

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

STANOVENÍ TEORETICKÉ HODNOTY
NEJISTOTY MĚŘENÍ
PLNÉHO TENZOMETRICKÉHO
WHEATSTONEOVA MŮSTKU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Bc. Miroslav Vohlídal

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.

2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Miroslav VOHLÍDAL
Osobní číslo: D07842
Studijní program: N3708 Dopravní inženýrství a spoje
Studijní obor: Dopravní infrastruktura-Dopravní cesta
Název tématu: Stanovení teoretické hodnoty nejistoty měření
tenzometrického plného Wheastoneova můstku
Zadávací katedra: Katedra dopravního stavitelství

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte teoretický rozbor různého zapojení tenzometrů u tenzometrického měření ocelových konstrukcí, stanovte výhody a nevýhody různého způsobu zapojení.
2. Popište přepočty změny el. odporu můstku na deformaci v měřeném místě.
3. Proveďte teoretický výpočet pro modelový případ ocelové konstrukce.
4. Stanovte nejistotu měření pro daný modelový případ.
5. Výsledky ověřte experimentem.
6. Průběh měření doložte zpracovanými výsledky a fotodokumentací.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

TPM 0051-93 - Technický předpis metrologický

Karl Hoffmann: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsstreifen

Internet

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.

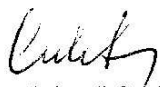
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce:

30. listopadu 2009

Termín odevzdání diplomové práce:

24. května 2010



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Vladimír Doležel

vedoucí katedry

dne

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 30.11.2010

Bc. Miroslav Vohlídal

ANOTACE, KLÍČOVÁ SLOVA

Tato diplomová práce je zaměřena na stanovení teoretické hodnoty nejistoty měření plného Wheatstoneova můstku při praktické aplikaci měření napětí ve stavební konstrukci pomocí tenzometrů. V obecné rovině se práce zabývá technickým měřením, podrobně je v práci rozvinuto měření pomocí tenzometrů, jeho předpoklady a podmínky. V samostatné kapitole je provedeno odvození teoretického vztahu pro stanovení hodnoty nejistoty měření plného Wheatstoneova můstku ve vztahu k praktické aplikaci problematiky. Praktická část práce představuje přípravu a měření vzorků a následné vyhodnocení měření. V poslední kapitole je provedeno srovnání teoretických předpokladů s konkrétními výsledky měření.

Klíčová slova:

měření, měřicí aparatura, tenzometr, plný tenzometrický Wheatstoneův můstek, nejistoty měření, standardní rozšířená nejistota měření

ANNOTATION, KEYWORDS

The thesis is focused on the determination of the theoretical value of the measurement uncertainty of the Wheatstone full bridge in the practical use of tension measurement with tensometers in the engineering construction. In general, the thesis is concerned with the technical measurement, measurement with tensometers, its assumptions and conditions are in detail developed. The deduction of the theoretical equation for the assignment of a theoretical value of measurement uncertainty of the full Wheatstone bridge in relation to the practical use of these matters is mentioned in the discrete chapter. The practical part of the thesis is concerned with the pretentious preparation and measurement of samples followed by the data evaluation. The last chapter is dedicated to the comparison of the theoretical presumptions with the measurement results.

Keywords:

measurement, measuring apparatus, tensometer, Wheatstone full bridge, measurement uncertainty, standard expanded uncertainty

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval doc. Ing. Bohumilu Culkovi, Ph.D., za vedení a podporu při tvorbě této diplomové práce.

OBSAH

<u>PROHLÁŠENÍ</u>	<u>2</u>
<u>ANOTACE, KLÍČOVÁ SLOVA</u>	<u>5</u>
<u>PODĚKOVÁNÍ</u>	<u>6</u>
<u>OBSAH</u>	<u>7</u>
<u>REJSTŘÍK VELIČIN.....</u>	<u>10</u>
<u>1. ÚVOD, OBECNÉ POZNATKY K PROBLEMATICE TECHNICKÉHO MĚŘENÍ</u>	<u>11</u>
1.1 Úvod	11
1.2 Technické měření	11
1.3 Měření a jednotky, soustava jednotek	12
1.3.1 Měření a jednotky.....	12
1.3.2 Soustava jednotek.....	12
1.4 Měřicí metody, citlivost, přesnost a správnost měření	12
1.4.1 Měřicí metody	12
1.4.2 Citlivost, přesnost a správnost měření.....	13
1.5 Měřicí přístroje	13
1.6 Snímače	13
1.7 Signál	14
1.7.1 Aktivní a pasivní ochrana signálu	15
1.7.2 Vzorkování	15
1.7.3 Filtr, popis systému filtru	15
1.8 Elektromagnetická kompatibilita.....	16
<u>2. MĚŘENÍ DEFORMACÍ POMOCÍ TENZOMETRŮ ZAPOJENÝCH DO WHEATSTONEOVA MŮSTKU</u>	<u>17</u>
2.1 Měřicí můstek	17
2.1.1 Funkce můstků	17
2.1.2 Napájení můstku.....	17
2.1.3 Typy můstků.....	17
2.2 Wheatstoneův můstek.....	18
2.2.1 Možnosti zapojení čidel (tenzometrů) do Wheatstoneova můstku.	19

2.2.2	Souhrn vlastností Wheatstoneova můstku.....	20
2.3	Měřicí řetězec	21
2.4	Komponenty měřicího řetězce.....	22
2.4.1	Odporové snímače, tenzometry	22
2.4.2	Dynamická měřicí ústředna.....	26
2.4.3	Kabely	27
2.4.4	Software pro měření a ukládání dat.....	27
3.	<u>TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ JAKO NÁSTROJ PŘI STANOVOVÁNÍ VLASTNOSTÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ, PŘÍPRAVA A REALIZACE MĚŘENÍ, ZPRACOVÁNÍ DAT.</u>	29
3.1	Zkoušky stavebních konstrukcí tenzometrickým měřením.....	29
3.2	Postup tenzometrického měření.....	29
3.2.1	Příprava měření	29
3.2.2	Realizace měření	33
3.2.3	Vyhodnocení naměřených dat a interpretace výsledků zkoušky.....	33
3.3	Podmínky měření.....	33
4.	<u>NEJISTOTY MĚŘENÍ TENZOMETRY ZAPOJENÝMI DO PLNÉHO WHEATSTONEOVA MŮSTKU ...</u>	35
4.1	Typy nejistot, základní poznatky.....	35
4.2	Nejistoty tenzometrických měření stavebních konstrukcí:.....	36
4.3	Stanovení standardní nejistoty typu A – u_A	36
4.3.1	Poměrná deformace ε	36
4.3.2	Mechanické napětí σ	37
4.4	Stanovení standardní nejistoty typu B	39
4.4.1	Nejistota geometrie tenzometru – u_{B1}	39
4.4.2	Nejistota geometrie kvality povrchu měřeného místa – u_{B2}	43
4.4.3	Nejistota lepidla – u_{B3}	43
4.4.4	Nejistota teplotní deformace snímače – u_{B4}	46
4.4.5	Nejistota příčné deformace tenzometru – u_{B5}	46
4.4.6	Nejistota kabelu propojujícího tenzometr s dynamickou měřicí ústřednu – u_{B6} 46	
4.4.7	Nejistota dynamické měřicí ústředny – u_{B7}	47
4.4.8	Nejistota kabelu propojujícího měřicí zesilovač s měřicím PC – u_{B8}	50
4.4.9	Nejistota hardwaru měřicího PC – u_{B9}	51
4.4.10	Nejistota softwaru měřicího PC – u_{B10}	51
4.4.11	Výsledné stanovení nejistoty typu B	51

5. TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍHO VZORKU.....	53
5.1 Příprava měření.....	53
5.2 Nastavení dynamické měřicí ústředny:.....	55
5.3 Statická zatěžovací zkouška	55
5.4 Dynamická zatěžovací zkouška.....	58
6. STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ Z HLEDISKA GEOMETRIE TENZOMETRU DANÉ NATOČENÍM O ÚHEL α.....	61
7. VYJÁDRĚNÍ HODNOTY NEJISTOTY MĚŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍ DYNAMICKÉ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍHO VZORKU	63
7.1 Vyčíslení jednotlivých odvozených nejistot měření.....	63
7.1.1 Nejistota geometrie tenzometru:	63
7.1.2 Nejistota geometrie kvality povrchu měřeného místa:.....	63
7.1.3 Nejistota lepidla:	63
7.1.4 Nejistota teplotní deformace snímače:	63
7.1.5 Nejistota příčné deformace tenzometru:.....	63
7.1.6 Nejistota kabelu propojujícího tenzometr s dynamickou měřicí ústřednou:.....	64
7.1.7 Nejistota dynamické měřicí ústředny:	64
7.1.8 Nejistota kabelu propojujícího měřicí zesilovač s měřicím PC:	65
7.1.9 Nejistota hardwaru měřicího PC:	65
7.1.10 Nejistota softwaru měřicího PC:	65
7.2 Výsledné stanovení nejistoty typu B:	65
8. ZÁVĚR.....	66
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	68
SEZNAM TABULEK	69
SEZNAM GRAFŮ	70

REJSTRÍK VELIČIN

σ	mechanické napětí [MPa]
ε	poměrná deformace [-]
E	Youngův modul pružnosti
U	elektrické napětí [V]
ρ	měrný odpor materiálu drátku tenzometru [Ω]
μ	Poissonova konstanta
K_d	k-faktor – deformační citlivost drátku tenzometru
α	úhel natočení tenzometru [$^\circ$]
y	vertikální posunutí tenzometru [mm]
x	horizontální posunutí tenzometru [mm]
R	odpor tenzometru [Ω]
ΔR	změna odporu aktivního tenzometru [Ω]
U_N	napájecí napětí [V]
U_M	měřené napětí [V]
k	koeficient rozšíření

1. ÚVOD, OBECNÉ POZNATKY K PROBLEMATICE TECHNICKÉHO MĚŘENÍ [2] [6] [8] [9]

1.1 Úvod

S rozvojem lidské společnosti, zvláště díky technickému pokroku, na sebe lidstvo klade velké nároky technického rozvoje a poznání. Stavebnictví se od primitivních způsobů výstavby, přes modelové ověřování konstrukcí a pokusy s výpočtovými modely dostalo s pomocí matematiky a fyziky do dnešní fáze, kdy teoretická základna i technická praxe dokáže navrhovat stavební konstrukce na základě prověřených matematických modelů. Nezanedbatelnou složkou návrhu jednotlivých prvků stavebních konstrukcí je ověření technických předpokladů praktickým měřením. Také technické měření, včetně vyhodnocování naměřených výsledků, prošlo velmi bouřlivým vývojem. V současné době, za využití výpočetní techniky, se stává měření stavebních konstrukcí, a tedy ověřování jejich vlastností, z hlediska proveditelnosti velmi snadným. Nesmí se však opomenout, že znalost základních poznatků mechaniky a jejich správná aplikace je pro dosažení přijatelných výsledků nezbytná. Není možné se spolehnout pouze na výstupy vycházející z moderních měřících komponentů, je třeba hlubokých teoretických znalostí, aby bylo možné naměřené hodnoty prověřit. Do popředí se dostávají otázky přesnosti měření a stanovování nejistot jednotlivých druhů měření. Cílem této diplomové práce je stanovení teoretické hodnoty nejistoty měření plného Wheatstoneova tenzometrického můstku a její ověření měřením zkušebního vzorku.

1.2 Technické měření

Technické měření je kvantitativní (číselné) zkoumání vlastností předmětů (jevů, procesů), obvykle porovnáváním s obecně přijatou jednotkou. Výsledkem měření je číslo, které vyjadřuje poměr zkoumané veličiny k jednotce.

