# Názov cvičenia: Meranie mechanický veličín - tenzometre

**Ciel'** tohoto cvičenia charakterizuje pochopenie princípu činnosti snímačov mechanických veličín s tenzometrami, poznanie možností kompenzácií ovplyvňujúcich veličín takéhoto merania a praktické overenie vlastností tenzometrického snímača pri deformácii nosníka (jeho priehyb) a *snímača hmotnosti s deformačným tenzometrickým prvkom*.

# <u>Úlohy:</u>

- 1. Naštudujte základné vlastnosti tenzometrických snímačov mechanických veličín, ovplyvňujúce veličiny tohto merania, vyhodnocovacie zapojenia tenzometrov a vlastnosti meracích členov sily a tlaku [SaP], [Rozbor úlohy -ďalej]
- 2. Vypracujte analýzu tenzometrického mostíka podľa zadania v [Rozbor úlohy]
- 3. Oboznámte sa s automatizovaným tenzometrickým pracoviskom a s jeho možnosťami miestneho (lokálneho a pomocou PC) a diaľkového (cez internet) ovládania. Ukážka diaľkového a miestneho merania (PC) priehybu nosníka podľa normy STN EN 60 770.
- 4. Zmerajte priehyb nosníka prostredníctvom lokálnej mikropočítačovej jednotky pre aspoň dve rôzne zapojenia tenzometrov prostredníctvom lokálnej riadiacej jednotky, vyhodnoť te meranie podľa STN EN 60770 a porovnajte výsledky meraní s automatizovaným meraním, bod 2.

# Rozbor úlohy:

Odporový tenzometer je snímač, ktorého zmena elektrického odporu závisí od zmien spôsobených jeho deformáciou. Pod pojmom deformácia, sa vzhľadom na malé rozmery snímača, uvažuje len deformácia ťahom alebo tlakom podľa Hookovho zákona, t.j. v medziach pružnosti (vratný dej). Prevedenie je buď drôtikové, fóliové, alebo polovodičové (difúzne odpory, monokryštály) [SaP]. Typický tvar tenzometra je na obr. 1, jeho meandrovitý tvar zabezpečuje zvýšenie citlivosti. Ak je snímač tvorený N "závitmi", potom pri predlžení o  $\Delta l$  je celková zmena dlžky  $N\Delta l$ .



Obr. 1. Tenzometre: a) typický tvar fóliového tenzometra, b) zapojenie tenzometrov do mostíka.

#### <u>Bod 2</u>

Kolísanie teploty okolia tenzometra spôsobuje zmeny mechanických ale aj elektrických parametrov celého meracieho bloku. Sú to: zmena odporu tenzometra, zmena súčiniteľa deformačnej citlivosti, zmena rozťažnosti materiálu tenzometra a namáhaného materiálu, zmena parametrov podložky a lepidla, vznik termoelektrického napätia. Aj pomerne malé zmeny teploty spôsobujú zmeny odporu tenzometra porovnateľné zo zmenami odporu pri namáhaní.

# Analýza tenzometrického mostíka

Uvažujme o tenzometroch zapojených do Wheatstonovho mostíka. Nominálne hodnoty všetkých štyroch odporov sú rovnaké:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ . Pri napájaní mostíka konštantným napätím  $U_N$ , bude výstupné napätie v diagonále vyváženého mostíka nulové. Pri nevyváženom mostíku bude jeho veľkosť

$$U_{0} = U_{N} \left( \frac{R_{2}}{R_{1} + R_{2}} - \frac{R_{4}}{R_{3} + R_{4}} \right)$$
(1)

