

MERJENJE DEFORMACIJ IN UMERJANJE DINAMOMETRA

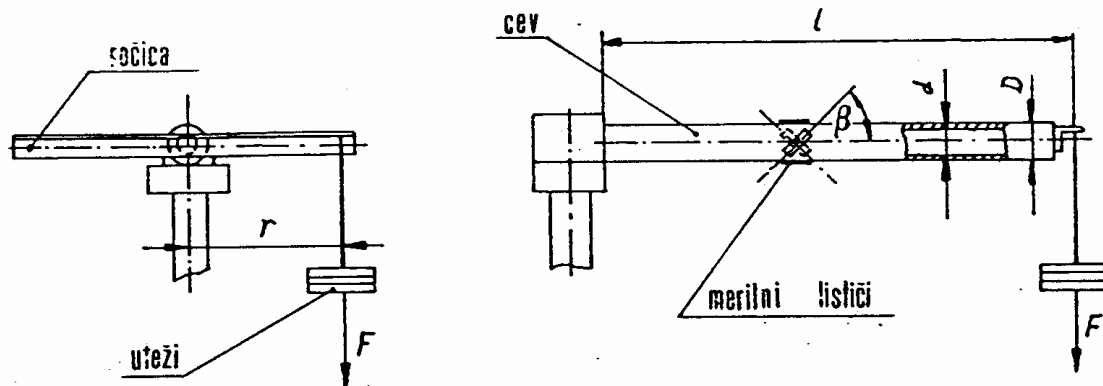
1. NAMEN VAJE

Namen vaje je spoznati metodiko gradnje dinamometrov na osnovi elastične deformacije z uporabo merilnih lističev – zgradbo, izvedbo, delovanje, in nadalje tudi vezavo v merilno verigo ter različne principe merjenja. Kot demonstrativni primer bo služil merilni sistem za merjenje torzijskih momentov. Na vaji bodo izvedene meritve torzijskih momentov in umerjanje dinamometra. Študentje se bodo seznanili tudi z vrednotenjem rezultatov in na podlagi dobljenih rezultatov ovrednotili meritve – ocenili dinamometer.

2. CILJ VAJE

Dinamometer za merjenje torzijskih momentov (Slika 2.1) opremite z merilnimi lističi, zvežite jih v polnomostičkovno vezavo ter mostiček priključite na Hottingerjev ojačevalnik KWS/II-5. Ugotovite odvisnost odčitanih vrednosti na ojačevalcu od torzijskih obremenitev in s tem konstanto dinamometra K (odč/Nm) v območju ± 150 Nm v skokih po 15 Nm s pomočjo regresijske premice ter ugotovi natančnost dinamometra z ugotavljanjem histereze ter izračunom korelacijskega koeficienta.

Pred pričetkom merjenja kontroliraj maksimalno obremenitev merilnega lističa ter razmerje med koristnim signalom in šumom na ojačevalniku.