Zjednodušeně lze měření charakterizovat jako zjišťování požadovaných hodnot a zcela obecně jako odstraňování nejistoty.

Význam měření spočívá hlavně v tom, že:

1. charakterizuje měřenou veličinu významně přesněji než kvalitativní údaje (např. dlouhý, vysoký, těžký),
2. dovoluje měření opakovat a porovnávat,
3. výsledek lze zpracovávat matematickými prostředky, zejména ve vědeckých aplikacích.

1.3 Měření a jednotky, soustava jednotek

1.3.1 Měření a jednotky

Nejjednodušší kvantitativní zkoumání je počítání kusů (angl. *counting*), které však obvykle nelze považovat za měření. Měření určité veličiny jakožto porovnávání vyžaduje jednotku této veličiny. Pro měření délek (délkových rozměrů) se jako jednotky nejprve užívaly rozměry lidského těla: palec, stopa, loket, sáh. Délku tak bylo možno vyjádřit počtem těchto jednotek, případně i jejich zlomky. Pro jiné fyzikální veličiny – například hmotnost, teplotu, elektrický odpor – však takové přirozeně dané jednotky neexistují a je třeba je vytvořit. Jednotky měření však mají tím větší význam, čím více jsou prakticky užívány, a vyžadují tedy nějakou dohodu.

Do vědeckého provozu se měření pomocí konvenčních jednotek dostalo teprve v novověku a první pokus o mezinárodní standardizaci jednotek udělala až Francouzská revoluce (mezinárodní metr). Tvůrci metru se však také ještě domnívali, že jednotka nemůže být pouze konvenční, a proto byla odvozena z rozměrů Země. Brzy se však ukázalo, že jednotka musí být stanovena daleko přesněji, takže i metr je fakticky jednotka konvenční.

1.3.2 Soustava jednotek.

S rozvojem a globalizací vědy, hospodářství i techniky stále roste význam mezinárodně stanovených a všude srovnatelných jednotek. Roku 1874 vznikla soustava CGS, roku 1875 v Paříži Mezinárodní úmluva o metru a roku 1889 soustava MKS, roku 1939 rozšířená na MKSA. Roku 1960 byla přijata **soustava SI**, která ovšem z praktických důvodů připouští i užívání dalších, vedlejších a odvozených jednotek.

1.4 Měřicí metody, citlivost, přesnost a správnost měření

1.4.1 Měřicí metody

Při technickém měření rozeznáváme různé měřicí metody, jedná se např. o metody přímé, nepřímé, porovnávací a můstkové.

U přímých měřících metod je daná veličina měřena přímo přístrojem sloužícím pro měření dané veličiny. V případě nepřímých měřících metod je měřená veličina převáděna na veličinu jinou a u porovnávacích měřících metod je prováděno porovnání neznámé veličiny s etalonem. Mezi můstkové měřicí metody patří např. měření pomocí plného Wheatstoneova tenzometrického můstku.

1.4.2 Citlivost, přesnost a správnost měření.

1. **Citlivost** měřicí metody a použitého přístroje, je nejmenší změna (odchylka) měřené veličiny, kterou měřicí metoda a přístroj dovolují rozlišit. Ta je dána jednak citlivostí metody samé, jednak konstrukcí měřicího přístroje.
2. **Přesnost** či spolehlivost měřicí metody a přístroje, je rozptyl naměřených hodnot při měření téže (neměnné, totožné) veličiny. Přesnost je obvykle dána konstrukcí a provedením měřicího přístroje, zejména omezením nahodilých vlivů jako tření, změn teploty, tlaku vzduchu a podobně. Tyto vlivy se dají obvykle výrazně omezit tím, že se měření opakuje a výsledky matematicky zpracují.
3. **Správnost** měření spočívá ve správném odečtu naměřených hodnot při nepřímých měřicích metodách. Správnosti měření se dosahuje kalibrováním či nařízením měřicího přístroje podle normálu měřené veličiny.

1.5 Měřicí přístroje

Měřit je možné prostým přikládáním jednotky (krokováním vzdálenosti, odměřováním jednotky objemu atd.), měření se však dá výrazně zdokonalit měřicími přístroji (délkové měřítko, kalibrovaná nádoba), případně jednoduchými přístroji.

Pro postupy nepřímých měření vznikly i další měřicí přístroje (teploměr, tlakoměr, **elektrické měřicí přístroje** atd.), které sice často „měří“ nějakou jinou, i když ovšem související veličinu (délku rtuťového sloupce, magnetický účinek proudu apod.), výsledek však ukazují na stupnici nebo přímo čísla na displeji. Na rozdíl od přímých měření se však takové měřicí přístroje musejí kalibrovat, tedy zajistit správný odečet měřené veličiny na stupnici.

1.6 Snímače

Snímač obecně znamená označení pro technické zařízení, které je určeno pro snímání a detekci různých fyzikálních veličin, vlastností látek a technických stavů. Snímač je zařízení převádějící neelektrickou veličinu na elektrický signál. Jedná se o snímače pasivní, aktivní a ostatní. **Pasivní** snímače potřebují ke své činnosti napájení (zdroj elektrické energie). Příkladem lze uvést snímače odporové, kapacitní, induktivní a transformátorové. V případě **aktivních** snímačů se jedná o snímače indukční a piezoelektrické a mezi **ostatní** snímače řadíme např. snímače fotoelektrické či optické.

Požadavky na snímače.

Požadavky na snímače jsou např. teplotní a časová stabilita – minimální vliv vnějších podmínek na charakteristiky (teplota, vlhkost, elektromagnetické pole...), odolnost proti poškození, robustnost, jednoduchost konstrukce, snadné zařazení snímače do měřícího obvodu.

Důležité vlastnosti snímačů

Citlivost snímače

Citlivost snímače je dána poměrem

$$\text{změny výstupu} / \text{změna vstupu}$$

výsledná hodnota se násobí 100 a citlivost snímače se udává v [%].

Linearita snímače

Důležitou vlastností snímače je jeho linearita, neboli rozsah měření, ve kterém naměřené hodnoty vykazují lineární závislost, linearitu snímače lze zjistit z jeho kalibrační křivky.

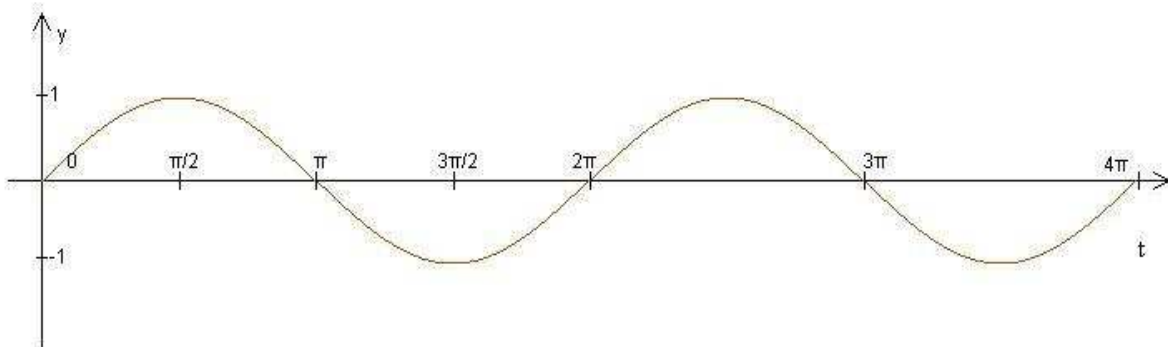
Kalibrace – porovnání s referenční hodnotou (vzorkem, etalonem), kalibrační zařízení o 1 řád přesnější než kalibrované zařízení.

Vstupní a výstupní odpor snímače

Vstupní odpor snímače – myšlen mechanický odpor, má význam pro zamezení mechanického ovlivnění měření. Výstupním odporem snímače je elektrický odpor.

1.7 Signál

Signál (z latinského *signalis* - dávat znamení) je optické, elektrické, elektromagnetické, akustické, mechanické, pneumatické, nebo hydraulické znamení, které má určitý význam. Signál je nositelem informace. Signál $s(t)$ se definuje jako závislost veličiny s na čase t . Rozeznáváme signály determinované periodické, determinované neperiodické a náhodné.



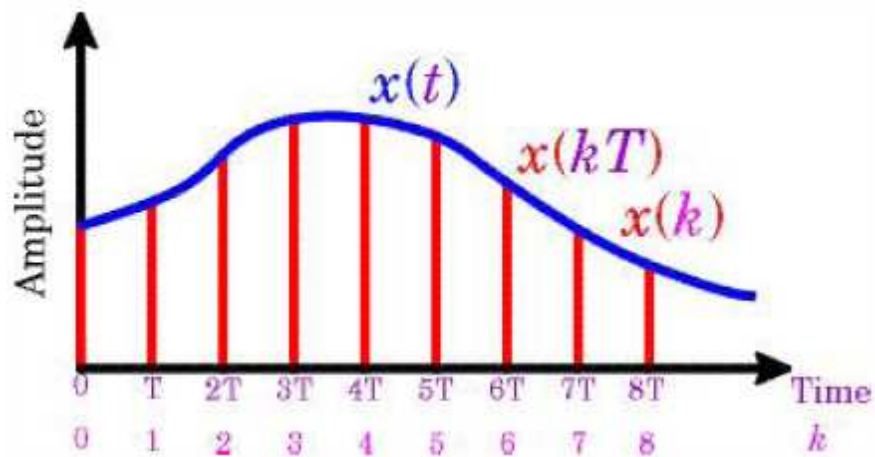
Obr. 1 Ukázka determinovaného periodického signálu

1.7.1 Aktivní a pasivní ochrana signálu

Aktivní ochrana signálu je zajištěna elektromagnetickým stíněním – použitím stíněného kabelu pro spojení jednotlivých komponentů v měřicím řetězci. Pasivní ochrana se zajišťuje filtrem vloženým mezi snímače a měřicí aparaturu

1.7.2 Vzorkování

Vzorkování je proces, při kterém ze signálu spojitého v čase vzniká signál diskrétní v čase. Vzorkovací perioda se volí podle potřeby a měřené veličiny (např. v případě měření teploty postačí jeden vzorek za sekundu, naopak v případě měření zvuku je třeba vyšší počet vzorků).



Obr. 2 Ukázka vzorkování signálu

Převzorkování – pokud je výstupem měření příliš mnoho vzorků, provede se převzorkování, např. každý desátý vzorek

1.7.3 Filtr, popis systému filtru

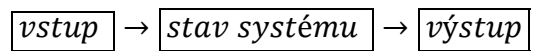
Filtr pro zpracování signálu představuje model, kterým modelujeme nějaký systém (skutečný, virtuální) popisující relace mezi vstupem a výstupem filtru (tzv. přenosová charakteristika).

Systém filtru lze popsat dvěma způsoby, vnějším popisem a vnitřním popisem. Filtr s vnějším popisem považuje systém za neznámý objekt (černá skříňka). U filtru s vnitřním popisem známe strukturu systému, která je popsána modelem, který obsahuje stavové veličiny (stav systému).

Vnější popis je popsán zobrazením:

$$\boxed{vstup} \rightarrow \boxed{výstup}$$

Vnitřní popis je popsán zobrazením:



Matematický popis těchto systémů lze pro spojité systémy realizovat pomocí diferenciálních rovnic, diskrétní systémy lze popsat pomocí diferenčních rovnic.

