

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



PRŮMYSLOVÉ ŘÍDICÍ SYSTÉMY

prof. Dr. Ing. Petr Novák

Ostrava 2013

© prof. Dr. Ing. Petr Novák

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3032-2



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	ČÍSLICOVÁ MĚŘENÍ ANALOGOVÝCH VELIČIN II.....	3
1.1	Úvod.....	4
1.2	METALICKÉ ODPOROVÉ TENZOMETRY.....	4
1.3	Wheatstonův most.....	6
1.3.1	Možná zapojení měřicích odporů v můstku.....	7
1.3.2	Čtvrtmost	7
1.3.3	Půl most.....	9
1.3.4	Plný most.....	10
1.4	Cvičení.....	11
2	LITERATURA.....	14



1 ČÍSLICOVÁ MĚŘENÍ ANALOGOVÝCH VELIČIN II



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Wheatstonův můstek

Tenzometrická měření – stručný základ

Technické prostředky pro můstková měření



MOTIVACE:

Cílem této přednášky je seznámit posluchače s měřením odporu odporových senzorů pomocí Wheatstonova mostu. Jedná se o metodu široce používanou.

Budete umět:

- porozumět principu Wheatstonova můstku,
- aplikovat Wheatstonův můstek na tenzometrická měření,
- navrhnout technické prostředky pro měření na Wheatstonově můstku.

Rovněž si doplníte odbornou terminologii z této oblasti.



1.1 ÚVOD

Poměrně rozsáhlou a často používanou metodou měření elektrických změn – např. odporu jsou můstková zapojení. Základním obvodem v této kategorii je tzv. Wheatstonův most, respektive můstek. Jeho zapojení vynalezl roku 1833 britský vědec a matematik Samuel Hunter Christie (1784-1865), ale zdokonalil jej a popularizoval až roku 1843 britský fyzik a vynálezce Sir Charles Wheatstone (1802–1875).

Můstky¹ se používají k přesnému měření elektrických veličin - kapacity, odporu nebo indukčnosti. V souvislosti s jeho napájením také hovoříme o stejnosměrném, respektive střídavém můstku. Měření můstkovými metodami se zakládá na porušení rovnováhy mezi větvemi můstku.

Je proto důležité umět se v této problematice orientovat a měření takovýchto veličin dokázat technicky zajistit. V následujícím textu bude popsáno zapojení Wheatstonova můstku, které bude prakticky použito při tenzometrickém měření.



Audio 1.1 Úvod



1.2 METALICKÉ ODPOROVÉ TENZOMETRY

Princip metalických odporových tenzometrů je založen na změně délky metalického snímače, která způsobí změnu jeho elektrického odporu R podle vztahu

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \text{RR. 1}$$

Kde

ρ - specifický odpor ,

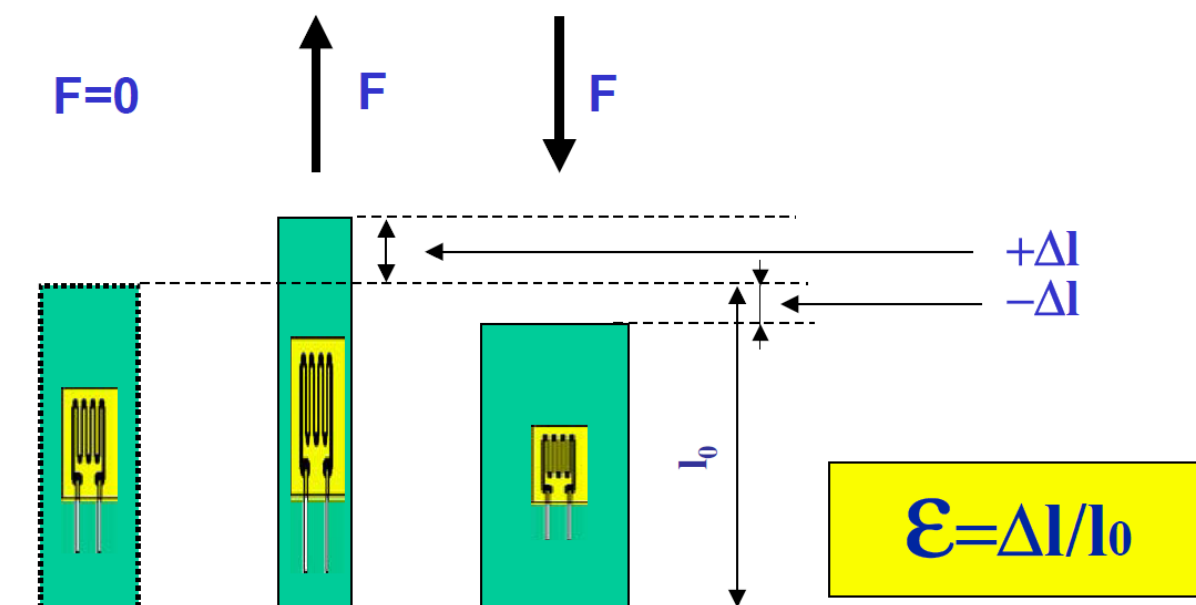
l - délka a

S - příčný průřez odporového drátku (pásku)

Vlivem zatížení materiálu (na kterém je nainstalován náš tenzometr/tenzometry – viz zelený nosník na obrázku) se tento deformuje. Deformace se projevují i na povrchu materiálu. Tato změna se přenáší na tenzometr, který takto mění svůj odpor, jež je lineárně úměrný prodloužení na povrchu materiálu.