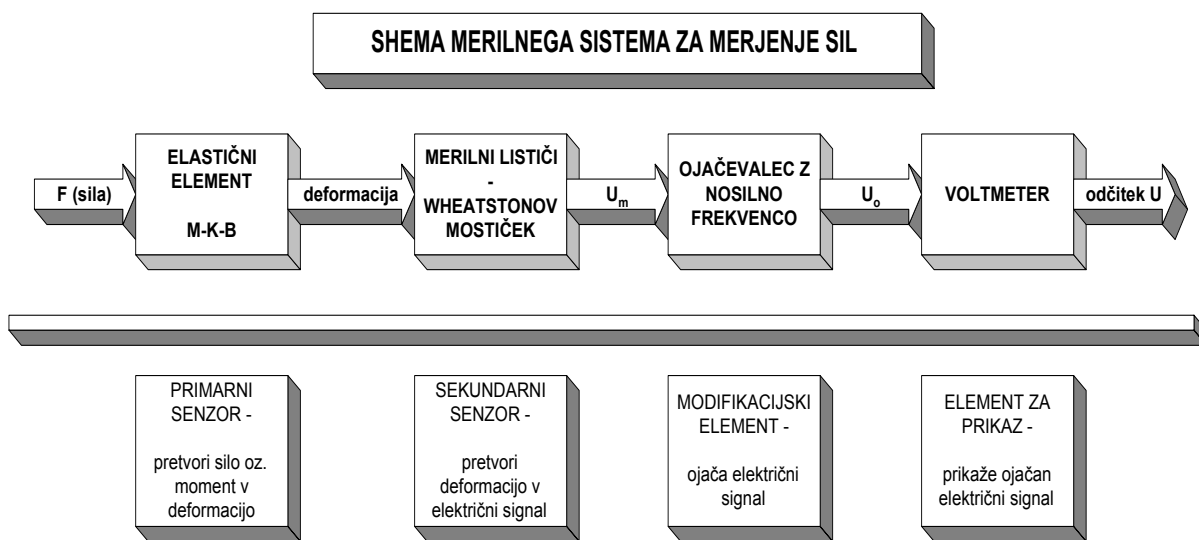


Slika 2.1: Dinamometer za merjenje torzijskih momentov

3. UPORABLJENE METODE – OPIS MERILNEGA SISTEMA

Opis merilnega sistema za merjenje sil in momentov - dinamometer

Princip: delovanje sile oz. momenta na elastični element, ki predstavlja primarni senzor in merjenje deformacije z merilnimi lističi.



Slika 3.1: Blokovna shema demonstracijskega sistema

Elastični senzorji za merjenje sil

- elastični senzor pretvori silo oz. moment v elastično deformacijo
- pri izračunu elastičnih senzorjev je potrebno upoštevati:
 1. najmanjšo deformacijo δ , ki jo povzroči najmanjša sila F_i merilnega območja z upoštevanjem razmerja med koristnim signalom in šumom
 2. dinamiko sistema masa - vzmet - dušilka (M-K-B), ki pogojuje uporabo dinamometra pri dinamičnih meritvah. Pri tem računamo transferne karakteristike, ki so pogojene predvsem z lastno frekvenco ω_n in faktorjem dušenja ζ .

$$(\omega_n > 10\omega_{imax})$$

4. POTEK PRAKTIČNEGA DELA VAJE

Osnovni koraki pri konstruiranju dinamometra

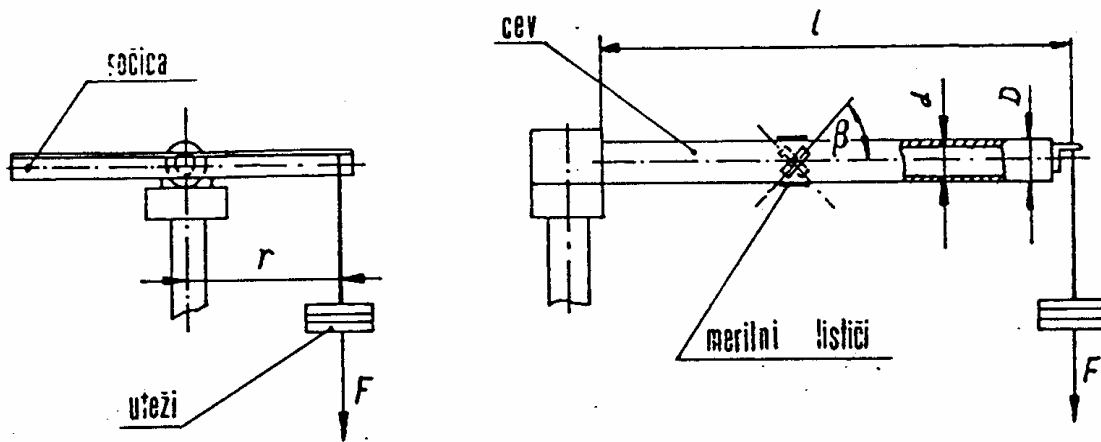
1. Izbor elastičnega elementa (primarni senzor: oblika, dimenzije, material)
2. Kontrola največje dopustne deformacije in sicer glede na največjo silo in glede na največjo dopustno deformacijo merilnega lističa.
3. Kontrola glede na frekvenčni pas sile.
4. Določitev najmanjše deformacije elastičnega senzorja glede na najmanjšo silo, ki jo želimo meriti.
5. Izbor merilnih lističev (sekundarni senzor).
6. Določitev napajalne napetosti Wheatstonovega mostiča glede na največji dopustni tok v merilnem lističu.
7. Izračun merilne napetosti glede na najmanjšo deformacijo.
8. Izračun termičnega šuma in kontrola razmerja koristni signal proti šumu

IZRAČUN:

Privzete specifikacije za dinamometer

Največja sila, ki jo želimo meriti	$F_{\max} = 500 \text{ N}$
Najmanjša sila, ki jo želimo meriti	$F_{\min} = 10 \text{ N}$
Frekvenčni pas sile	$\omega_{\max} = 50 \text{ rd/s}$
Dopustna deformacija merilnega traku	$\varepsilon_{\text{dop}} = 0,01$

1. Izbor elastičnega elementa (primarni senzor: oblika, dimenzije, material)



Oblika: CEV

Dimenzije: $D = 0.048 \text{ m}$
 $d = 0.042 \text{ m}$
 $l = 0.5 \text{ m}$
 $R = 0.4 \text{ m}$ (dolžina ročice)

Material: $G = 8,1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

2. Kontrola največje dopustne deformacije in sicer glede na največjo silo in glede na največjo dopustno deformacijo merilnega lističa.