Odpor tenzometra je daný vztahom

$$R_i = \rho \frac{l}{S} \qquad \left[\Omega; \Omega m, m, m^2\right]$$

a pričom sa uvažuje jeho zmena buď deformáciou  $(\Delta l, \Delta S)$  alebo vplyvom poruchovej veliciny – teploty  $\mathcal{G}$ :

$$R_i = R(1 + \alpha.\mathscr{G}) \qquad [\Omega; \Omega, °C^{-1}, °C]$$

Pretože presné hodnoty ovplyvnujúcich veličín nepoznáme, budeme uvažovať iba o zmenách voči nominálnej hodnote R. Zmenu odporu R<sub>i</sub> vplyvom meranej veličiny (sila, tlak) označíme  $\Delta R_{\text{Li}}$  zmenu odporu vplyvom teploty označíme  $\Delta R_{\text{Li}}$ . Celková hodnota odporu teda bude

$$R_{\rm i} = R \pm \Delta R_{\rm Li} \pm \Delta R_{\rm Ti}$$

Znamienko zmeny odporu  $\Delta R_{\text{Li}}$  závisí od typu namáhania (ťah  $\rightarrow$  +, tlak  $\rightarrow$  - ,). Ak označíme relatívnu zmenu odporu od dlžky  $\Delta R_{\text{Li}} / R_{\text{i}}$  symbolom  $r_{\text{Li}}$ , resp. od teploty  $r_{\text{Ti}}$ , môžeme zapísať

$$R_{\rm i} = R \left( 1 + r_{\rm Li} + r_{\rm Ti} \right) \tag{2}$$

Zistite (odvoďte z (1) a (2)), aká je závislosť  $U_0 = f(\mathbf{r}_L)$ , resp.  $U_0 = f(\mathbf{r}_T)$ ak sú tenzometre zapojené buď

- 1. R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> na hornej strane nosníka, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> na spodnej strane (t.j. R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> namáhané na ťah, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> na tlak, príp. opačne).
- 2. R<sub>1</sub>, R<sub>4</sub> na hornej strane nosníka, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> na spodnej strane (t.j. dvojice  $\Delta R_{L1}$ ,  $\Delta R_{L4}$  a  $\Delta R_{L2}$ ,  $\Delta R_{L3}$  majú rovnaké znamienka).

Ktoré zo zapojení je vhodné na meranie tlaku, resp. sily? Pomôcky:

- Tenzometre sú párované a vyberané tak, aby  $r_{L1} = r_{L2} = r_{L3} = r_{L4} = r_L;$  $r_{T1} = r_{T2} = r_{T3} = r_{T4} = r_T$
- Po úprave vztahu (1) využite pri interpretácii výsledku skutočnosť, že relatívna zmena odporu teplotou predstavuje asi 1% nominálnej hodnoty (t.j.  $r_{I,i} = 0,01$ ).

Vplyv teploty možno vylúčiť kompenzačným zapojením napr. ďalším tenzometrom, autokompenzáciou alebo korekciou nameraných údajov.

# **Bod 3**

#### Pracovisko s tenzometrickými snímačmi

Ako pružný člen bol vybratý nosník z hliníkovej zliatiny (duralu) na oceľovej konštrukcii deformačného zariadenia. Otáčaním skrutkovnice na konštrukcii pôsobí sila na koncoch nosníka smerom nadol a ohýba nosník okolo oporných bodov konštrukcie. Stred nosníka stúpa smerom nahor a tento zdvih predstavuje meranú veličinu a je meraný ručičkovým µmetrom – odchýlkomerom (obr.2)



Obr. 2. Oceľová konštrukcia s duralovým nosníkom

V našom prípade je **maximálna deformácia t.j. priehyb (zdvih) nosníka 1 mm.** Zdvih indikuje ručička odchýlkometra, s rozlíšením 0.01mm.

Na nosníku sú nalepené fóliové (zelené) a polovodičové (žlté) tenzometre podľa obr.3. Oba majú svoje výhody aj nevýhody. Polovodičové sú približne 50-krát citlivejšie, no majú nelineárnu prevodovú charakteristiku. Tenzometre na hornej strane nosníka sú namáhané ťahom a tenzometre na dolnej strane nosníka tlakom.