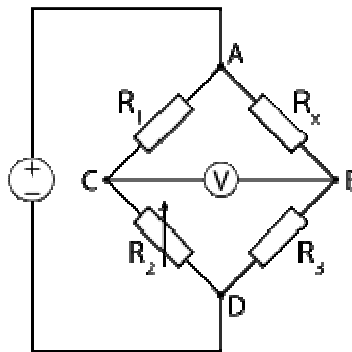
1.8 Elektromagnetická kompatibilita

Vzájemné působení elektromagnetických systémů včetně působení na lidský organismus je elektromagnetická kompatibilita. Lze definovat dva systémy, EMI – zdroje rušení a EMS – přijímače rušení. Většinu přístrojů lze definovat jako EMI + EMS.

2. MĚŘENÍ DEFORMACÍ POMOCÍ TENZOMETRŮ ZAPOJENÝCH DO WHEATSTONEOVA MŮSTKU [1] [2] [5] [7] [9] [10]

2.1 Měřicí můstek

Měřicí můstek je obvod složený ze čtyř impedancí a to tak, že tvoří uzavřený čtyřúhelník. Účelem můstku je zjišťovat neznámou impedanci na místě jedné z nich. Přitom obvykle jedna impedance je proměnlivá, aby bylo umožněno vyrovnání můstku. V tom případě měřidlo v úhlopříčce obvodu nezaznamená žádnou výchylku, protože větvemi obvodu teče stejný proud.



Obr. 3 Schéma měřícího můstku

2.1.1 Funkce můstků

Můstky se používají k přesnému měření elektrických veličin - kapacity, odporu nebo indukčnosti. Měření můstkovými metodami se zakládá na dosažení rovnováhy mezi větvemi můstku. Tuto rovnováhu zjišťujeme galvanometrem, zapojeným mezi uzly B a C. Na uzlech A, D je pak připojeno střídavé nebo stejnosměrné napájení (podle měřené veličiny: pro kapacitu a indukčnost střídavé, pro odpory stejnosměrné i střídavé, lepší je však stejnosměrné).

Měření je přesné, ale vyhovuje jen pro úzký rozsah hodnot (záleží na parametrech součástek můstku).

2.1.2 Napájení můstku

Napájení můstku je připojeno k jedné úhlopříčce můstku a způsob indikace – indikátor se zapojí k druhé úhlopříčce, vyvážení větví je zajištěno proměnným odporem (prvkem můstku).

2.1.3 Typy můstků

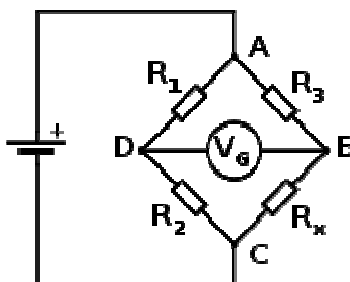
1. Wheatstoneův můstek – používá se k měření malých hodnot odporu

2. Thomsonův můstek – používá se k měření velmi malých hodnot odporu
3. De Sautyho můstek – používá se k měření kapacity
4. Scheringův můstek – používá se k měření kapacity
5. Fosterův můstek – používá se k měření kapacity
6. Careyho - Fosterův můstek – používá se k měření indukčnosti
7. Wienův můstek – používá se k měření kapacity
8. Campbellův můstek – používá se k měření indukčnosti nebo kapacity
9. Maxwellův můstek – používá se k měření indukčnosti nebo kapacity
10. Owenův můstek – používá se k měření indukčnosti
11. Hayův můstek – používá se k měření velkých indukčností
12. Andersonův můstek – používá se k přesným měřením indukčnosti
13. Giebeho-Zicknerův můstek - používá se k měření kapacity

2.2 Wheatstoneův můstek

Wheatstoneův můstek je obvod používaný pro měření odporu a malých změn odporu. Můstek 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).

Schéma Wheatstoneova můstku je uvedeno na Obr. 4.



Obr. 4 Wheatstoneův můstek.

Můstek se obvykle zakresluje způsobem zobrazeným na Obr. 4. Skládá se ze dvou větví (větev R_1 , R_2 a větev R_3 , R_x) připojených na stejnosměrný napájecí zdroj. Větve se chovají jako **děliče napětí**. Zjednodušenou úvahou (pro případ odpojeného měřidla V_G) lze snadno dojít k závěru, že pokud je napětí mezi body D a B nulové (vyvážený můstek), musí platit:

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

z čehož pak pro neznámý odpor

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

Wheatstoneův můstek se používá i pro výchylková měření, kdy odpor R_x může být realizován například odporovým teploměrem nebo odporovým tenzometrem. Výstupní napětí můstku (mezi body D a B) je pak nelineární funkcí velikosti odporu R_x .

2.2.1 Možnosti zapojení čidel (tenzometrů) do Wheatstoneova můstku.

Čtvrtmůstek

Zapojení do čtvrtmůstku využívá jedno aktivní čidlo R_1 (AC) a tři pasivní rezistance R_2, R_3, R_4 – tah a tlak.

Následkem mechanického namáhání měřeného vzorku mění aktivní čidlo R_2 svoji rezistanci R o hodnotu ΔR . Dojde-li ke změně teploty v okolí čidla, nastane další změna jeho rezistance ΔR_t , která může být srovnatelná s hodnotou ΔR . Zapojení je teplotně závislé (není teplotně kompenzováno), což je nevýhodné. Zapojení je sice nejjednodušší, ale v praxi se nepoužívá, neboť nezaručuje externí teplotní stabilizaci.

Stabilizace je zaručena použitím kompenzačního čidla v sousedním rameni můstku. Kompenzačním čidlem může být např. pasivní čidlo, nalepené na materiálu, který je stejný jako u měřeného prvku. Materiál s nalepeným kompenzačním čidlem se umísťuje do bezprostřední blízkosti aktivního čidla, aby byla zaručena totožnost jejich teplot, jako v následujícím příkladu zapojení.

Polomůstek

Zapojení do polomůstku je častým způsobem zapojení u tenzometrických přístrojů používaných při praktických aplikacích. Pasivní rezistance R_3, R_4 jsou zabudovány uvnitř měřicího přístroje stabilně ($R_3 = R_4 = R_p$). Kompenzační čidlo není vystaveno mechanickému namáhání, avšak reaguje na teplotní rozdíly ΔR_t (pasivní čidlo). Uvedené zapojení je jen přibližně lineární, jeho výhoda proti předchozímu (čtvrtmůstek) spočívá v tom, že je teplotně téměř kompenzováno. Výsledné chování můstku není závislé na hodnotách rezistancí $R_3 = R_4 = R_p$, umístěných uvnitř měřicího přístroje.

Zapojení do polomůstku lze realizovat následujícími způsoby:

- polomůstek – *dva aktivní snímače, dvě pasivní rezistance* – tah a tlak (v praxi málo využíváno),

- polomůstek – *dvě aktivní čidla, dvě pasivní rezistance* – ohyb (v praxi často užívané zapojení); vhodným zapojením je možné z měření záměrně vyloučit tahovou (tlakovou) složku a měřit tak pouze účinky ohybu,
- polomůstek – *dvě pasivní rezistance, jedno aktivní a jedno kompenzační příčné čidlo (KPC)* – tah (tlak) a ohyb; měří současně tahovou i ohybovou složku, což může být nežádoucí, chceme-li například měřit jen jednu z nich nebo objevuje-li se jedna z nich jako parazitní (např. kmitání prvku při měření tahové složky).

Plný (celý) můstek

Zapojení do plného můstku lze realizovat následujícími způsoby:

- celý můstek – *jedno aktivní čidlo, tři kompenzační* – tah a tlak; zapojení je přibližně lineární a přibližně teplotně kompenzováno, nevylučuje tah (tlak) ani ohyb,
- celý můstek – *čtyři aktivní čidla* – ohyb (vyloučen tah a tlak); zapojení neregistruje tah (tlak) a je citlivé pouze na ohyb,
- celý můstek – *čtyři aktivní čidla (dvě příčné)* – tah a tlak (vyloučen ohyb); zapojení je přibližně lineární, teplotně kompenzované, nereaguje na ohyb, je citlivé pouze na tah (tlak), zapojení s podobným výsledkem by bylo dosaženo záměnou dvou příčných čidel R_2 , R_4 pasivními kompenzačními čidly,
- celý můstek – *čtyři aktivní čidla (dvě příčná)* – ohyb (vyloučen tah a tlak); zapojení je přibližně lineární, teplotně kompenzované, nereaguje na tah (tlak), citlivé je pouze na ohyb,
- celý můstek – *čtyři aktivní čidla* – zkrut (vyloučen tah, tlak a ohyb); v případě malé délky nosníku způsobí ohybová síla kromě ohybu i zkrut (smyk) vetknutého nosníku, na které je citlivé toto zapojení, ostatní složky nejsou registrovány (měřeny).

2.2.2 Souhrn vlastností Wheatstoneova můstku.

K napájení se užívá stejnosměrného i střídavého napětí (U_0), podle toho se rozeznávají stejnosměrné a střídavé můstky.

Dále lze Wheatstoneovy můstky rozdělit na rovnovážné a nerovnovážné podle toho, zda v měřící diagonále je nebo není vykompenzováno napětí U . Tenzometrické můstky jsou většinou nerovnovážnými Wheatstoneovými můstky, u nichž poměr napětí U / U_0 je měřítkem mechanické deformace prvku. Na dříve uvedených druzích zapojení lze demonstrovat, že tento poměr závisí nelineárně na zjišťované deformaci ε , avšak díky zanedbání malých členů ve jmenovateli zlomku výsledné závislosti lze výraz linearizovat,

takže je možné považovat závislost $U / U_0 = f(\varepsilon)$ za lineární (přibližně) pro všechny typy dříve uvedených zapojení. Chyba, která tak vznikne, je v řádech 10^{-3} , neboť samotné zanedbané členy nejsou pro běžné deformace větší.

Externí teplotní kompenzace u můstkového zapojení je nutným požadavkem, neboť již několika stupňové změny teploty vyvolají takové změny rezistance čidel, které jsou srovnatelné s rezistenčními změnami vyvolanými mechanickým namáháním. Externí teplotní kompenzace je realizována vždy, je-li použito vedle aktivního čidla také jedno párové čidlo zapojené do sousedního ramene můstku, párové čidlo může být aktivní i pasivní. Pokud by bylo párové čidlo zapojeno do protilehlého ramene můstku, nebyla by teplotní kompenzace realizována, v takovém případě je nezbytné užít interně kompenzované čidlo. Nejspolehlivější teplotní kompenzaci zaručuje použití interní a externí kompenzace současně.

Různé způsoby zapojení čidel do tenzometrického Wheatstoneova můstku umožňují vyloučení nebo zahrnutí jednotlivých mechanických složek tahu, tlaku, ohybu event. smyku.

Podle počtu čidel zapojených v můstku rozlišujeme čtvrtmůstek, polomůstek a plný (celý) můstek. Jsou-li vyloučeny případy příčných, poissonovských čidel, lze pro všechny tři uvedené typy můstků napsat zobecněnou tenzometrickou rovnici ve tvaru

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1}{4} n \times k\varepsilon$$

kde n je počet aktivních ramen můstku. Tato rovnice názorně ukazuje, že se zvyšujícím se počtem aktivních čidel roste citlivost můstku.

Poměr citlivostí čtvrtmůstku, polomůstku a celého můstku je:

$$1 : 2 : 4$$

Podle účelu požití se rozeznávají statické můstky (statická měření, měřené napětí není časově závislé) a dynamické můstky (dynamická měření, měření časově závislých deformací při dynamických namáháních). Rozdíl je pouze v té části obvodu, která registruje měřený signál, základní měřicí část – Wheatstoneův můstek, je shodná.