$\beta = 45^\circ$ (kot največje deformacije)

$$\varepsilon_{\beta_{\max}} < \varepsilon_{dop}$$

$$\varepsilon_{\beta_{\max}} = \frac{16 \cdot D \cdot \sin 2\beta}{\pi \cdot (D^4 - d^4)} \cdot R \cdot F_{\max} < \varepsilon_{dop}$$

3. Kontrola glede na frekvenčni pas sile.

Lastna frekvenca elastičnega elementa mora biti vsaj za dekada višja od frekvenčnega pasu sile, da nam to omogoča merjenje dinamične in dinamično statične obremenitve.

$$\omega \geq 10 \cdot \omega_{i\max}$$

Upoštevati moramo dinamiko sistema M-K-B in glede na to sledijo enačbe za lastno frekvenco

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

oZ.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_T}{J}} = \sqrt{\frac{G \cdot I_p}{l \cdot J}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi \cdot G \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot l \cdot M}}$$

V kolikor pogoj ni izpolnjen, običajno povečamo odpornostni moment W_p , s tem pa povečamo togost primarnega senzorja.

$$W_p = \frac{(D^4 - d^4) \cdot \pi}{16 \cdot D}$$

4. Določitev najmanjše deformacije elastičnega senzorja glede na najmanjšo silo, ki jo želimo meriti.

$$\varepsilon_{\min} = \frac{16 \cdot D}{\pi \cdot (D^4 - d^4) \cdot G} \cdot R \cdot F_{\min}$$

Minimalno deformacijo izračunamo zaradi kontrole razmerja koristni signal proti termičnemu šumu, kajti glede na minimalno deformacijo računamo tudi minimalno merilno napetost, ki predstavlja koristni signal.

5. Izbor merilnih lističev (sekundarni senzor).

Pri izbiri merilnih lističev sta ključna parametra K in R.

Izbrani merilni lističi imajo naslednje lastnosti:

K faktor	2
normalna upornost R	120 Ω
maksimalni tok skozi merilni listič	0.025 A
linearni razteznostni koeficient α_{lin}	11x10 ⁻⁶ /°C
upornostni koeficient α_{20°	10 ⁻⁵ /°C
maksimalna temperatura uporabe	200 °C
maksimalni raztezek	1%
maksimalna merilna frekvenca	50 kHz
normalna obremenitev na površino lističa	20 mV/mm ²

6. Določitev napajalne napetosti Wheatstonovega mostiča glede na največji dopustni tok v merilnem lističu.

$$U_{B \max} = 2 \cdot R_N \cdot I_{\max}$$

R_N - nadomestna upornost Wheatstonovega mostiča

Glede na izračunano maksimalno napajalno napetost izberemo napetost, ki jo omogoča naš ojačevalac:

U_B ojačevalca je 1, 4 ali 10 V.

7. Izračun merilne napetosti glede na najmanjšo deformacijo.

Za 4 aktivne merilne lističe je izračun za merilno napetost sledeč:

$$U_{M/\min} = U_B \cdot K \cdot \varepsilon_{\min}$$

8. Izračun termičnega šuma in kontrola razmerja koristni signal proti šumu

Velikost motilnega signala, to je termičnega šuma izračunamo po sledeči enačbi:

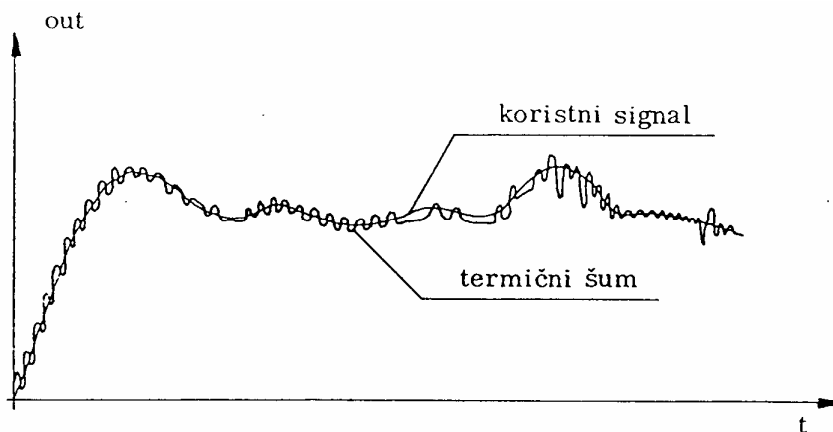
$$U_{\delta} = \sqrt{4 \cdot \Delta f \cdot \vartheta \cdot R \cdot k}$$

