsilon$ imamo konačan izraz:

Koeficijenta osetljivosti trake k

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$



Povezivanje mernih traka u Wheatston-ov most

Normalni naponi

B – pojačanje mernog mosta

s - pokazivanje mernog instrumenta

$$s = B \cdot \varepsilon$$

Ako uzmemo da je pokazivanje Instrumenta izlazni napon /napajanje

$$s \approx \frac{V_0}{V_s} = \frac{k}{4} \varepsilon$$

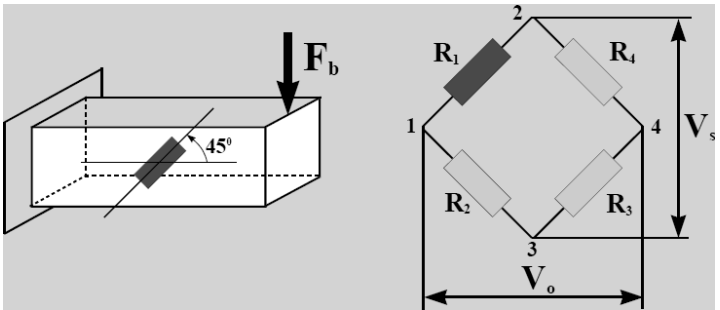
Može se reći da je:

$$B \approx \frac{k}{4}$$

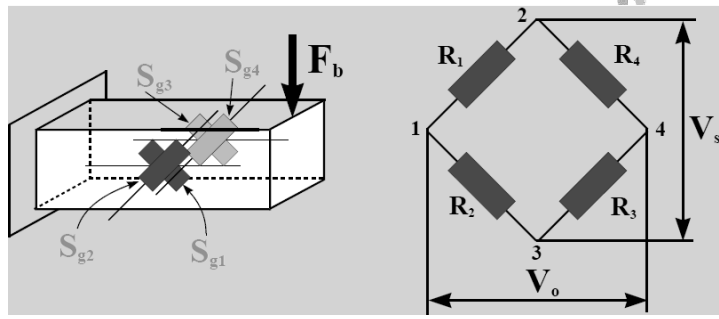
Broj traka	Istezanje	Savijanje
1	 $B = 1$	 $B = 1$
2	 $B = 1 + \nu$	 $B = 1 + \nu$
	 $B = 2$	 $B = 2$
4	 $B = 2(1 + \nu)$	 $B = 2(1 + \nu)$
	 $B = 2(1 + \nu)$	 $B = 4$

Povezivanje mernih traka u Wheatston-ov most

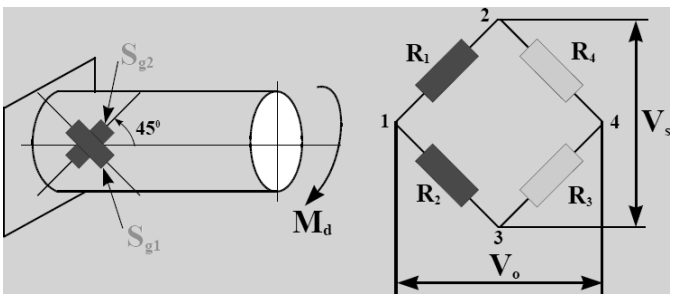
Tangentni naponi



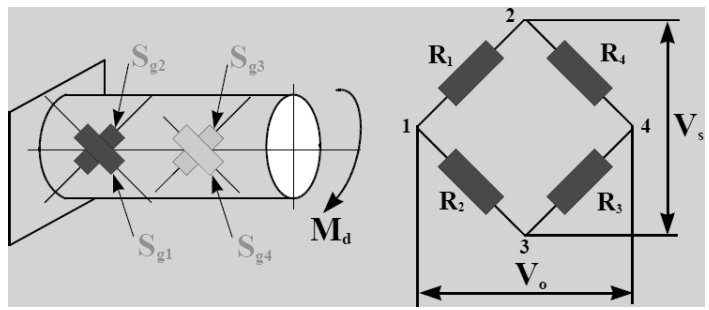
$$V_0 = \frac{V_s}{4} \cdot k \cdot \frac{\tau}{2 \cdot G}$$



$$V_0 = V_s \cdot k \cdot \frac{\tau}{2 \cdot G}$$



$$V_0 = \frac{V_s}{2} \cdot k \cdot \frac{\tau_{max}}{2 \cdot G}$$



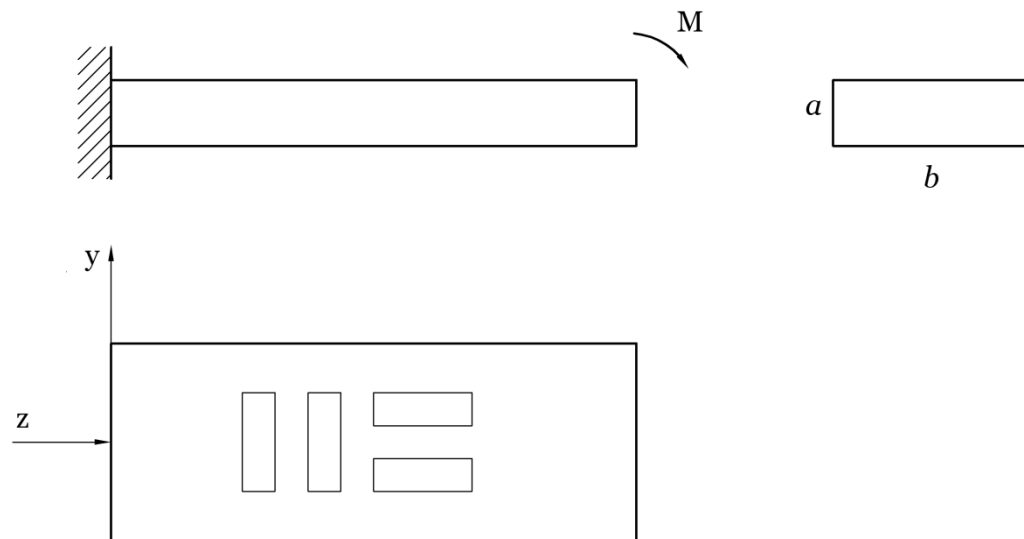
$$V_0 = V_s \cdot k \cdot \frac{\tau_{max}}{2 \cdot G}$$

Merne trake – računski primeri



Primeri: izračunavanje napona i deformacija pomoću mernih traka

Primer za savijanje



Primer za uvijanje