2.3 Měřicí řetězec

Měřicí přístroj, případně měřicí zařízení (souhrnně měřicí aparatura), představuje v podstatě řetězec bloků tzv. **měřicí řetězec**, v němž dochází k transformaci měřené veličiny, která je veličinou vstupní, na veličinu výstupní, tj. údaj měřicího přístroje. Měřicím řetězcem rozumíme sled jednotlivých prvků mezi snímačem, který je prvním článkem řetězce a vyhodnocovacím zařízením, které je jeho posledním článkem.

Měřicí aparatura umožňuje:

1. připojení snímačů (můstky)
2. zpracování elektrického signálu (zesíleného)
3. digitalizaci

Měřicí řetězec, jak vyplývá ze schématu zapojení tenzometrického můstku a z předpokladu automatizace měření s využitím hardwarových a softwarových prostředků pro měření, zpracování a záznamu naměřených hodnot, se skládá ze snímačů – tenzometrů, prostředků pro přenos el. signálu (kabely propojující dynamickou měřicí ústřednu s tenzometry), převodníku – dynamické měřicí ústředny obsahující analogově digitální převodníky, filtry a multiplexor, prostředků pro přenos upraveného elektrického signálu (kabely propojující dynamickou měřicí ústřednu s počítačem) a vyhodnocovacího zařízení – počítače, jak znázorňuje Obr. 5.



Obr. 5 Schéma měřicího řetězce

Požadavky na měřicí řetězec

Veškerá měřicí zařízení musí mít platný kalibrační list. Je vhodné, aby veškeré komponenty instalované do měřicího řetězce, včetně softwarové podpory, byly od jednoho výrobce a v jedné vývojové řadě. Pouze tak je možné zajistit kompatibilitu všech zařízení a tím správnou interpretaci naměřených veličin. Řádné vyškolení a zkušenost s instalací jednotlivých komponentů a správné zapojení je nezbytným požadavkem pro funkční měřicí řetězec a správné výsledky měření.

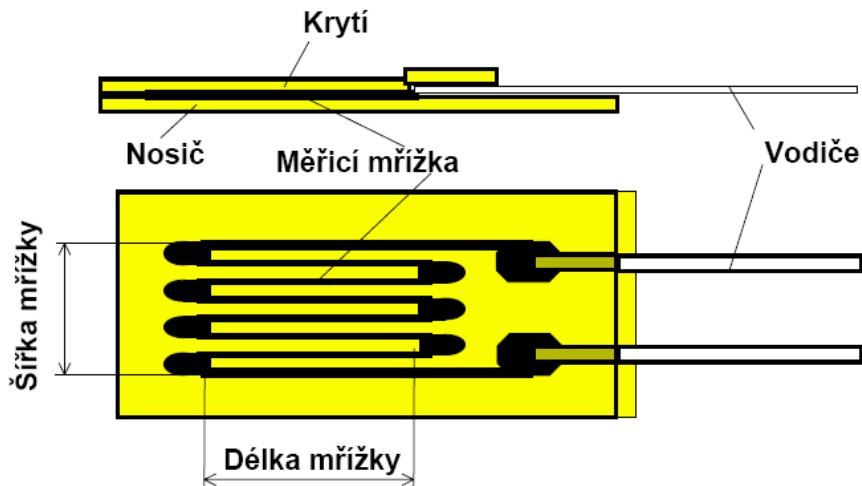
2.4 Komponenty měřicího řetězce

2.4.1 Odporové snímače, tenzometry

Odporový snímač, který je zapojen do napájeného měřicího můstku, vlivem vnějších sil mění svůj tvar – dochází ke změně délky a průměru odporového drátu. Tato změna, která je v rámci můstku zachycena změnou napětí, je přímo úměrná změně napětí ve zkoumané stavební konstrukci. Typickým odporovým snímačem je tenzometr.

Tenzometrů existuje mnoho druhů (např. mechanické, mechanicko-optické, pneumatické, hydraulické, strunové, indukční, kapacitní, odporové)

Předmětem této diplomové práce je problematika technického měření stavebních konstrukcí odporovými tenzometry, které se aplikují přímo na stavební konstrukci – fóliové tenzometry.



Obr. 6 Schéma tenzometru

Každý tenzometr má definovány rozměrové, odporové, teplotní, hysterezní a deformační parametry.

Ukázka fóliových tenzometrů je uvedena na Obr. 7.



Obr. 7 Ukázka fóliových tenzometrů

Měřené veličiny.

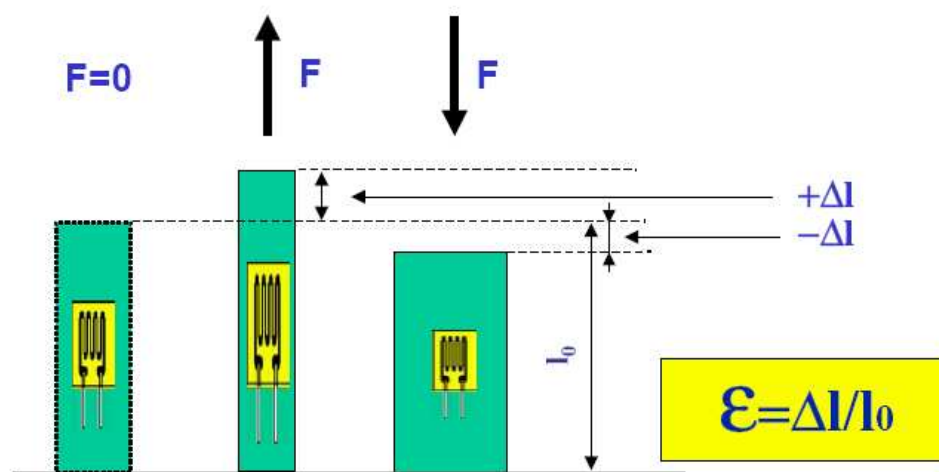
Při tenzometrickém měření je přímo měřenou veličinou změna elektrického odporu tenzometru, vyvolaná změnou deformace konstrukce v místě, kde byl tenzometr umístěn na

konstrukci. Vycházíme-li z předpokladu, že deformace tenzometru je shodná s deformací měřené stavební konstrukce v místě, kde byl tenzometr umístěn, pak závislost změny odporu tenzometru na změně jeho deformace vyjadřuje charakteristika tenzometru, která je u každého tenzometru daná. Poměrnou deformaci konstrukce v konkrétním místě lze určit při znalosti druhu zapojení elektrického odporového tenzometru do elektrického obvodu a mechanické napětí, které odpovídá změřené poměrné deformaci, lze určit při znalosti fyzikálních vlastností materiálu konstrukce (Yongův modul pružnosti E a Poissonova konstanta μ).

Veličiny odvozené z odečtených hodnot změny el. odporu tenzometru:

poměrná deformace ε [-]

mechanické napětí σ [MPa]



Obr. 8 Schéma principu fungování fóliového tenzometru

Odvození vztahů pro tenzometr

Podstatou měření deformace pomocí elektrických odporových tenzometrů je změna odporu tenzometru v důsledku této deformace. Uvedenou závislost lze odvodit následovně:

Pro odpor R drátu tenzometru platí následující vztah:

$$R = \rho \cdot \frac{l_0}{A}$$

ρ měrný odpor materiálu drátka tenzometru,

l_0 délka drátka tenzometru,

A plocha průřezu drátka tenzometru.

Poměrná **změna odporu** drátka vyjádřená jako parciální derivace přes všechny proměnné je dána následujícím vztahem:

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{\rho \cdot \frac{l_0}{A}} \cdot \left(\frac{\rho}{A} dl_0 - \frac{\rho \cdot l_0}{A^2} dA + \frac{l_0}{A} d\rho \right) = \frac{dl_0}{l_0} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}.$$

a) Pro poměrnou deformaci platí následující dva vztahy:

$$\frac{dl_0}{l_0} = \varepsilon,$$

$$-\frac{dA}{A} = +2\mu \frac{dl_0}{l_0},$$

ε relativní prodloužení drátku,

μ Poissonova konstanta materiálu drátku.

b) Dosazením vztahů výše uvedených vztahů lze odvodit následující vztah:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl_0}{l_0} + 2\mu \frac{dl_0}{l_0} + \frac{d\rho}{\rho} = \varepsilon \cdot \left(1 + 2\mu + \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\rho}{\rho} \right)$$

kde

$$K_d = 1 + 2\mu + \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\rho}{\rho}$$

je deformační citlivost drátku (K-faktor),

c) Výsledný vztah pro změnu odporu drátku pak lze psát i v následujícím tvaru:

$$\frac{dR}{R} = K_d \varepsilon = K_d \frac{dl_0}{l_0}$$

d) Pro vyjádření absolutních odporových změn ΔR v důsledku prodloužení (deformace) Δl_0 tenzometru je nutné integrovat předchozí vztah v příslušných mezích následujícím způsobem:

$$\int_R^{R+\Delta R} \frac{dR}{R} = K_d \cdot \int_{l_0}^{l_0+\Delta l_0} \frac{dl_0}{l_0}$$

po úpravě předchozí rovnice obdržíme tuto rovnici v následujícím tvaru:

$$\ln \frac{R + \Delta R}{R} = K_d \cdot \ln \frac{l_0 + \Delta l_0}{l_0}$$

e) Výsledný vztah pro změnu odporu v závislosti na změně poměrné deformace pak můžeme vyjádřit z předchozí rovnice následujícím způsobem:

$$\frac{\Delta R}{R} = -1 + \left(1 + \frac{\Delta l_0}{l_0} \right)^{K_d}$$

pokud do vztahu tohoto vztahu dosadíme

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0}$$

obdržíme následující vyjádření změny odporu v závislosti na změně poměrné deformace:

$$\frac{\Delta R}{R} = -1 + (1 + \varepsilon)^{K_d}$$

Poměrnou deformaci v závislosti na změně odporu pak můžeme z předchozího vztahu vyjádřit následujícím způsobem:

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right)^{\frac{1}{K_d}} - 1$$

Deformační citlivost tenzometru K_d (k-faktor) je definována ke každému tenzometru a výrobce jej dokládá jako součást technických parametrů tenzometru.

V oblasti pružných deformací při znalosti Youngova modulu pružnosti **E** převést výsledky měřené deformace ε pomocí Hookova zákona na **normálové napětí** σ :

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

2.4.2 Dynamická měřicí ústředna

Vícekanálová měřicí ústředna je vhodným nástrojem ve zkušebních a vývojových laboratořích např. při ověřování mechanických a životnostních vlastností konstrukcí nebo materiálů, ve výrobě při monitorování výrobních postupů či v metrologických odděleních. Jejich univerzální vstupy jsou konstruovány pro širokou škálu snímačů, topologii kabeláže je možno přizpůsobit měřicím úlohám, jejich komunikační rozhraní umožňuje pracovat

v reálném čase s programovým vybavením, které zajišťuje veškeré funkce spojené s konfigurací měření a práce s daty.

Při tvorbě této diplomové práce, realizaci měření a zpracovávání dat byl autor, vzhledem k možnostem zkušební laboratoře DFJP a jejímu vybavení, limitován produktovou řadou výrobce kompletního sortimentu prostředků a zařízení pro předmětný typ měření spol. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM).

V této diplomové práci při měření použita dynamická měřicí ústředna DMC Plus (HBM) je vybavena nezávislými měřicími zesilovači DV55 (jednotlivé kanály ústředny) a centrální výpočtovou a paměťovou jednotkou. Nastavení jednotlivých kanálů se provádí pomocí originálního softwaru DMC Plus nainstalovaného na měřicím PC.