¹ Krom zde uvedeného Wheatstonova mostu existuje celá řada dalších specializovaných „můstků“ – např. Thomsonův, Sautyho, Scheringův, Fosterův, Careyho, Wienův, Campbellův, Maxwellův a další. Pro měření odporu se však používá mimo Wheatstonůva, ještě Thomsonův můstek – zejména při potřebě vícevodičového zapojení měřeného odporu rezistoru.





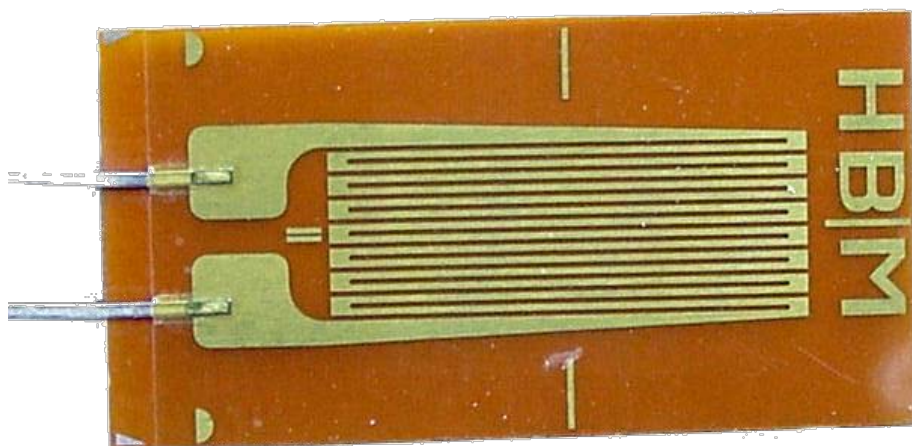
Obr. 1 K principu funkce tenzometru

Změnu odporu dR a závislost této změny na podélném poměrném prodloužení ϵ snímače lze vyjádřit podle vztahu:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon$$

R. 2

Výraz k se označuje jako deformační součinitel, též k -faktor.

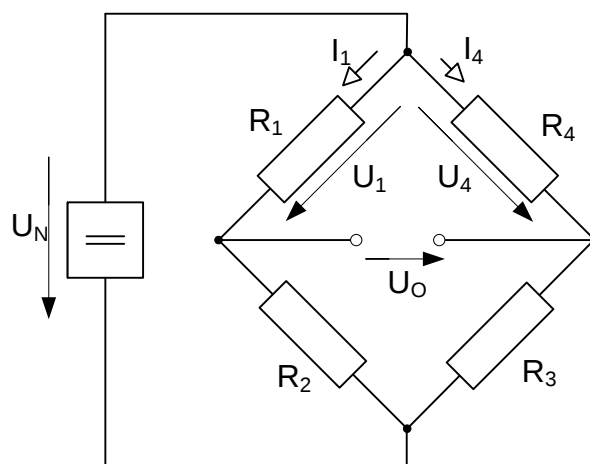


Obr. 2 Foliový tenzometr

Velikost k -faktoru (který spolu s ohmickým odporem snímače je základním technickým parametrem každého tenzometru) závisí zejména na typu snímače, materiálu vodiče (podrobněji např. v [31]) a geometrii vinutí snímače. Velikost k -faktoru se určuje experimentálně cejchováním (podrobně v [32]) náhodně vybraných hotových snímačů z určité výrobní série a udává ho výrobce u každého kusu s patřičnou zaručovanou tolerancí. U vodičových tenzometrů se hodnota k -faktoru pohybuje kolem dvou.

1.3 WHEATSTONŮV MOST

Nejběžnějším způsobem pro měření malých odporových změn je zapojení Wheatstonova můstku. Toto zapojení i při relativně malých změnách odporu dává dostatečně velký proudový nebo napěťový signál. V praxi se dnes používají stejnosměrné můstky (pro měření změny odporu). Dříve se používalo často můstků napájených střídavým napětím. Důvodem bylo zejména snadnější realizace (v té době) kvalitního střídavého zesilovače s velkým zesílením.



Obr. 3 Wheatstonův můstek

Odvození výstupního napětí U_O :

Napětí U_1 na odporu R_1 : (nápořád - stejný proud I_1 protéká odpory R_1 a R_2)

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 = R_1 \frac{U_N}{R_1 + R_2}, \quad \text{RR. 3}$$

$$\text{kde } I_1 = \frac{U_N}{R_1 + R_2}.$$

Podobně pro druhou větev mostu tvořenou odpory R_3 a R_4 :

$$U_4 = R_4 \cdot I_4 = R_4 \frac{U_N}{R_3 + R_4}, \quad \text{RR. 4}$$

$$\text{kde } I_4 = \frac{U_N}{R_3 + R_4}.$$

Napětí v diagonále mostu U_O , které nás zajímá:

$$U_O = U_1 - U_4 = U_N \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad \text{RR. 5}$$

Nevyváženost můstku je možné definovat jako relativní poměr mezi diagonálními napětími U_O a U_N .

$$\frac{U_O}{U_N} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{R. 6}$$



nebo po úpravě:

$$\frac{U_O}{U_N} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad \text{R. 7}$$

Vyvážeností (napájeného) mostu (nebo také „rovnováha“, „vzkompenzování“) nazýváme takový stav, kdy je napětí U_O nulové ($U_O = 0$).