Δf - širina frekvenčnega pasu osciloskopa, s katerim ugotavljamo termični šum = 5000 Hz

k - Boltzmanova konstanta $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K

ϑ - absolutna temperatura (K) = 293 K

R - upornost merilnega lističa = 120 Ω



Kontrola razmerja: koristni signal proti termični šum

$$\frac{U_M}{U_{\delta}} \geq 10$$

5. PRIKAZ IN VREDNOTENJE IZMERJENIH REZULTATOV

Umerjanje dinamometra (statično)

Določitev številčne vrednosti karakteristike dinamometra.

Splošno:



Umerjanje: IN - znan kalibracijski signal
 OUT - odčitujemo izhodni signal
 MS - določamo karakteristiko merilnega sistema

Merjenje: IN - neznan (merjena veličina)
 OUT - odčitujemo izhodni signal
 MS - karakteristika merilnega sistema je znana

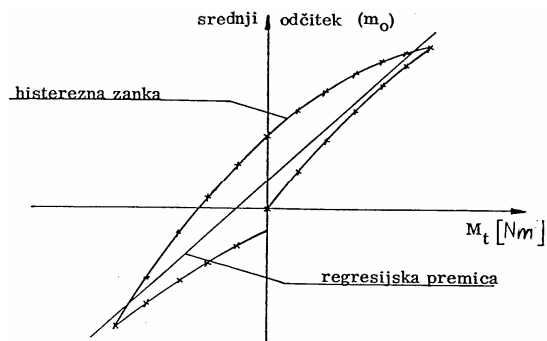
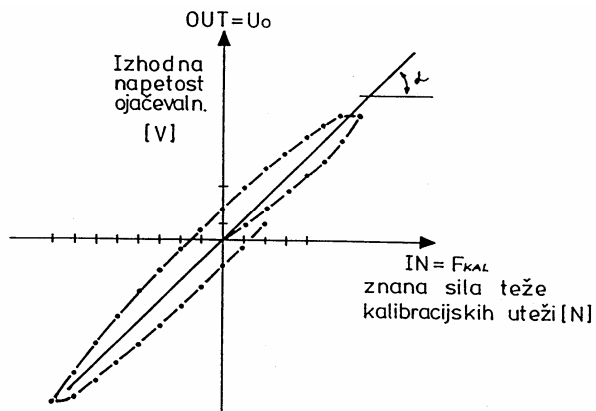
Izračunana karakteristika:

$$K = \frac{OUT}{IN} = \operatorname{tg} \alpha$$

K - ojačanje sistema

Merjenje:

$$IN = \frac{1}{K} OUT$$



Histerezna zanka

Histerežno zanko dobimo, če zasledujemo izstopni signal z večkratnim postopnim obremenjevanjem testiranega dinamometra od 0 do Mt_{\max} , nadalje od Mt_{\max} do Mt_{\min} in končno razbremenjevanjem do 0. Histereza je eno izmed meril natančnosti dinamometra.

Regresijska premica

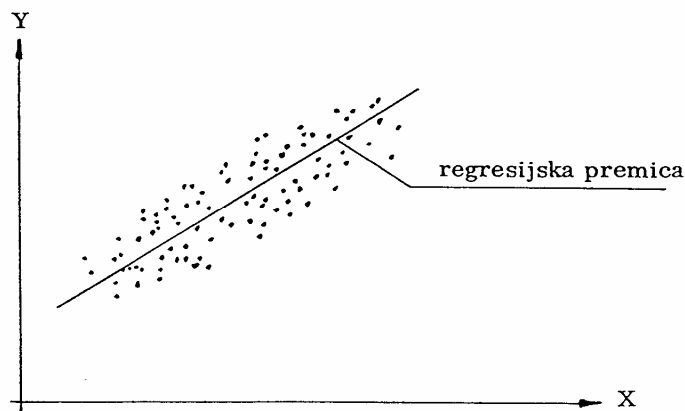
Linearna enačba nam omogoči preprosto vrednotenje eksperimentalnih rezultatov

Enačba regresijske premice:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X$$

$$a_0 = \frac{\sum Y \sum X^2 - \sum X \sum (XY)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$a_1 = \frac{n \sum (XY) - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$



Korelacijski koeficient

S pomočjo korelacijskega koeficienta r_{xy} , ki je definiran s kvocientom korelacijskega momenta K_{xy} , ter standardnima deviacijama s_x in s_y , ugotavljamo determinističnost funkcijske zveze.