## Popis zapojenia meracích kanálov:

Pre jednoduchšiu orientáciu je schéma rozdelená do blokov obsahujúcich ďalšie schémy t.j. schémy meracích kanálov a schému zdroja. Zdroj s jednosmerným napätím  $U_{nap} = +15V$  napája všetky integrované prevodníky AD693 v každom meracom kanáli a zároveň je zdrojom pre prúdové slučky (4÷20mA) kanálov A až E, t.j. použité je dvoj-vodičové pripojenie prevodníkov. Cez zdroj stabilného napätia sú napájané všetky mostíky s konštantným napätím U = +10V. Podľa požiadaviek používateľa existuje možnosť voľby meranej veličiny a to buď prúdu alebo napätia. Pre túto voľbu slúži prepínač S1 (na doske plošného spoja), ktorý v polohe '0' poskytuje prúdový výstup, v polohe '1' napäťový výstup (nezasahovať, zvolený je prúdový!!!). Napäťový výstup je realizovaný zaradením odporu do prúdovej slučky. *Ďalší popis je uvedený len* 

*informácia pre "zvedavých konštruktérov", tj. pôvodné – neautomatizované riešenie výstupov.* Následne k voľbe jednotiek je potrebné pripájať ampérmeter alebo voltmeter (znázornené prepínačom S2). Posledným prepínačom S3 (realizovaný je skrinkou so zasúvacími svorkami) je možné zvoliť si meraný kanál. Výstupné signály z kanálov a napájanie kanálov  $U_{nap}$  je realizované káblom cez konektor CANNON 15.



pohľad z hornej strany nosníka pohľad z dolnej strany nosníka Obr. 3. Rozmiestnenie tenzometrov na nosníku



Obr. 4. Celková schéma zapojenie všetkých meracích kanálov v pôvodnom ("ručnom") prevedení vyhodnocovania

Jednotlivé kanály obsahujú tenzometre označené rovnakým písmenom ako názov kanálu (napr. kanál A obsahuje tenzometre R1A, R2A, R3A, R4A). Tenzometre v každom kanáli sú zapojené do mostíka a diferenciálne napätie je privádzané do prevodníka AD693.

Tenzometre	Kovové	Polovodičový		
Тур	KFC-2-D1-23	KFC-5-350-C1-23	KSP-2-E3	
Odpor R [Ω]	119.9±0.4	350±0.6	110±2%	
Súčiniteľ'	2.11	2.1±1%	124±3%	
deformačnej				
citlivosti K				
Teplotný súčiniteľ	pprox 0	pprox 0	-0.14%	
deformačnej				
citlivosti 🏾 k0, u				
[1/°C]				
Teplotný súčiniteľ	1.8	1.8	13.8	
elektrického odporu				
α R0, υ [μm/m/°C]				
Súčiniteľ teplotnej	≈ 0	≈ 0	7÷22	
rozťažnosti				
materiálu				
tenzometra $\alpha$ s				
[µm/m/°C]				
Výrobca	Kyowa Tokyo	Kyowa Tokyo	Kyowa Tokyo	
Max. relatívne	±3000	±3000	$\pm 2000$	
predĺženie & [µm/m]				
Dĺžka aktívnej	2	5	2	
mriežky [mm]				
	tepelná kompenzácia	tepelná kompenzácia		
Poznámka	pre namáhaný	pre namáhaný		
	materiál -	materiál -		
	hliník(23µm/m/°C)	hliník(23µm/m/°C)		

Tab. 1 Prehľad vlastností nalepených tenzometrov

Tab.	2.	Vlastnosti	kanálov a	iednotlivých	snímačov v	mostíku
I uo.	<i>-</i> .	v rastriosti	nunuio , u	Jeanouryjen	Similar of t	mostina

		Vlastnosti každého tenzometra zapojeného v mostíku					
Kanál	Počet aktívnych tenzometrov v mostíku	Materiál	Odpor [Ω] (ε = 0)	Tvar	Výstupný rozsah meracieho kanála [mA]	Teplotná kompenz.	Iné
A	4	kov(Ni+Cu)	349	pozdĺžny	4÷20	ano - <b>zapojením</b>	
В	2	kov(Ni+Cu)	349	pozdĺžny	4÷12	ano- <b>zapojením</b>	
C	1	kov(Ni+Cu)	349	pozdĺžny	4÷8	nie	
D	1	kov(Ni+Cu)	120	združený- kolmý	4÷8	Ano – konštrukc iou, pozri [SaP]	s teplotnou kompenz., tzv. samokomp enzujúci tenzometer, materiál nosníka - hliník
Е	1	polovodič(Si)	111	pozdĺžny	4÷20	nie	

## Porovnanie vlastností jednotlivých kanálov:

*Citlivosť mostíka (kanála)* je daná počtom tenzometrov v mostíku (pri konštantnom zosilnení všetkých prevodníkov). Porovnať sa dajú výstupy z kanálov s rovnakými typmi tenzometrov, t.j. výstupné signály z kanálov A, B a C. (A – plný mostík, B – polomostík, C – štvrťmostík).