To nastane, je-li čítec posledního vztahu nulový:

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0$$

$$R_1 R_3 = R_2 R_4, \text{ nebo také } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}. \quad \text{R. 8}$$

To znamená, že pro rovnováhu mostu postačí, aby poměry odporů v jednotlivých větvích byly stejné. Další podmínkou rovnováhy (jedná se ale stále o posledně uvedený vztah) je, že všechny odpory musí být stejné.

Shrneme-li tyto podmínky, můžeme napsat:

Most je v rovnováze ($U_O = 0$):

jsou-li velikosti všech odporů stejné

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad \text{R. 9}$$

nebo když poměr odporů ve větvích je stejný

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad \text{R. 10}$$

Podmínka b) přináší praktickou výhodu v tom, že odpory můstku nemusí být stejné, což se využívá v měřicích aparaturách pro měření čtvrt a půl mostu – viz dále v textu.

1.3.1 Možná zapojení měřicích odporů v můstku

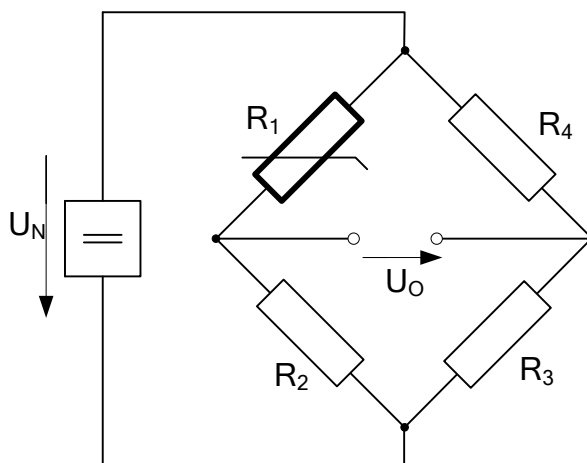
Do obvodu Wheatstonova můstku se při tenzometrickém měření v praxi zapojují jeden, dva nebo až čtyři měřicí (aktivní) odpory - tenzometry, u kterých dochází ke změně odporu o $\pm \Delta R$ v závislosti na změně poměrného prodloužení ε . V následujícím textu budou odvozeny potřebné vztahy pro jednotlivé případy zapojení můstku a také bude upozorněno na odlišnosti mezi jednotlivými zapojení, které jsou z pohledu citlivosti a odolnosti vůči některým nepříznivým vlivům (např. teplota).

Poznamenejme zde, že tento můstek se nepoužívá pouze v zapojení s tenzometry – jak je zde popisováno, ale obecně s jakýmkoli senzorem (el. prvkem), u kterého je měřená veličina (označme ji např. g) ovlivňuje jeho odpor. Tedy $R=f(g)$, v našem případě $R=f(\varepsilon)$.

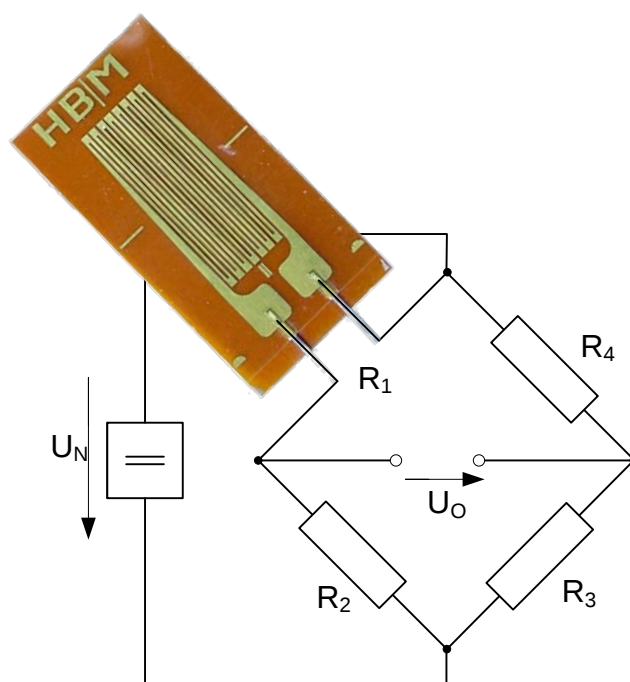
1.3.2 Čtvrtmost

V tomto mostě je zapojen pouze jeden měřicí odpor (tenzometr), jehož odpor se vlivem zatížení mění o ΔR (s oběma znaménky) - Obr. 2.





Obr. 4 Zapojení čtvrt mostu



Obr. 5 Zapojení čtvrt mostu s osazeným tenzometrem.