Korelacijski koeficient je definiran z enačbo:

$$r_{xy} = \frac{n \sum (XY) - \sum X \cdot \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

6. KOMENTAR – VPRAŠANJA ZA RAZMISLEK

- Zgradba merilnih lističev?
- Princip delovanja merilnih lističev?
- Faktor ojačanja merilnih lističev?
- Koraki pri konstruiranju dinamometrov?
- Kaj je potrebno paziti pri konstruiranju dinamometrov?
- Kako obvladujemo vpliv upogiba pri merjenju torzijskih meritev v tovrstnih merilnih sistemih?
- Kako obvladujemo vpliv temperature pri tovrstnih meritvah?
- Načini vrednotenja rezultatov – kaj nam pove histerezna zanka in korelacijski koeficient in kako ju določimo?
-

DODATEK – TEORETIČNE OSNOVE

Merilni trakovi

- ❑ Merilni trakovi so senzorji ki pretvorijo deformacije v električne signale.
- ❑ Merilne lističe se uporablja za merjenje malih deformacij, raztezkov ali napetosti v strojnih delih in elementih pod statičnimi in dinamičnimi obremenitvami.

Princip delovanja

Prevodna žica dolžine L in preseka A s specifično upornostjo ρ ima upornost R :

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

če to žico obremenimo na nateg ali tlak se spremeni njegova upornost.

Izpeljava faktorja ojačanja K za merilne lističe.

spremembo upornosti dobimo z diferenciranjem zgornje enačbe:

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

volumen žice je

$$V = A.L$$

in njegov diferencial je

$$dV = AdL + LdA$$

velja tudi

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

kjer je raztezek

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

in μ = Poissnova konstanta.

Ker je raztezek zelo majhen lahko zapišemo

$$(1 - \varepsilon \cdot \mu)^2 \approx 1 - 2\varepsilon \cdot \mu$$

in z upoštevanjem tega lahko zapišemo

$$dV = A l \epsilon (1 - 2\mu) = A dL + L dA$$

sledi:

$$A dL (1 - 2\mu) = A dL + L dA$$

in

$$-2\mu A dL = L dA$$

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

Sedaj sledi

$$dR = \frac{\rho \cdot dL (1 + 2\mu)}{A} + \frac{L d\rho}{A}$$

Izraz za **relativno spremembo upornosti** dobimo z deljenjem z

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

in dobimo

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

Če to enačbo delimo z

$$\frac{dL}{L}$$

dobimo faktor ojačitve K

$$K = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L}$$

1. člen tega izraza pomeni spremembo upornosti R zaradi spremembe dolžine L
2. člen tega izraza pomeni spremembo upornosti R zaradi spremembe preseka A
3. člen tega izraza pomeni spremembo upornosti R zaradi spremembe piezoupornosti

Faktor K je odvisen od materiala, ki ga uporabljamo za merilne lističe.

Z znanim faktorjem ojačanja K lahko z merjenjem dR/R ugotovimo velikost raztezka in s tem tudi napetosti v materialu.

$$\varepsilon = \frac{dL}{L}, \sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{dL}{L} E$$

E.....modul elastičnosti

Pri konstrukciji merilnega sistema z merilnimi lističi le-te izbiramo glede na primerno vrednost K in R.

Osnovne zahteve za merilne lističe:

1. upornost merilne žice mora biti dovolj velika in
2. merilni trak mora dobro slediti deformacijam merjenega objekta.

Izvedbe merilnih lističev

- Merilni lističi so najpogosteje v izvedbi kot žični merilni lističi (*ravninsko ali spiralno navitje*) ali pa kot folijski merilni listič.
- Najbolj pogost material, ki se uporablja za merilne lističe je konstantan, to je legura z visoko specifično upornostjo.
- Standardni merilni lističi so uporabni do temperature okrog 200 °C.

Lepljenje merilnih lističev na elastični element

Nemeščanje merilnih trakov je ključnega pomena za zanesljivost merilnih rezultatov, kajti merilni lističi morajo dobro slediti deformaciji elastičnega elementa. Lepila za merilne lističe predpiše proizvajalec in so odvisna od samih merilnih lističev in od okolja v katerem jih uporabljamo.