Obr. 9 Ukázka dynamické měřicí ústředny (MGC Plus firmy HBM)

2.4.3 Kably

Pro propojení tenzometrů a dynamické měřicí ústředny je nutné použít výhradně stíněné kably. Fyzikální parametry kabelů (průměr, odpor, indukivita, kapacita, apod.), musí být uvedeny v katalogových listech kabelů.

Pro propojení dynamické měřicí ústředny a měřicího PC je nutné použít kabel pro vysokorychlostní přenos dat (rozhraní GPIB-USB), který přenáší data v digitální podobě na krátkou vzdálenost cca 2 m. Dynamická měřicí ústředna se umísťuje v blízkosti měřicího PC.

2.4.4 Software pro měření a ukládání dat

Softwarové nastavení jednotlivých kanálů, na které jsou zapojeny tenzometrické snímače, zpracování a uložení naměřených dat, se provádí pomocí software nainstalovaného

v měřicím počítači. Software musí umožnit nezávislé nastavení, sledování a záznam všech připojených tenzometrických snímačů.

3. TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ JAKO NÁSTROJ PŘI STANOVOVÁNÍ VLASTNOSTÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ, PŘÍPRAVA A REALIZACE MĚŘENÍ, ZPRACOVÁNÍ DAT. [2] [5] [9]

3.1 Zkoušky stavebních konstrukcí tenzometrickým měřením

Pro ověření výpočtů při návrhu stavebních konstrukcí nebo jejich technického stavu v průběhu životnosti se provádí na konstrukcích, které jsou zatíženy vnějšími působícími silami zkoušky jejich mechanických vlastností, ze kterých lze odvodit např. správnost návrhu (výpočtu) a únosnost konstrukce. Jedním ze způsobů je stanovení deformace, resp. mechanického napětí v konkrétním místě stavební konstrukce a to tenzometrickým měřením pomocí elektrických odporových tenzometrů.

Předmětem takových zkoušek mohou být libovolné ocelové stavební konstrukce. Specifikace konkrétních míst na konstrukci, ve kterých se provádí měření, je ovlivněna požadavkem na výsledné naměřené hodnoty resp., které hodnoty v jakých místech konstrukce je třeba získat. Lze tak získat deformaci, resp. mechanické napětí např. v místě hlavního nosníku, kde lze předpokládat maximální deformaci, resp. mechanické napětí, lze ale též vyšetřit nosník tak, aby byl takový předpoklad, zavedený do výpočtu ověřen. Velmi výhodné je toto měření aplikovat pro ověření mechanických vlastností konstrukce v konstrukčních detailech, kde lze např. ze zkušenosti projektanta předpokládat hodnoty deformace, resp. mechanického napětí na mezi použitelnosti.

3.2 Postup tenzometrického měření

Postup tenzometrického měření lze rozdělit do následujících tří částí:

- příprava měření,
- realizace měření,
- zpracování naměřených dat.

3.2.1 Příprava měření

Aplikace tenzometrů:

1. mechanické očištění povrchu (pískováním)
2. chemické čištění povrchu
3. nalepení tenzometru a letovací lišty
4. krytí tenzometru krycími prostředky

Z hlediska přípravy měření je nejdůležitější částí řádné nalepení tenzometrů a jejich správné zapojení do elektrických obvodů. Lepení tenzometru se provádí na dokonale očištěný a relativně hladký povrch konstrukce.

Požadované drsnosti povrchu se na závěr jeho čištění (opískování) docílí ručně pomocí smirkového papíru stupně 200 až 300. Povrch nesmí obsahovat žádné vruby (např. rýhy od mechanického poškození nebo zkorodovaná místa). Odmaštění povrchu se provede pouze speciálním tenzometrickým odmašťovadlem.

Čistící prostředky, odmašťovadla HBM

Čistící prostředek **RMS1**

- pro očištění povrchu před lepením tenzometru



Obr. 10 Příklad čistícího a odmašťovacího prostředku

Fóliový odporový tenzometr se lepí na povrch speciálním jednosložkovým lepidlem. Tuhnutí lepidla trvá cca 2 min. a po tuto dobu musí být tenzometr přitlačen celou svojí plochou k povrchu konstrukce. Mezi tenzometrem a povrchem konstrukce nesmí být vzduchová bublina.

Lepidla HBM

Lepidla **EP310, EP250** – vytvrzování za zvýšené teploty

- pro výrobu snímačů
- pro vysoké teploty
- vysoká dlouhodobá stabilita

Lepidla **X60, Z70, X280** – vytvrzování za běžné teploty

- pro experimentální napěťovou analýzu
- krátká doba vytvrzování
- jednoduchá aplikace

Lepidlo typu Chemopren

- připevnění pomocného vzorku ze shodného materiálu, jako je měřený vzorek pro aplikaci kompenzačního snímače (teplotní kompenzace), aplikace na jedné hraně vzorku



Obr. 11 Příklad čistícího a odmašťovacího prostředku

Ochrana tenzometru před vlhkostí, jinými vlivy a mechanická ochrana se zajišťuje použitím krycích tmelů. Druh tmelu se volí podle teplotního rozsahu, chemické odolnosti a typu aplikace.

AK22	tuhý tmel
ABM75	silikonový tmel s hliníkovou fólií
NG150	nitrilová guma
SG250	silikonová guma
PU120	polyuretanový lak
SL450	silikonová pryskyřice

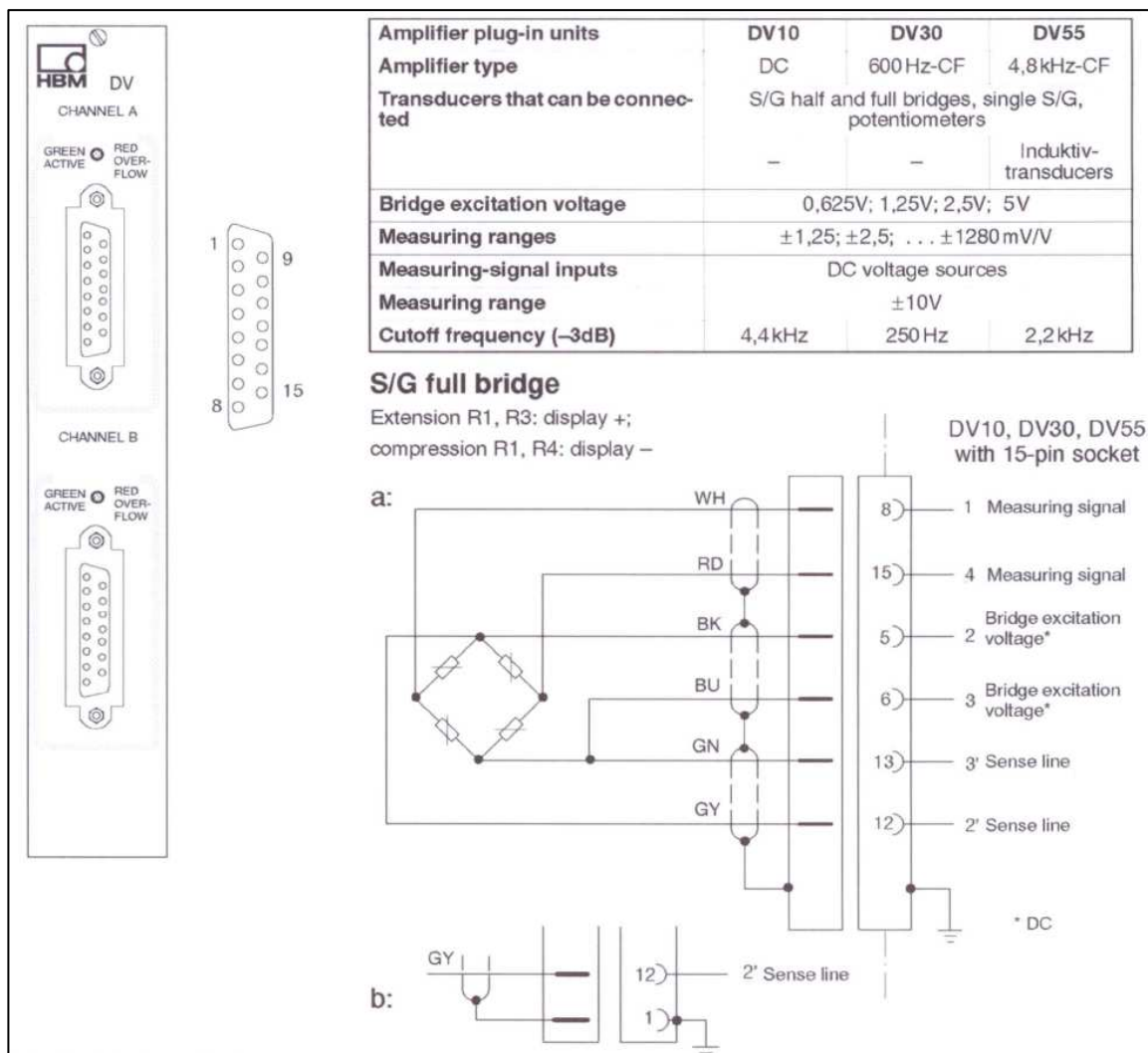


Obr. 12 Krycí a ochranné prostředky HBM

Princip zkoušky nevylučuje užití jednotlivých prvků měřících přístrojů různých výrobců. Jak již bylo uvedeno výše, jako nejvýhodnější se jeví použití jedné výrobní řady shodného výrobce, což odbourává potíže s „kompatibilitou“ jednotlivých prvků.

Výstupy tenzometru (konce tenzometrického drátku) se přiletují na předem připravenou svorkovnici, která je ke konstrukci připevněna speciálním dvousložkovým popř. jiným vhodným lepidlem. Po přiletování je třeba změřit odpor tenzometru pomocí Ohmmetru. Tenzometr musí mít proti konstrukci minimální odpor 100 MΩ (nesmí být svod mezi konstrukcí a tenzometrem) a mezi jednotlivými výstupy tenzometru na svorkovnici musí být zachován výrobcem uvedený jmenovitý odpor tenzometru.

Zapojení tenzometru do elektrického obvodu závisí na charakteru měření. Pokud jsou do obvodu zapojeny dva tenzometry (aktivní a kompenzační), jedná se o zapojení do tzv. polovičního Wheatstoneova můstku, pokud jsou do obvodu zapojeny čtyři tenzometry, jedná se o zapojení do tzv. plného Wheatstoneova můstku. Aktivní tenzometry T_A jsou přilepeny na požadované místo na konstrukci, kompenzační tenzometry T_K jsou umístěny do blízkosti aktivního tenzometru na plochou destičku ze stejného materiálu jako je měřená konstrukce. Destička je připevněna ke konstrukci pružným lepidlem typu chemopren, aby do ní nebyly přenášeny deformace konstrukce a nebyla mechanicky namáhána. V průběhu měření pak kompenzační tenzometry kompenzují vliv teploty. Pomocí kabelů se provede propojení tenzometrů ke konektoru měřicího zesilovače dynamické měřicí ústředny, jak je znázorněno na schématu na obrázku Obr. 13.



Obr. 13 Zapojení dvou aktivních a dvou kompenzačních tenzometrů do plného Wheatstoneova můstku. (vpravo schéma zapojení, vlevo konektor měřicího zesilovače dynamické měřicí ústředny)

Poslední částí přípravy měření je nastavení jednotlivých kanálů dynamické měřicí ústředny. Pro každé měření se přednastaví softwarově jednotlivé kanály a toto přednastavení se uloží do paměti měřicího PC. V nastavení je třeba správně zvolit typ kanálů, vzorkovací frekvenci, použitý filtr, citlivost snímání, nulovou hodnotu, atd. Vlastní nastavení je možné realizovat teprve po dosažení provozní teploty měřících zesilovačů v dynamické měřicí ústředně (minimálně 20 min. od spuštění dynamické měřicí ústředny).