Na místě zbývajících tří odporů je vhodné z důvodů teplotní kompenzace také použít tenzometrů (ne však měřicích). Tento typ mostu s jedním měřicím tenzometrem se používá např. při měření rovinné napjatosti (tenzometrický kříž, nebo růžice). Předpokládejme, že platí (R. 30),

ΔR - změna odporu tenzometru R_1 ,

ΔR_t - nežádoucí teplotní změna odporů R_1 až R_4 .

Takže můžeme psát:

$$R_1 = R + \Delta R_t + \Delta R = R' + \Delta R, \quad \text{R. 11}$$

$$R_{2,3,4} = R + \Delta R = R' \quad \text{R. 12}$$

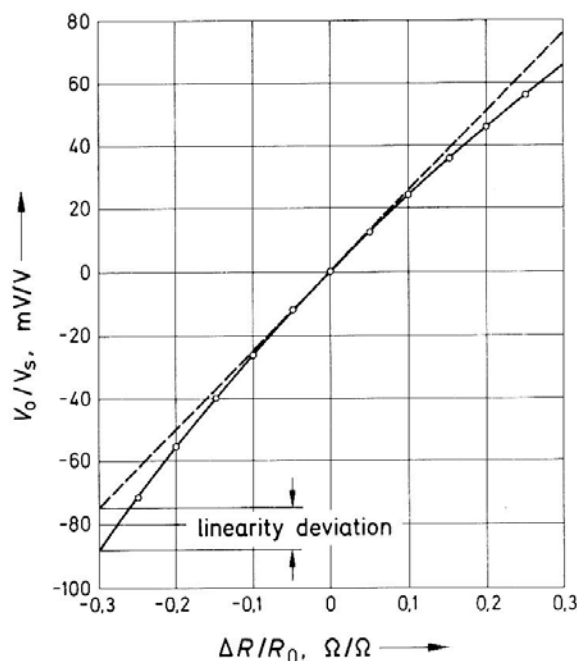
kde $R' = R + \Delta R_t$

Dosazením do rovnice mostu:



$$\frac{U_O}{U_N} = \frac{(R' + \Delta R)R' - R'^2}{2(R' + \Delta R) \cdot 2R'} = \frac{\Delta R}{4R' + 2\Delta R} = \frac{\Delta R}{4R + 4\Delta R_t + 2\Delta R} \quad \text{R. 13}$$

Ve jmenovateli posledního vztahu je součet tří hodnot. Jedná se jednu „velkou“ – odpor tenzometru R (bývá nejčastěji $120 \, \Omega$) a dvou „malých“ (s porovnáním s předchozí) – přírůstky odporových změn ΔR a ΔR_t odporů (tenzometrů) $R \gg \Delta R$, $R \gg \Delta R_t$.



Obr. 6 Čárkovaná čára – rovnice mostu se zanedbáním části výrazu ve jmenovateli - R. 35, plná čára – rovnice mostu bez zanedbání části výrazů ve jmenovateli - R. 34

Ty se v praxi zanedbávají a uvádí se tento vztah:

$$\frac{U_O}{U_N} \cong \frac{\Delta R}{4R} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \quad \text{R. 14}$$

Jak je vidět z předchozího vztahu, nedochází zde ke kompenzaci teplotního vlivu ΔR_t , jak je v některých pramenech – mylně – uváděno.

Vztahy pro poměnou deformaci, normální sílu a měrnou sílu jsou uvedeny v Experimentální metody v mechatronice, na str. 36 a 37:

1.3.3 Půl most

U tohoto typu mostu jsou zapojeny dva měřicí tenzometry. Oproti čtvrt mostu, kde je jedno, na které pozici mostu bude měřicí tenzometr, je zde potřeba se zamyslet nad jednou věcí. **Aby totiž mohl most měřit, musíme být schopni změnou odporu ΔR porušit podmínku rovnováhy R. 31:**

$$\frac{R_1}{R_2} \neq \frac{R_4}{R_3} \quad \text{RR. 15}$$

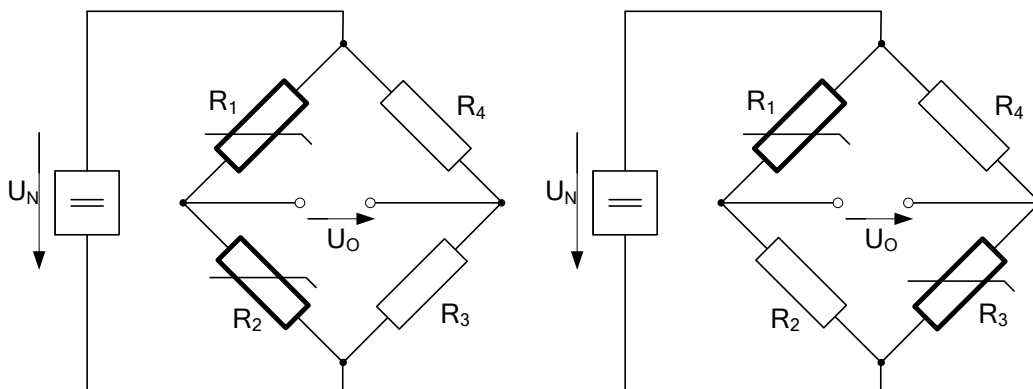
Máme zde v podstatě dva případy (předpokládáme, že první měřicí tenzometr je na pozici R_1):

1. znaménka obou změn odporu ΔR jsou opačná, potom jako druhý měřicí tenzometr volíme R_2 .