Postopek nameščanja merilnih lističev:

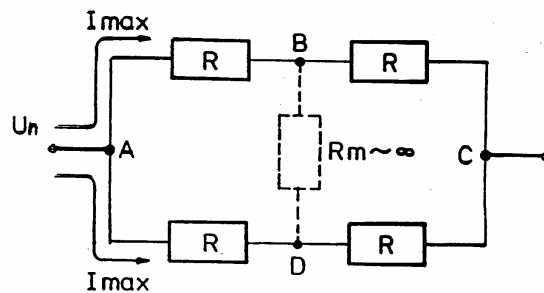
1. Priprava površine na katero bomo namestili merilne lističe
 - čiščenje (s smirkovim papirjem da dosežemo zahtevano hrapavost)
 - razmaščevanje površine
2. Lepljenje merilnih lističev na površino (ne sme biti zračnih mehurčkov med površino in lističem)

3. Priključitev merilnih lističev

4. Zaščita merilnih lističev z zaščitno plastjo (pred vlago, maščobami, kemikalijami,...)

Izračun nadomestnih upornosti v Wheatstonovem mostiču

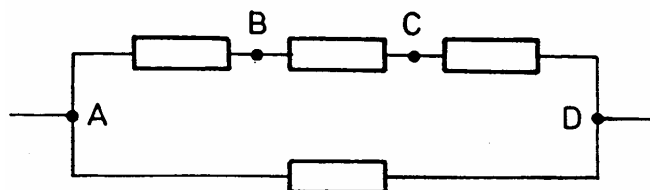
1. Nadomestna upornost na stičiščih A-C ali B-D (slika) je enaka:



$$R_N = \frac{2R \cdot 2R}{2R + 2R} = \frac{4}{4}R = R$$

$U_n = R_n \cdot 2 \cdot I_{\max}$; na posameznem lističu je omejen tok I_{\max} .

2. Nadomestna upornost na A-B ali B-C ali C-D ali A-D pa je potem:



$$R_N = \frac{1R \cdot 3R}{1R + 3R} = \frac{3}{4}R$$

Določitev merilne napetosti za različna števila aktivnih merilnih lističev

za 1 aktivni merilni listič

$$U_M = \frac{1}{4} U_B \cdot K \cdot \varepsilon$$

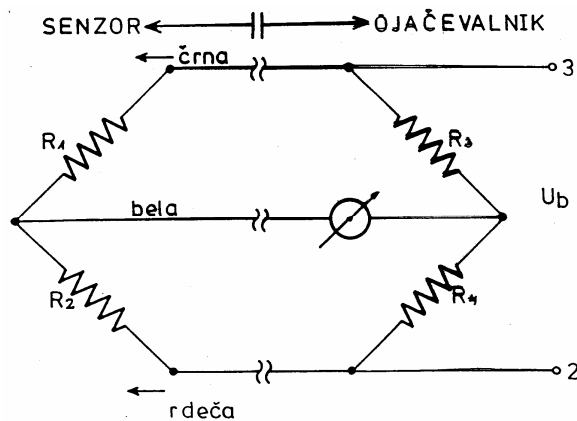
za 2 aktivna merilna lističa

$$U_M = \frac{1}{2} U_B \cdot K \cdot \varepsilon$$

za 4 aktivne merilne lističe

$$U_M = U_B \cdot K \cdot \varepsilon$$

Pol – mostičkovna vezava merilnih trakov:

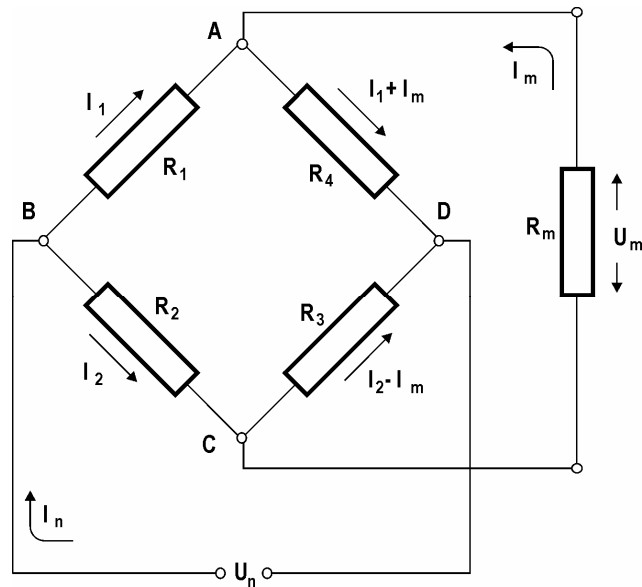


Vezava merilnih lističev v Wheatstonov mostiček

Mostične vezave merilnih trakov izvedemo v obliki četrtmosta, polmosta ali v obliki popolnega Wheatstonovega mostiča.