3.2.2 Realizace měření

Po provedení přípravy měření je realizováno měření samotné. Pokud je měření prováděno v laboratoři, umístí se vzorky např. do zatěžovacího stavu a provede se zatěžovací zkouška. Pokud je prováděno měření např. v terénu na mostní konstrukci, zatíží se mostní konstrukce požadovaným zatížením a provede se měření.

3.2.3 Vyhodnocení naměřených dat a interpretace výsledků zkoušky

Zpracování měřených dat a jejich uložení do paměti měřicího PC závisí na podmínkách stanovených na počátku měření (požadavek na výstup)

- záznam deformací
- záznam mechanického napětí

Výsledkem měření jsou zaznamenaná data změřených deformací, resp. mechanických napětí dané konstrukce, která se dále zpracovávají. Textové soubory s naměřenými hodnotami lze exportovat do tabulkového procesoru pro další zpracování dat a vyhodnocení měření pomocí grafů.

3.3 Podmínky měření

Tenzometrická měření stavebních konstrukcí lze realizovat v uzavřených prostorách (místnosti, laboratoře, kabina automobilu, apod.) nebo v terénu (měření mostů, prvků konstrukcí pozemních staveb apod.). V rámci této diplomové práce bylo prováděno výhradně měření v uzavřené místnosti – laboratoři Dopravní fakulty Jana Pernera.

Pro zajištění kvality – přesnosti výsledků zkoušky musí být splněny následující podmínky, bez kterých nelze zkoušku provádět nebo její výsledek nebude získán s požadovanou přesností:

- 1.) Tenzometry lze aplikovat pouze na připravený a dokonale suchý podklad, ošetřený odmašťovadlem.
- 2.) Je nezbytné postupovat přesně podle návodu k lepení tenzometrů a provést vizuální kontrolu dokonalosti a přesnosti nalepení.

- 3.) Letované spoje je nutné chránit před vodivým zkratem (voda, nečistoty, apod.).
- 4.) Všechny části měřicího řetězce je nutné chránit před mechanickým poškozením (ochrana kabelů před „zlomením“ apod.).
- 5.) Spojky kabelů je nutné chránit před vodivým zkratem (voda, nečistoty, apod.).
- 6.) Dynamická měřicí ústředna a měřicí počítač musí být chráněny před prachem a vlhkostí.
- 7.) Dynamickou měřicí ústřednu je nutné chránit před výkyvy teplot a poryvy větru (prudké změny teploty mohou vyvolat nestabilitu měřících zesilovačů v dynamické měřicí ústředně).
- 8.) Je nutné zajistit relaxaci dynamické měřicí ústředny před vlastním měřením, ochranná doba na dosažení vnitřní provozní teploty měřících zesilovačů v dynamické měřicí ústředně činí cca 20 minut.
- 9.) Dynamická měřicí ústředna a měřicí počítač musí být chráněny před výkyvy zdroje napětí.

4. NEJISTOTY MĚŘENÍ TENZOMETRY ZAPOJENÝMI DO PLNÉHO WHEATSTONEOVA MŮSTKU [1] [3] [4] [5] [9]

4.1 Typy nejistot, základní poznatky

Nejistota typu A

Nejistoty typu A jsou nejistoty měření způsobené náhodnými vlivy.

Velikost se stanoví na základě statistického zpracování opakovaného měření též hodnot jedné veličiny, je přímo závislá na množství opakování měření, její hodnota klesá, pokud roste počet opakovaných měření.

Nejistota typu B

Nejistoty typu B nejsou způsobeny náhodnými vlivy, ale systematickými vlivy – chybami při měření.

Obecně jsou zdrojem nejistoty typu B nedokonalosti týkající se:

- a) použitých měřicích prostředků,
- b) použitých měřicích metod,
- c) podmínek měření,
- d) konstant použitých při vyhodnocování,
- e) vztahů (závislostí) použitých při vyhodnocování.

V případě stanovení nejistoty typu B u poměrné deformace, respektive u mechanického napětí se jedná o:

a) nejistoty tenzometrického snímače, které lze dále rozčlenit na:

- nejistoty geometrie tenzometru,
- nejistoty kvality povrchu měřeného místa,
- nejistoty způsobu lepení tenzometru,
- nejistoty odporu tenzometru,
- nejistoty k-faktoru tenzometru,
- nejistoty teplotní deformace tenzometru,
- nejistoty příčné deformace tenzometru,

b) nejistoty kabelu propojujícího tenzometr s dynamickou měřicí ústřednou,

c) nejistoty dynamické měřicí ústředny,

d) nejistoty kabelu propojujícího dynamickou měřicí ústřednu s měřicím PC,

e) nejistoty hardwaru měřicího PC,

f) nejistoty softwaru měřicího PC.

Nejistota tenzometrického snímače

Nejistoty měření z hlediska tenzometrického snímače vychází z katalogových listů tenzometrických snímačů, kde výrobce garantuje přesnost stanovení.

Nejistoty typu C

Nejistota typu C je definovaná jako kombinovaná nejistota měření

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$$

Standardní rozšířená nejistota měření

$$U = k \cdot u_C$$

$k = 2$ 95% ... výskyt hodnoty s pravděpodobností 95%

$$40 \, \Omega \quad U = 2 \, \Omega \quad k = 2$$

$$38 \, \Omega \text{ ----- } 42 \, \Omega$$

s 95% pravděpodobností

4.2 Nejistoty tenzometrických měření stavebních konstrukcí:

Nejistoty měření jsou vyjádřeny pro všechny parametry vstupující do měření poměrné deformace ε , respektive mechanického napětí σ . Nepřímé měření obou výše zmíněných veličin vychází z následujících vztahů:

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right)^{\frac{1}{K_d}} - 1,$$

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

K_ddeformační citlivost tenzometru (K-faktor),

ΔRzměna odporu tenzometru,

R odpor tenzometru,

E Youngův modul pružnosti.

4.3 Stanovení standardní nejistoty typu A – uA

4.3.1 Poměrná deformace ε

Při n opakovaných měřeních poměrné deformace (min. 10 měření při omezeném výběru) se získá n údajů (x_1, x_2, \dots, x_n). Nejistota typu A je v tomto případě rovna výběrové směrodatné odchylce definované následujícím způsobem:

$$u_{Ax} = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

kde \bar{x} výběrový průměr definovaný následovně:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Tato měření je třeba provádět za srovnatelných podmínek (stejná zatížení, stejné umístění tenzometrů, apod.).

Z hlediska standardní nejistoty typu A lze poměrnou deformaci ε považovat za přímo měřenou veličinu a mechanické napětí σ za nepřímo měřenou veličinu.

Nejistota u_{Ax} typu A poměrné deformace ε se stanoví podle dvou výše uvedených vztahů.

4.3.2 Mechanické napětí σ

Nejistotu typu A mechanického napětí σ je nutné stanovit na základě principu stanovení nejistoty měření u nepřímo měřené veličiny.

Pro m přímo měřených veličin platí následující vztah:

$$u_{Ay}^2 = s_{\bar{y}}^2 = \sum_{j=1}^m A_{xj}^2 \cdot s_{\bar{x}j}^2 + 2 \cdot \sum_{\substack{j=2 \\ k < j}}^m A_{xj} \cdot A_{xk} \cdot s_{\bar{x}j,k}$$

A_{xj} , A_{xk} jsou parciální derivace ve vztahu vystupujících proměnných veličin.

Úpravou pro jednu přímo měřenou veličinu (vztaženo na poměrnou deformaci) dostaneme následující vztahy:

$$u_{Ay}^2 = s_{\bar{y}}^2 = A_x^2 \cdot s_{\bar{x}}^2$$

$$u_{Ay} = \sqrt{s_{\bar{y}}^2} = A_x \cdot s_{\bar{x}}$$


Po dosazení $A_x = E$ do předchozího vztahu obdržíme vztah pro u_{Ay} v následujícím tvaru:

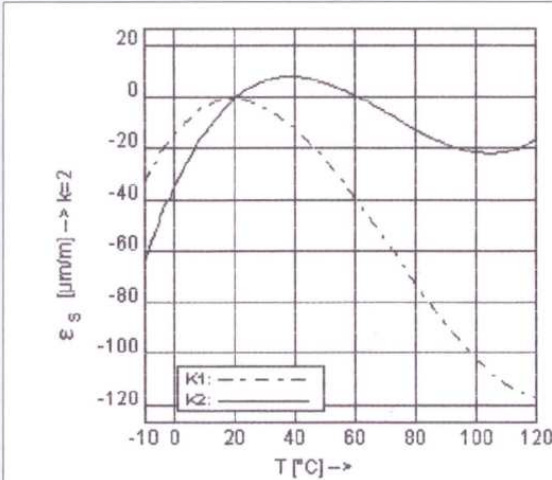
$$u_{Ay} = A_x \cdot s_{\bar{x}} = E \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

u_{Ay}vyjadřuje standardní nejistotu měření typu A, jež je dána součinem výběrové směrodatné odchylky měření poměrné deformace a Youngova modulu pružnosti (počet měření musí být min. 10),

E Youngův modul pružnosti (uvažovaný jako konstanta).

Nejistota u_{Ay} typu A mechnického napětí σ se stanoví dle výše uvedených dvou vztahů.

 Dehnungsmeßstreifen Strain Gauges Jauges d'extensométrie		Typ US-Type 10/120LY11	
Widerstand Resistance Résistance		120 [Ω]	+ 0.35 [%] - 0.35 [%]
k-Faktor Gauge factor Facteur k		2,08	± 1 [%]
Querempfindlichkeit Transverse Sensitivity Sensibilité transverse			-0.5 [%] - [%]
Temperaturkompensation: Angepaßt für Temperature Compensation: Compensated for Compensation de température: Compensation pour			
$\alpha = 10.8$ [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]			
<input checked="" type="checkbox"/> Stahl Steel Acier	<input type="checkbox"/> Alumi- nium	<input type="checkbox"/> Sonstige Other Autre	
Stückzahl Quantity Quantité		10	mit with avec
			ohne without sans
			<input checked="" type="checkbox"/> Applikationshilfe Application aid Support d'aide à l'application
Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gauge factor		104	± 10 [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
Coefficient de température du facteur k		(-10 ... +45 $^{\circ}\text{C}$)	
Artikel Nr. Part No. No. de Réf.		1-LY11-10/120	
Folienlos Lot Lot de la feuille		A330/10	
Herstellungslos Batch Lot de fabrication		812000952/02	
Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an. All technical data in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number. Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jauge ainsi que le lot de fabrication.			



$\epsilon_s(T) = -14.6 + 1.48 T - 4.38 \cdot 10^{-2} T^2 + 2.03 \cdot 10^{-4} T^3 + 0.0333 \cdot L \cdot (T-20) \mu\text{m/m} \pm 0.3 (\mu\text{m/m}) \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Temperaturgang der Dehnungsmeßstreifen bei Applikation auf Werkstoffen mit unseitig angegebener Wärmeausdehnungskoeffizienten α . Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

Kennlinie 1: DMS ohne Anschlußbändchen

Kennlinie 2: DMS mit Anschlußbändchen (30 mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.
 T = Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ L = einfache Bändchenlänge in mm

The **Thermal output** refers to strain gauges when bonded to materials with the coefficient of thermal expansion α given overleaf. Values are measured at a continuous temperature progression.