*Teplotná závislosť* je daná zapojením tenzometrov v mostíku. Teplotná kompenzácia sa zabezpečuje diferenciálnym zapojením rovnakých typov tenzometrov (*príklad v bode 2.*). V daných zapojeniach sa dajú porovnať kanály:

- **A, B a C** (rôzny počet rovnakých tenzometrov v mostíku)
- **C a D** (rovnaký počet deformovaných tenzometrov, bez a s teplotnou kompenzáciou)

Teplotná závislosť kovových tenzometrov nie je až taká veľká ako u polovodičového tenzometra, preto výstupný signál mostíka C by sa mal meniť pri pôsobení teplotných zmien iba o stotiny miliampéru a výstup mostíkov A a B by mal byť konštantný (diferenciálne zapojenie), tj. málo závislý od zmien teploty okolia.

#### Miestne a diaľkové ovládanie meracieho pracoviska

*Tenzometrické meracie pracovisko možno riadiť z tzv. lokálneho pracoviska*, ktoré je zložené z mikropočítačovej riadiacej jednotky (MRJ) a miestneho PC. Jednotka MRJ je schopná činnosti aj bez miestneho PC, tj. pracuje autonómne. Cez internetovú sieť možno ovládať proces merania aj zo vzdialeného pracoviska s vhodným PC.

Komunikácia medzi kompaktnou stanicou pracoviska (MRJ) a lokálnou stanicou (miestne PC) prebieha v dvoch redundantných kanáloch a to buď pomocou rozhrania USB alebo prostredníctvom siete ETHERNET. V súčasnom zapojení sa využíva prvá možnosť.

*MRJ* rieši niekoľko riadiacich a komunikačných úloh, čiže vykonáva sekvenciu merania, riadi motor ktorý pohybuje nosníkom, kontroluje pracovné obmedzenia na pracovisku, riadi teplotu nosníka, zbiera údaje z procesu merania, komunikuje s používateľom cez klávesnicu a displej a poskytuje svoje služby nadradenej jednotke – miestnemu PC.

*Miestne PC* – spracováva namerané údaje do skúšobného protokolu podľa normy STN EN 60 770 a vytvára internetovú stanicu na strane laboratória.

*Vzdialené pracovisko (PC)* umožní používateľovi pracovať na tenzometrickom pracovisku prostredníctvom vzdialeného prístupu cez internet. Takéto meranie na "diaľku" je výhodné hlavne v tom, že ušetrí veľa času študentovi dištančného štúdia, a tiež napr. jeho cestovné náklady. Nevýhodou by mohlo byť, že používateľ nemá "fyzický" kontakt s pracoviskom.



Obr. 5 Bloková schéma meracieho tenzometrického pracoviska riadeného cez internet.

#### <u>Bod 4</u>

Dôrazné upozornenie – nezasahovať do priestoru nalepených tenzometrov a elektroniky! Realizovať len meranie č.1, meranie č.2 a 3. bude len ukážka.

#### 1. Meranie s použitím lokálnej jednotky MRJ

- 1. Zapnúť napájací zdroj (skrinka z PC) pracoviska.
- 2. Použitím tlačítok na klávesnici lokálneho pracoviska (MRJ) sa oboznámiť s menu.
- 3. Inicializovať meranie výberom položky *Vykonaj init* z menu a následným potvrdením tlačidlom *OK*.
- 4. Nastaviť referenčnú (východziu) polohu výberom položky *Nulova poloha* a potvrdiť tlačidlom *OK*. Nosník prejde automaticky do polohy v ktorej je zdvih nulový, teda nieje namáhaný a od nej začne meranie krokovaním.
- Nastaviť teplotu tlačidlami ◄►, pri ktorej bude prebiehať meranie. Vybrať z rozsahu <15°C, 25°C>. Prvé meranie realizovať pri teplote laboratória., druhé pri teplote o 15 °C vyššej.
- 6. Uskutočniť meranie zdvihu nosníka podľa normy STN EN 770 v rozsahu 0 až 1mm s krokom 0,1mm v troch cykloch.