Analiza Wheatstonovega mostiča

Napajalna napetost mostiča je lahko enosmerna ali izmenična. Princip merjenja z mostičem je lahko merjenje z ničelno ali odklonsko metodo.



V primeru, da je mostič v ravnotežju je napetost med B in D enaka $U_{BD}=0$. To pomeni, da mora biti razmerje uporov enako:

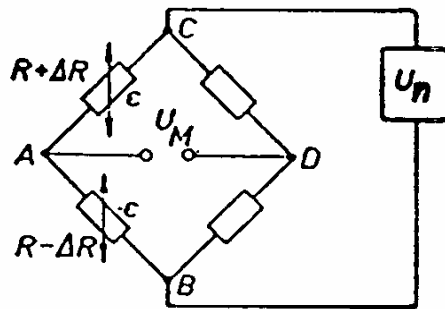
$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

Če spremenimo vrednost upornosti R_1 je mostič iz ravnotežja in skozi kazalni element teče tok i_m .

Polmostičkovna vezava

dva sta aktivna in prilepljena na elastični element ter registrirata spremembo dolžine zaradi spremembe zunanjih mehanskih obremenitev in spremembe temperature, ostala dva pa sta pasivna ter ju večkrat nadomeščata stalna upora v ojačevalniku.

Prikazana vezava zagotavlja, da je merjena napetost odvisna le od deformacij zaradi vpliva zunanje sile.



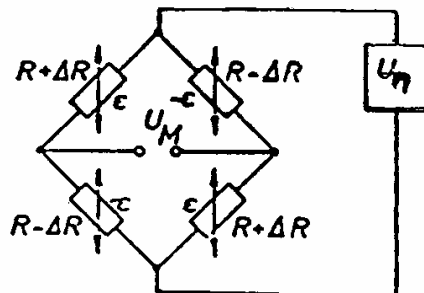
U_n – napajalna napetost
 U_M – merjena napetost

$$U_M = \frac{U_n}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{U_n}{2} \cdot K \cdot \varepsilon$$

Polnomostičkovna vezava

Polnomostičkovna vezava v Wheatstonov mostiček so vezani štirje aktivni merilni lističi. Tovrstna vezava kompenzira tisti del navideznih raztezkov pri spremembi temperature na merjenem mestu, ki nastanejo zaradi različnih linearnih razteznostnih koeficientov merilnega lističa in objekta.

Merilni lističi so tipizirani na srednje vrednosti razteznostnih koeficientov najpogosteje uporabljenih materialov elastičnega elementa.



U_n – napajalna napetost
 U_M – merjena napetost

$$U_M = U_n \cdot \frac{\Delta R}{R} = U_n \cdot K \cdot \varepsilon$$

Pojavi, ki spremljajo uporabo merilnih lističev

Vpliv temperature

Temperatura predstavlja modifikacijski input v merilnih sistemih v katerih uporabljamo merilne lističe.

Vzrok

zaradi termičnih raztezkov ali skrčkov materiala (primarnega senzorja) na katerem so prilepljeni merilni lističi pride do dodatnih mehanskih napetosti, ki niso rezultat mehanskih obremenitev

Posledica

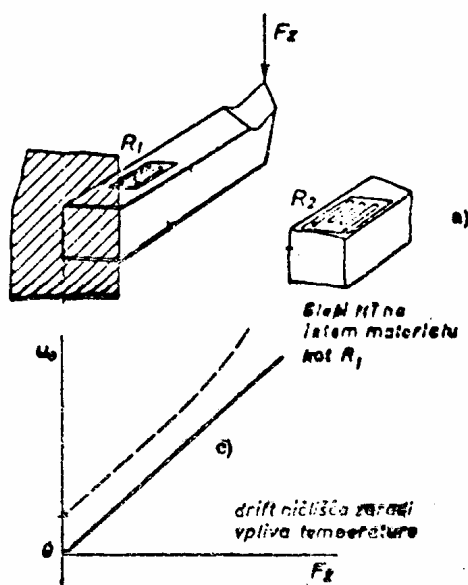
premik ali drift ničlišča karakteristike med obremenitvijo, ki jo merimo in izhodne napetosti, ki je posledica spremembe upornosti.