Curve 1: Gauges without connecting leads

Curve 2: Gauges with connecting leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, then the thermal output lies between curve 1 and 2. The numeric approximation allows the calculation of the thermal output for any lead length.
 T = temperature in $^{\circ}\text{C}$ L = simple lead length in mm

Comportement en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont les coefficients de dilatation thermique α sont indiqués au verso. Mesuré au cours d'une variation continue de la température.

Courbe 1: Jauges sans fils de sortie

Courbe 2: Jauges avec fils de sortie (longueur unitaire du fil de 30 mm). Lorsque les fils sont plus courts, le comportement en température se trouvera entre les deux courbes 1 et 2. Le dernier terme de l'équation détermine avec exactitude l'influence des fils de sortie.
 T = température en $^{\circ}\text{C}$ L = longueur unitaire des fils en mm

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK
 HBM WÄGETECHNIK GMBH
 Im Tiefen See 45, D-64293 Darmstadt
 Tel.: +49-1805-22 32 49; Telefax: +49 / 61 51 / 80 35 86
<http://www.hbmwt.com>

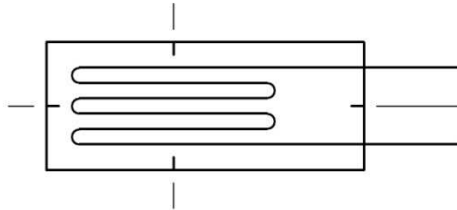
wt 12.97 - 30.0 wd

Obr. 14 Katalogový list tenzometrických snímačů 10/120LY11

4.4 Stanovení standardní nejistoty typu B

4.4.1 Nejistota geometrie tenzometru – u_{B1}

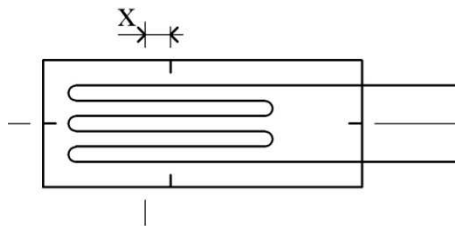
Nejistota geometrie tenzometru vyplývá z míry přesnosti nalepení tenzometru na konkrétní místo měřené konstrukce. Konkrétní místo konstrukce musí být předem přesně vyznačeno umíst'ovacím křížem, který specifikuje u konkrétní geometrie tenzometru do jaké míry je tenzometr přesně nalepen, umíst'ovací kříž je uveden na Obr. 15.



Obr. 15 Umíst'ovací kříž tenzometru

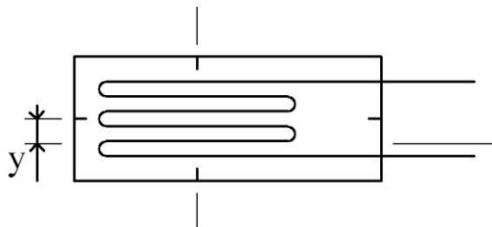
Vyznačením umíst'ovacího kříže je výrazným způsobem snížena nejistota geometrie, která je dána následujícími třemi faktory:

- x posun = horizontální posunutí tenzometru



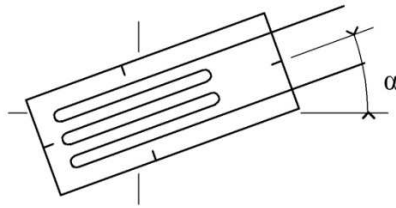
Obr. 16 Horizontální posunutí tenzometru

- y posun = vertikální posunutí tenzometru



Obr. 17 Vertikální posunutí tenzometru

- α natočení = úhel natočení tenzometru



Obr. 18 Úhel natočení tenzometru

Každý tenzometr má na sobě vyznačeny osy, které se musí po nalepení tenzometru shodovat s umístovacím křížem na konstrukci. V případě, že tomu tak po nalepení není, je nutné tenzometr odbrousit a nalepit nový. Přípustná míra nepřesnosti činí:

- u posunu x, y maximálně 0,2 mm,
- u úhlu natočení α maximálně 5° .

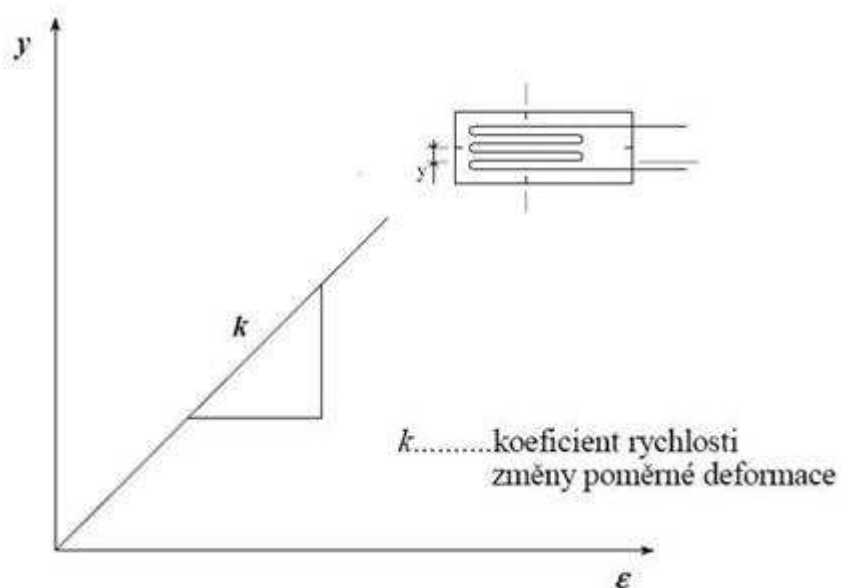
Zde uvedené míry nepřesnosti byly konzultovány s vedoucím diplomové práce.

Nejistota geometrie tenzometru vztažena na poměrnou deformaci z hlediska posunu x, y závisí na změně deformace při konstantním zatížení vzhledem k neutrální ose konstrukce. Neutrální osou rozumíme místo, kde při zatížení konstrukce nedochází k žádné deformaci (neutrální osa může ležet i mimo konstrukci).

V případě prutových prvků namáhaných pouze rovnoměrným tahem nebo rovnoměrným tlakem je nejistota geometrie tenzometru (vztažená k poměrné deformaci z hlediska posunutí x, y) nulová.

U ostatních prvků konstrukce je stanovení nejistoty geometrie tenzometru vztaženo na poměrnou deformaci z hlediska posunutí x, y níže uvedeným způsobem.

Nejistota měření poměrné deformace z hlediska y posunu je přímo závislá na strmosti změny deformace vzhledem k neutrální ose podle Obr. 19.



Obr. 19 Strmost změny deformace vzhledem k neutrální ose

Maximální poměrná deformace tenzometrů řady Y je dle výrobce 50 000 $\mu\text{m/m} = 50$ mm/m. Při předpokladu lineárního nárůstu deformace je pak koeficient změny dán následujícím vztahem:

$$k = \frac{50}{y}$$

kde

y.....je nejvzdálenější poloha hrany tenzometru vzhledem k neutrální ose.

Nejistotu měření poměrné deformace pak stanovíme podle následujícího vztahu:

$$u_{Bly} = k \cdot \frac{\Delta y}{3}$$

kde

Δy definovaná přípustná míra nejistoty posunu 0,2 mm,

3.....koeficient, který vyplývá z předpokladu, že se jedná o normální rozdělení pravděpodobnosti odchylky měření.

Příklad č.1:

V extrémním případě, kdy výška y je šířka tenzometru + 0,2 mm, tenzometr má šířku 9,5 mm a při dosažení maximální poměrné deformace 50 mm/m v krajním vlákne vzhledem k neutrální ose, je výpočtem stanovena možná nejistota měření následovně:

$$u_{B1y} = \frac{50 \text{ mm/m}}{9,7 \text{ mm}} \cdot \frac{0,2 \text{ mm}}{3} = 0,3436 \text{ mm/m}$$

což při měřené maximální deformaci 25,5155 mm/m činí 1,35 %.

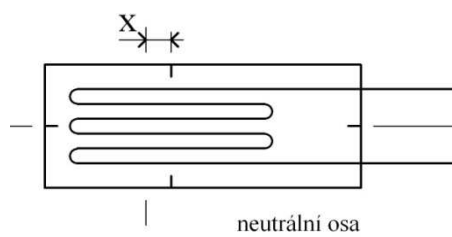
Příklad č.2:

V reálném případě výška y činí 100 mm, tenzometr má šířku 9,5 mm a při dosažení maximální poměrné deformace 50 mm/m v krajním vlákně vzhledem k neutrální ose je výpočtem stanovena možná nejistota měření následovně:

$$u_{B1y} = \frac{50 \text{ mm/m}}{100 \text{ mm}} \cdot \frac{0,2 \text{ mm}}{3} = 0,0333 \text{ mm/m}$$

což při měřené maximální deformaci 47,625 mm/m činí 0,07 %.

Za předpokladu, že v konstantní vzdálenosti od neutrální osy je konstantní deformace, je nejistota měření z hlediska x posunu rovna nule, tedy $u_{B1x} = 0$.



Obr. 20 Konstantní deformace v konstantní vzdálenosti od neutrální osy

Nejistota geometrie tenzometru pro poměrnou deformaci z hlediska natočení o úhel α závisí na velikosti měřené poměrné deformace ϵ a úhlu pootočení α . Hodnota nejistoty geometrie tenzometru $u_{B1\alpha}$ byla stanovena analyticky na základě naměřených hodnot v kapitole 5 této práce.

Pro definovanou přípustnou míru nejistoty natočení ($\alpha = 5^\circ$) byla při znalosti Hookova zákona vypočtena hodnota poměrného přetvoření a stanovena hodnota nejistoty měření

$$u_{B1\alpha} = \frac{1,429 \cdot 10^{-5}}{3} = 4,76 \cdot 10^{-6} \text{ m/m} = 4,76 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Dosazením výše uvedených hodnot do vztahu předchozího vztahu lze výpočtem stanovit nejistotu geometrie tenzometru pro poměrnou deformaci z hlediska natočení o úhel α následujícím způsobem:

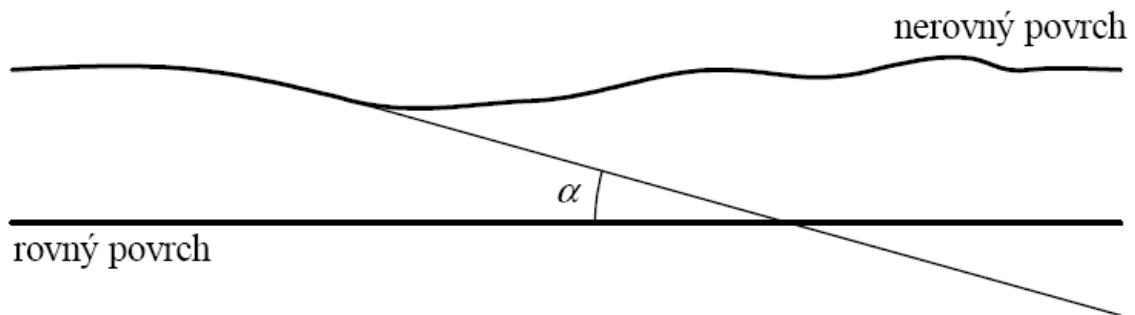
$$u_{B1} = \sqrt{(u_{B1y})^2 + (u_{B1x})^2 + (u_{B1\alpha})^2}$$

Vzhledem k tomu, že v této diplomové práci bylo uvažováno pouze s prutovými prvky zatíženými osovými silami, je rozložení napětí v průřezu rovnoměrné, a tedy hodnota nejistoty geometrie prutu $u_{B1x} = u_{B1y} = 0$. Nejistotu geometrie snímače lze souhrnně vyjádřit podle následujícího vztahu:

$$u_{B1} = \sqrt{0^2 + 0^2 + (4,76)^2} = 4,76 \mu\text{m}/\text{m}$$

4.4.2 Nejistota geometrie kvality povrchu měřeného místa – u_{B2}

Tenzometr se lepí pomocí speciálního tenzometrického lepidla na povrch ocelové konstrukce. Při dodržení podmínek a pravidel lepení tenzometrů tohoto dokumentu je jedinou nejistotou z hlediska kvality povrchu případná nerovnost vzniklá přílišným broušením v jednom místě, kdy povrch není dokonale rovinný (viz Obr. 21).