Tedy $R_1 = R \pm \Delta R$ a $R_2 = R \mp \Delta R$.



2. znaménka obou změn odporu ΔR jsou stejná, potom musíme jako druhý měřicí odpor (tenzometr) umístit na pozici R_3 .
Tedy $R_1 = R \pm \Delta R$ a $R_3 = R \pm \Delta R$.



Obr. 7 Zapojení půl mostu - znaménka změn odporu tenzometrů R_1 a R_2 - ΔR jsou opačná – vlevo, nebo stejná – na pravém obrázku.

Opět zde předpokládáme, že platí vztah R. 30.

Takže můžeme psát:

$$R_1 = R + \Delta R, \quad \text{RR. 16}$$

$$R_2 = R - \Delta R$$

$$R_{3,4} = R \quad \text{RR. 17}$$

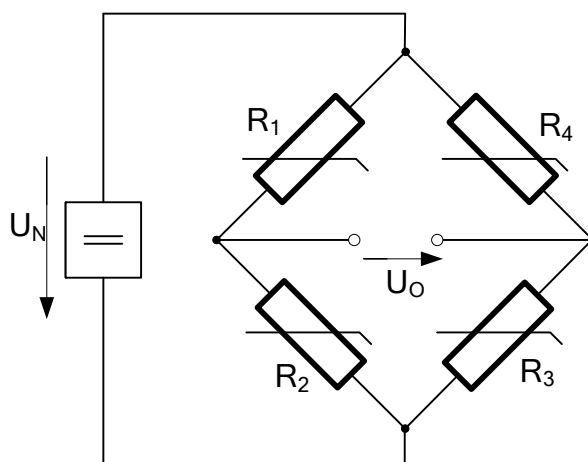
Dosazením do rovnice mostu obdržíme pro oba dva zmiňované případy stejný vztah:

$$\frac{U_O}{U_N} = \frac{\Delta R}{2R} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} \quad \text{R. 18}$$

Vidíme zde, že pravá strana výrazu je oproti čtvrt mostu dvojnásobná, tedy i napětí U_O bude při stejném zatížení dvojnásobné. Půl můstkové zapojení je oproti čtvrt můstkovému dvakrát citlivější.

1.3.4 Plný most

Obvod tohoto mostu je tvořen čtyřmi měřicími odpory (tenzometry) a nejčastěji se používá při měření ohybu a krutu. Toto zapojení není možné použít pro měření tahu/tlaku, protože by nedošlo k porušení rovnováhy mostu – změny odporů by zde měly stejné znaménko.



Obr. 8 Zapojení plného mostu – znaménka změn odporu tenzometrů R_1 a R_3 - ΔR jsou opačná než u R_2 a R_4 .



$$R_1 = R_3 = R + \Delta R,$$

R. 19

$$R_2 = R_4 = R - \Delta R$$

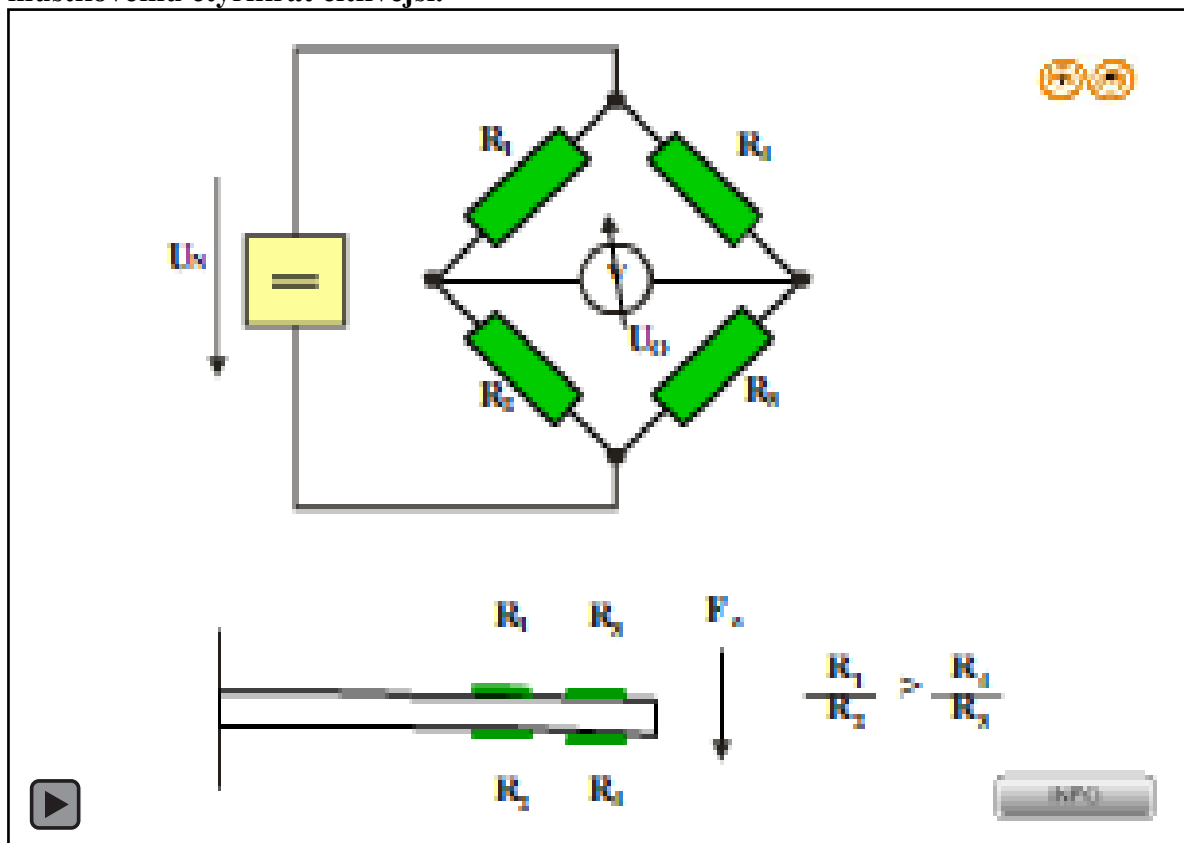
Dosazením do rovnice mostu obdržíme pro oba dva zmiňované případy stejný vztah²:

$$\frac{U_O}{U_N} = \frac{\Delta R}{2R} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

RR.

20

Vidíme zde, že pravá strana výrazu je oproti čtvrt mostu čtyřnásobná, tedy i napětí U_O bude při stejném zatížení čtyřnásobné. Celo můstkové zapojení je oproti čtvrt můstkovému čtyřikrát citlivější.



Animace 1.1 Měření ohybu čtyřmi tenzometry (nahore a dole), animovat změnu odporu v zapojení můstku včetně velikosti (i polarity) napětí U_o .

1.4 CVIČENÍ

Kontrolní otázky:

1. K čemu je určen Wheatstonův most? Pro jaká měření?
2. Jaká je podmínka rovnováhy můstku? Je jich více?
3. Wheatstonův můstek se musí, nebo nemusí napájet?
4. Kolik vodičů (minimálně) je k tomuto můstku přivedeno a jaký mají význam?

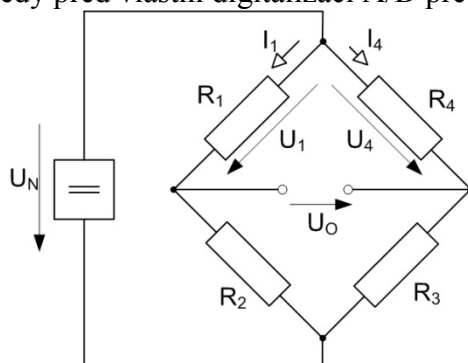
Řešený příklad

Zadání: Připojte tenzometrický můstek a měřte jeho výstupní signál.

² Na rozdíl od čtvrt mostu se jedná o přesný vztah – v čitateli se ΔR nevyskytuje a tak jej nemusíme zanedbávat.



Pro realizaci měření je mimo vlastní most zajistit: **napájení mostu**, na obrázku se jedná o napětí U_N . To bývá do cca 10V (při velikosti odporu tenzometrů 120Ω) a je potřeba stanovení jeho velikosti rozumět a věnovat pozornost s ohledem na sekundární ohřev tenzometrů. Dále je potřeba **změřit výstupní napětí mostu** U_O , které však bývá v jednotkách milivolt (případně nižší) a vyžaduje tedy před vlastní digitalizací A/D převodníkem značné zesílení.

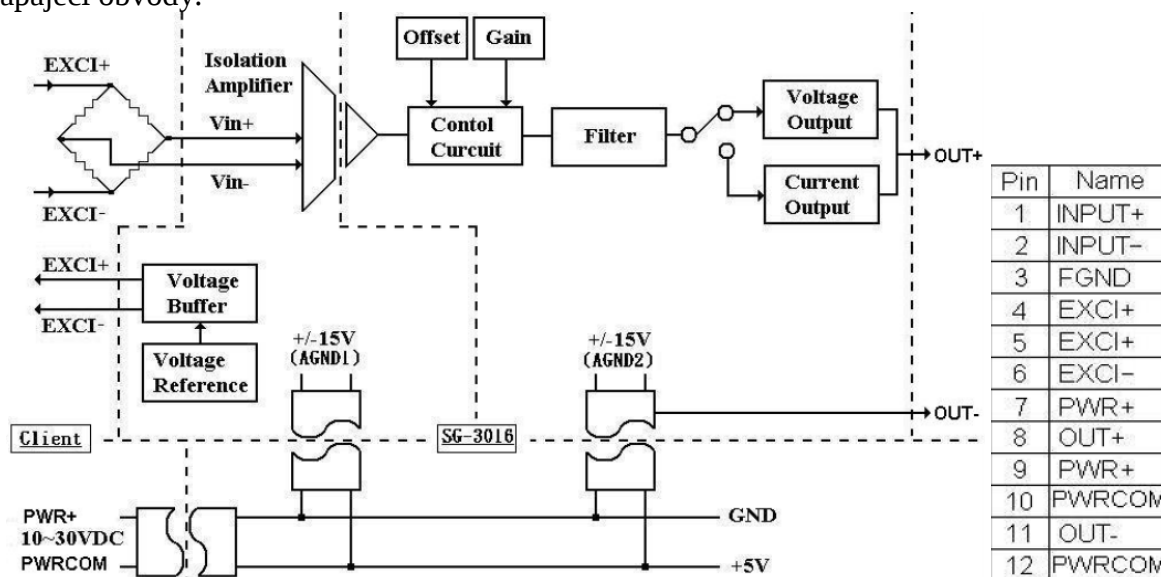


Obr. 4.9 Zapojení Wheatstonova mostu.