Odpravljanje vpliva temperature - temperaturna kompenzacija

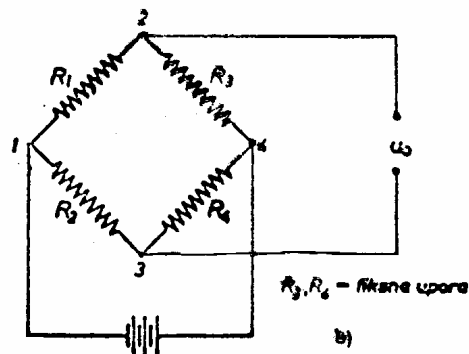
Eden od načinov temperaturne kompenzacije je merjenje deformacij s pomočjo več merilnih lističev, ki jih namestimo na merilno mesto, ter jih zvežemo v primerno mostičkovno vezavo.

Primer 1:

Temperaturno kompenzacijo dosežemo z namestitvijo slepega merilnega traku R_2 na nosilec z enakim razteznostnim koeficientom kot ga ima orodje.



- a - merjenje sile F_z z merilnim trakom R_1 in generiranje dodatne toplote na merilnem mestu
- b - vezava merilnih trakov R_1, R_2 v Wheatstonov mostiček
- c - vpliv temperature na ničlišče



Termični šum - Johnsonov efekt

Zaradi naključnega nihanja prostih elektronov, ki so posledica temperature v vodniku pride do termičnega šuma, ki se izraža v koristnem signalu kot motilni del signala. Če je koristni signal zelo majhen v primerjavi s termičnim šumom meritve raztezka s pomočjo merilnih lističev niso mogoče. Zaradi tega je pri konstruiranju nujna kontrola termičnega šuma.

Velikost motilnega signala, to je termičnega šuma izračunamo po sledeči enačbi:

$$U_s = \sqrt{4 \cdot \Delta f \cdot \vartheta \cdot R \cdot k}$$

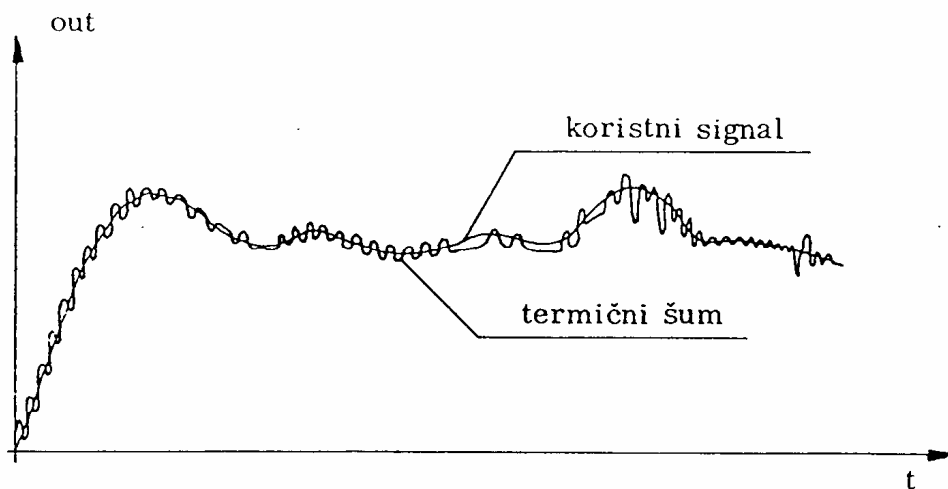
Δf - širina frekvenčnega pasu osciloskopa, s katerim ugotavljamo termični šum

k - Bolzmanova konstanta $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K

ϑ - absolutna temperatura (K)

R - upornost merilnega lističa

Kontrola razmerja koristni signal in termični šum $\gg 10$



Zahteve pri konstruiranju dinamometrov:

- majhna merilna pot oz. deformacija primarnega senzorja (merilni postopek ne sme vplivati na parametre procesa ali pojava),
- dimenzije primarnega senzorja (omejen prostor, dinamične meritve - masa čim manjša da je lastna frekvenca čim višja),
- konstrukcija in vpetje primarnega senzorja, ki ne dopušča mehanske histereze (popači merilni rezultat),
- veliko merilno območje,
- zahtevana natančnost (želimo čim manjšo napako),
- odgovarjajoče dinamične karakteristike z ozirom na časovni potek sile, ki jo merimo (lastna frekvenca in dušenje),
- neodvisnost merjenja komponent sil F_x , F_y , ...,
- lahko in enostavno umerjanje,
- robustnost konstrukcije,
- enostavno posluževanje.