Z *menu* vybrať položku *Auto meranie* a potvrdiť. Každým stlačením tlačidla *OK* sa posunie meranie o jeden krok. Takto sa vykoná 10 meraní nahor a 10 meraní nadol v 3 cykloch. Zaznamenať hodnoty z kanálov (A,B,C,D). Po ukončení merania nastaviť zdvih do referenčnej - nulovej polohy a vypnúť zdroj.

- 7. Meranie vyhodnotiť podľa normy STN EN 770 statické vlastnosti, tj. tabuľka chýb, grafické znázornenie ich priebehu, číselné určenie chyby merania, chyby nelinearity, hysterézy a opakovateľnosti.
- **8.** Vykonať písomnú diskusiu na základe analýzy podľa druhu tenzometrov, ich zapojení (napr. porovnať A-B, B-C, A-C, C-D) a pôsobenia poruchovej veličiny (teplota okolia).



Obr.6 Základné údaje na displeji lokálneho pracoviska.

## 2. Meranie s použitím PC

- 1. Zapnúť napájací zdroj (skrinka z PC) pracoviska. Pripojiť pracovisko pomocou USB kábla k počítaču, resp. použitím ETHERNET-u do lokálnej siete.
- 2. Spustiť program "TMP" nachádzajúci sa na pracovnej ploche.
- Oboznámiť sa s prostredím, nastaviť pripojenie USB alebo ETHERNET. Pri USB pripojení vybrať tlačidlo *Connect* v poli *USB Connection*, v následujúcom okne vybrať port COM 5 a potvrdiť. Ostatné nie je nutné meniť. Pri pripojení cez počítačovú sieť vybrať tlačidlo *Connect* v poli *Net Connection*, adresu a port nemeniť.
- 4. Pre automatické meranie zvoliť tlačidlo *Remote*.
- 5. Inicializovať meranie výberom tlačidla *Initialisation*.
- 6. Nastaviť východziu polohu tlačidlom Find zero.
- 7. Nastaviť teplotu, pri ktorej bude prebiehať meranie. Vybrať z rozsahu <15°C, 25°C>
- 8. Tlačidlom *START* spustiť meranie. Meranie prebehne automaticky v troch cykloch a po ukončení výberom tlačidla *Table* namerané hodnoty, grafy a vyhodnotené parametre podľa normy STN EN 770.
- 9. Zastaviť komunikáciu pracoviska s počítačom tlačidlom *Disconnect*, vypnúť napájací zdroj.

## 3. Meranie prostredníctvom INTERNET-u

- 1. Zapnúť napájací zdroj (skrinka z PC) pracoviska. Pripojiť pracovisko použitím ETHERNET-u do lokálnej siete s INTERNET-om.
- 2. V internetovom prehliadači zobraziť stránku projektu a zaregistrovať sa. Adresa stránky projektu je: *timb.yweb.sk*.
- 3. Zvoliť tlačidlo *Projekt* a potvrdiť prevzatie JAVA Apletu. Následne sa zobrazí pracovná plocha a tlačidlom *Pripoj* sa pripojíme na pracovisko.
- 4. Oboznámiť sa s prostredím.
- 5. Inicializovať meranie výberom tlačidla Init.
- 6. Nastaviť východziu polohu tlačidlom VP.
- 7. Nastaviť teplotu, pri ktorej bude prebiehať meranie. Vybrať z rozsahu <15°C, 25°C>.
- 8. Zaškrtnutím poľa *Automaticky* zvoliť automatické riadenie.
- 9. Tlačidlom *Start* spustiť meranie. Meranie prebehne automaticky v troch cykloch a po ukončení tlačidlom *Norma* zobraziť namerané údaje, grafy a vyhodnotené parametre podľa normy STN EN 770.
- 10. Zastaviť komunikáciu pracoviska s počítačom tlačidlom *Odpoj*, vypnúť napájací zdroj.