Návrh zapojení:

V **první variantě** pro měření pomocí senzoru s tenzometrickým mostem (obecně ale s jakýmkoli odporovým mostem) použijeme modulu k tomu účelu vyráběnému. Jeho úkolem tedy musí být: zajistit napájení můstku a zesílení výstupního napětí můstku plus jeho případná digitalizace. Zde použijeme řešení využívající modulu úpravy signálu SG-3016 – určeného pro můstková měření. Tento modul zajistí napájení mostu a zesílení jeho výstupního napětí.

SG-3016 je modul pro připojení tenzometrického mostu zajišťující napájení mostu v rozsahu 1-10V do proudu 20mA. Výstupní diagonální napětí mostu je zesíleno zesilovačem s nastavitelným zesílením až 1000 (pomocí DIP přepínačů). Výstupní signál je možno volit napěťový bipolární nebo unipolární, případně proudový (0-20mA). Horní širka pásma je cca 600Hz. Modul se upevňuje na standardní DIN lištu. Zesílený výstupní signál je možné dále digitalizovat A/D kartou. Jednotka se napájí nestabilizovaným stejnosměrným napětím v rozsahu 10 – 30 V. Poznamenejme ještě, že modul má optoizolované vstupní, výstupní a napájecí obvody.



Obr. 4.10 Blokové schéma modulu SG-3016, včetně popisu svorkovnice.

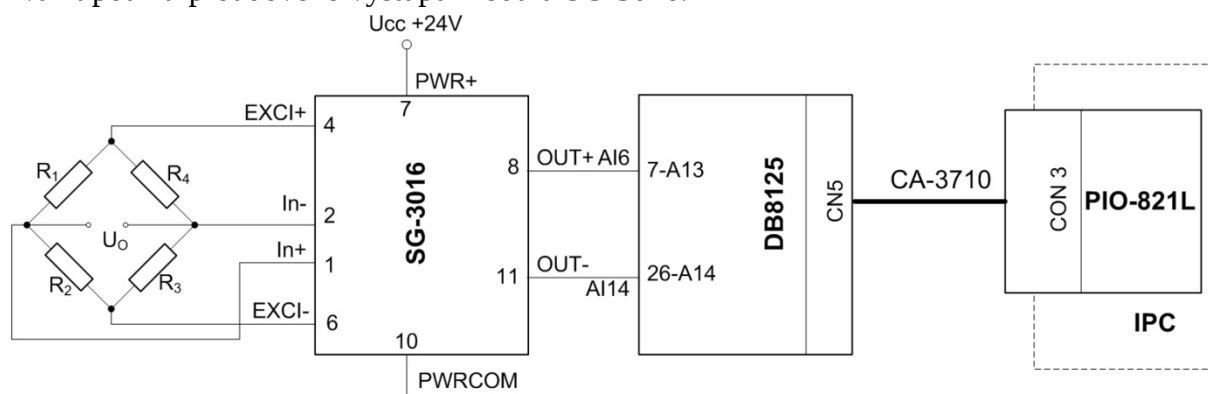
Výstupní signál z modulu: OUT+ a OUT- připojíme na vstup A/D karty (respektive prostřednictvím dceřiné desky). Jako měřicí kartu zvolíme PIO-812 (foto a popis svorkovnice viz Obr. 4.19) a dceřinou desku – svorkovnici – DB8125 (popis viz Obr. 4.20).

Popis zapojení:



Vlastní měřicí most je připojen k modulu SG-3016, kterým je napájen – EXCI+ a EXCI-. Výstupní napětí mostu je připojeno na vstupy In+ a In-, dále zesíleno a vyvedeno na výstup OUT+ a OUT-. Poznamenejme, že výstup je možno pomocí vnitřních DIP spínačů nastavit jako napětový bipolární nebo unipolární, nebo proudový. Rovněž velikost zesílení a napájecího napětí se nastavuje příslušnými DIP spínači.

Napětový výstup je dále veden – prostřednictvím svorkovnice DB8125 – na diferenciální vstup A/D převodníku AI6-AI14, karty PIO-821L. Na svorkovnici se jedná o svorky A13 a A14. V případě větší vzdálenosti mezi modulem SG-3016 a svorkovnicí by bylo vhodné zvážit použití proudového výstupu modulu SG-3016.



Obr. 4.11 Schéma zapojení tenzometrického měření pomocí modulu SG-3016, dceřiné desky (svorkovnice) a měřicí karty PIO-821L.

Zadání:

Pro výše uvedený příklad navrhnete zapojení založené na použití modulu ADAM4016 – výrobce Advantech (nebo i7016 výrobce icpDAS, nebo NuDAM 6016 výrobce ADLINK). Zároveň v zapojení využijte binární výstupy pro vizuální informaci (spínání LED diod) informující o překročení nastavených prahových hodnot měřeného signálu.

Přednáškový text se vztahuje k těmto otázkám.

Vazba řídicího systému s analogovým okolím prostřednictvím průmyslových karet a modulů. Měření analogových veličin – změna odporu.

2 LITERATURA

- [1] Advantech *ADAM 4000 Series User's Manual*. (Uživatelský manuál Advantech), Taiwan: Advantech, 1997.
- [2] PC/104 consortium - <http://www.pc104.org>
- [3] <http://www.pc104.com>
- [4] <http://www.rtd.com>
- [5] VOJÁČEK, A.: Základní typy jednodeskových počítačů - Embedded SBC (<http://automatizace.hw.cz/plc-automaty/ART305-zakladni-typy-jednodeskovych-pocitacu--embedded-sbc.html>)
- [6] <http://www.acrosser.com>
- [7] <http://www.icpamerica.com>
- [8] <http://www.ieiworld.com/>
- [9] <http://www.adlinktech.com/>
- [10] <http://www.icpdas.com>
- [11] <http://www.kotlin.cz/>
- [12] <http://www.opto22.com>
- [13] http://www.uzimex.cz/soubory/20090529_ads50-10_cz.pdf
- [14] Screw Terminal Boards for PC based I/O Boards (Daughter Boards) (http://www.icpdas.com/products/DAQ/pc_based/pc_based_io.htm#4)
- [15] Pololu1186: (<http://www.pololu.com/catalog/product/1186%20target=>)
- [16] SG-3011: (<http://www.icpdas.com/products/DAQ/signal/sg-3011.htm>)
- [17] National Instruments: *Measuring Strain with Strain Gages – tutorial*. (<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3642>)
- [18] Advantech *PCL-812PG, Enhanced Multi-Lab Card*. (manuál k multifunkční kartě PCL-812-PG), Taiwan: Advantech, 1994, 173 p.
- [19] Sigma-delta converters: (<http://www.numerix-dsp.com/appsnotes/APR8-sigma-delta.pdf>)
- [20] katalog Sick/Stegmann – irc senzor DKS40 (<http://www.compel.ru/pdf/SICK/DKS40.pdf>)
- [21] VRBA, K. a kol.: *Teorie vzájemného převodu analogového a číslicového signálu*. Skriptum VUT Brno, 131 s., 2006
- [22] Advantech *PCL-818L User's Manual*. (Uživatelský manuál), Taiwan: Advantech, 1995.
- [23] <http://www.omegaoptics.com/Technology%20-%20Backplane.asp>
- [24] ICP *Icp – Design & Manufacture* (katalog). Taiwan: ICP, 2010.
- [25] NOVÁK, P. a NOSKIEVIČ, P. a KLEN, P. Řídicí systém pódiových stolů ve Smetanově síni v Obecním domě v Praze. In *XX.Seminář ASŘ 97- Počítače v měření, diagnostice a řízení, mechatronika*“ (sborník). Ostrava: VŠB-TUO, 1997, s. 36/1-7, ISBN 80-02-01153-8.
- [26] NOVÁK, P. Řídicí systém automatického řízení pohybu navařovací hubice při renovaci exponovaných míst kolejnic navařováním. In *XX.Seminář ASŘ 97- Počítače v měření, diagnostice a řízení, mechatronika*“ (sborník). Ostrava: VŠB-TUO, 1997, s. 24/1-3, ISBN 80-02-01153-8.



- [27] ŽÁČEK, J. Elektromagnetická kompatibilita a projektování elektrotechnických systémů. In *Automatizace* (časopis), 1998, č. 1, s. 10-16.
- [28] Mite: (<http://www.mite.cz>)
- [29] FIREMNÍ ČLÁNEK. Měření teploty v silech. In *Automa* (časopis) 1999, č. 5-6, s.32.
- [30] wikipedia: http://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk
- [31] Vaughan, J.: *Application of B&K Equipment to Strain Measurements*. Bruel&Kjaer, Dánsko 1975
- [32] KLABOCH, L.: *Experimentální metody*. Skriptum fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT Praha, 1982.
- [33] HÁZE, J. a spol. *Teorie vzájemného převodu analogového a číslicového signálu*. (skriptum). FEKT VUT V Brně, 139 s., 2010.
- [34] ŠTEFAN, R. Měřicí karty – jak správně vybírat. Au *Automa* (časopis) 2004, č.7, s.32.
- [35] ICP DAS PCI-1202/1602/1800/1802 Hardware User's Manual, 101 s., 2007
- [36] Amit *Zásady používání RS485* www.amit.cz

Internet

<http://nudaq.com/>

<http://www.icpdas.com.tw/>

<http://www.advantech.com/>

<http://axiomtek.com/>

<http://czech.ni.com/>

<http://www.omega.com/>

<http://www.tedia.cz/>