Obr. 21 Nerovný povrch měřeného místa

Nerovnost povrchu se připouští velmi malá (max. $0,5^\circ$). Při uvažované maximální délce tenzometrického snímače řady Y 10 mm činí úbytek materiálu pouze 0,087 mm. Chyba měření poměrné deformace ε je pak o několik řádů níž než vlastní hodnoty měření. Proto lze považovat tuto nejistotu měření za rovnu nule, tedy $u_{B2} = 0 \mu\text{m}/\text{m}$.

4.4.3 Nejistota lepidla – u_{B3}

Nejistota lepidla se týká zejména plastických deformací, které vznikají z nedokonalých pružných vlastností lepení lepidla. Tyto plastické deformace jsou dány výrobcem (HBM) a jsou definovány pro první a třetí zatěžovací cyklus (po třetím cyklu se plastická deformace dále nemění). Plastická deformace je definována za následujících podmínek:

- referenční teplota 23°C ,
- poměrná deformace $\varepsilon = \pm 1000 \mu\text{m}/\text{m}$,
- tenzometr typu DMS - typ LY 11.

Definované nejistoty pro zatěžovací cykly jednotlivých lepidel jsou uvedeny v následující tabulce:

Lepidlo (HBM)	Poměrná statická deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Z 70 (první cyklus)	1,0
Z 70 (třetí cyklus)	0,5
X 60 (první cyklus)	2,5
X 60 (první cyklus)	1,0
EP 250 (první cyklus)	1,0
EP 250 (třetí cyklus)	1,0

Tabulka 1 Definované nejistoty měření pro zatěžovací cykly jednotlivých lepidel

Při použití tenzometrického lepidla Z 70 pro lepení tenzometrů a počet zatěžovacích vyšší než 3 (prakticky vždy), může celková nejistota měření z důvodu nejistoty lepidla dosáhnout maximálně součtové statické deformace podle předchozí tabulky, tedy

$$u_{B3} = 2,5 \mu\text{m}/\text{m}.$$

Nejistoty ohmického odporu tenzometru u_{B0} a nejistota k-faktoru snímače u_{BK} jsou dány výrobcem tenzometru.

Dílní nejistoty tenzometrických snímačů řady Y (dle HBM) jsou uvedeny v následující tabulce:

Veličina	Nejistota měření [%]
Ohmický odpor R [Ω]	$\pm 0,35$
k-faktor k [-]	$\pm 1,0$

Tabulka 2 Dílní nejistoty tenzometrických snímačů

Výsledná nejistota poměrné deformace ε je dána kromě uvedených parametrů také změnou odporu tenzometru. Nejistota změny odporu tenzometru je dána kalibrační hodnotou měřicího zesilovače (viz níže Nejistota měřicího zesilovače).

Předpokládáme-li, že na intervalu odchylky odporu tenzometru je rozdělení pravděpodobnosti odchylky výsledku měření pod tímto vlivem normální, redukuje se nejistota

vztažená k odporu součinitelem hodnoty 3. Pak lze výpočtem stanovit nejistotu ohmického odporu snímače následujícím způsobem:

$$u_{BO} = \frac{0,35 \%}{3} = \underline{0,12 \%}$$

Příklad:

Pro tenzometr o jmenovitém odporu $R = 120 \Omega$ bude konkrétní nejistota odporu $u_{BO} = 0,14 \Omega$.

Předpokládáme-li, že na intervalu odchylky K-faktoru snímače je rozdělení pravděpodobnosti odchylky výsledku měření pod tímto vlivem rovnoměrné, redukuje se nejistota vztažená ke k-faktoru součinitelem hodnoty 1,73. Pak lze výpočtem stanovit nejistotu k-faktoru snímače následujícím způsobem:

$$u_{BK} = \frac{1,0 \%}{1,73} = \underline{0,58 \%}$$

Příklad:

Pro tenzometr o jmenovité hodnotě k-faktoru $k_d = 2,08$ bude konkrétní nejistota odporu $u_{BK} = 0,0121$.

Jmenovitá hodnota odporu tenzometru R a k-faktoru k_d je definována pro každý tenzometr v jeho technické specifikaci. Pro potřeby této diplomové práce byly nejistoty ohmického odporu tenzometru u_{BO} a nejistota k-faktoru snímače u_{BK} vzhledem k jejich zanedbatelnému vlivu na výslednou hodnotu nejistoty měření zanedbány.

 Dehnungsmeßstreifen Strain Gauges Jauges d'extensométrie			Typ US-Type 10/120LY11	
Widerstand Resistance Résistance	120 [Ω]	+ 0.35 [%] - 0.35 [%]	Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gauge factor Coefficient de température du facteur k	104 ± 10 [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$] (-10 ... +45 °C)
k-Faktor Gauge factor Facteur k	2,08	± 1 [%]	Artikel Nr. Part No. No. de Réf.	1-LY11-10/120
Querempfindlichkeit Transverse Sensitivity Sensibilité transverse		-0.5 [%] - [%]	Folienlos Lot Lot de la feuille	A330/10
Temperaturkompensation: Angepaßt für Temperature Compensation: Compensated for Compensation de température: Compensation pour			Herstellungslos Batch Lot de fabrication	812000952/02
	$\alpha = 10.8$ [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]		Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an. All technical data in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number. Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jauge ainsi que le lot de fabrication.	
<input checked="" type="checkbox"/> Stahl Steel Acier <input type="checkbox"/> Alumi- nium <input type="checkbox"/> Sonstige Other Autre	Stückzahl Quantity Quantité: 10 <input type="checkbox"/> mit with avec <input type="checkbox"/> ohne without sans <input checked="" type="checkbox"/> Applikationshilfe Application aid Support d'aide à l'application			

Obr. 22 Jmenovité hodnoty odporu tenzometru a k-faktoru + další charakteristiky tenzometru uvedené na balení tenzometru

4.4.4 Nejistota teplotní deformace snímače – u_{B4}

Teplotní roztažnost a tomu odpovídající poměrná deformace je definována na každém balení tenzometrických snímačů. Poměrná deformace je vztažena na 1°C.

Měření byla prováděna v laboratoři, kde lze předpokládat teploty v rozmezí od 10°C do 40°C, čemuž odpovídá nejistota měření poměrné deformace ε v rozmezí ± 0 až $\pm 9 \mu\text{m}/\text{m}$. Za předpokladu, že rozdělení pravděpodobnosti odchylky výsledku měření je normální, redukuje se nejistota vztažená na teplotní deformace součinitelem hodnoty 3. Pak lze výpočtem stanovit nejistotu teplotní deformace tenzometru následujícím způsobem:

$$u_{B4} = \frac{9,0 \mu\text{m}/\text{m}}{3} = 3,0 \mu\text{m}/\text{m}$$

4.4.5 Nejistota příčné deformace tenzometru – u_{B5}

Příčná deformace je vyvolána kontrakcí z důvodu podélné deformace tenzometrů. Výrobce udává příčnou deformaci 0,1 % při referenční teplotě, nalepení tenzometrickým lepidlem Z 70 a použití tenzometrických snímačů řady Y. Nejistotu měření poměrné deformace v důsledku kontrakce tenzometru lze položit rovnu nule, tedy $u_{B5} = 0 \mu\text{m}/\text{m}$.

4.4.6 Nejistota kabelu propojujícího tenzometr s dynamickou měřicí ústřednou – u_{B6}

Pokud se pro propojení tenzometrů s dynamickou ústřednou použijí šestižílové stíněné kabely, umožňují tyto při plném zapojení kompenzovat změnu odporu kabelu v důsledku změny teploty kabelu. Kompenzaci provádí přímo dynamická měřicí ústředna. Při tomto zapojení je pak chyba měření poměrné deformace o několik řádů menší než vlastní měření a proto tuto nejistotu lze položit rovnu nule, tedy $u_{B6} = 0 \mu\text{m}/\text{m}$.

CABA1/...

6 wire cable

Special features



- 6 wire cable
- Length: 20 m or 100 m
- Low capacity
- High capacitive symmetry
- HBM color code
- 6x0.14 mm²
- PVC coating

Technical Data

Type		1-CABA1/20 ¹⁾	1-CABA1/100 ¹⁾
Length	m	20	100
Cable coating color	RAL	7001 (gray)	
Coating material	-	PVC	
Wire isolation	-	PE	
Number of wires	-	6	
Wire cross section	mm ²	0.14	
Wire resistance	mΩ/m	≤130	
Capacity	pF/m	≤82	
Shield	-	1	
Outer diameter	mm	5.4 ^{-0.3}	
Temperature range	°C [°F]	-30 ... +85 [-22 ... +185]	
Wire colors (HBM color code)	-	gray, black, white, blue, green, red	
Weight, approx.	kg	1	5

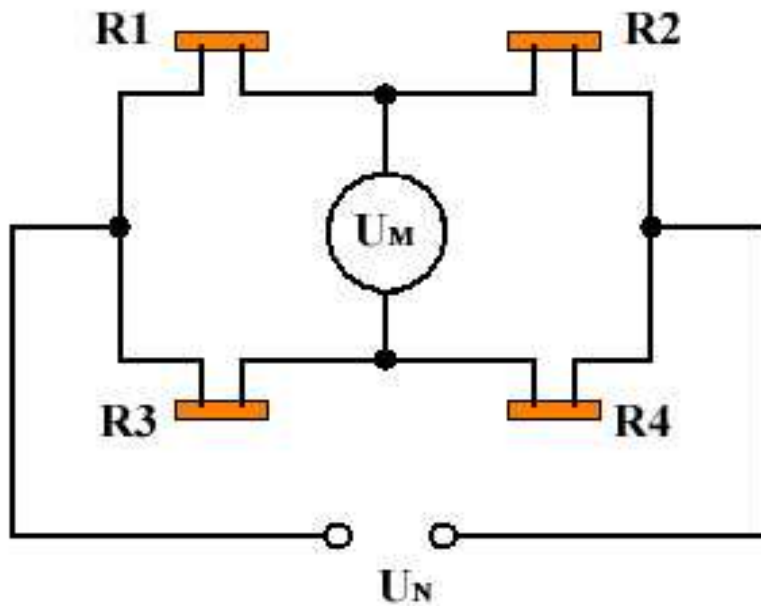
Obr. 23 Katalogový list stíněných šestižilových kabelů

4.4.7 Nejistota dynamické měřicí ústředny – u_{B7}

Nejistota dynamické měřicí ústředny je dána kalibračním listem, který obsahuje zjištěné hodnoty chyb, ze kterých je vyčíslena rozšířená nejistota u_{BR} dynamické měřicí ústředny a uveden koeficient rozšíření k . Nejistota dynamické měřicí ústředny se pak stanoví výpočtem podle následujícího vztahu:

$$u_{BD} = \frac{u_{BR}}{k}$$

Nejistota dynamické měřicí ústředny je vztažena k typu elektrického zapojení tenzometrů do plného Wheatstonova můstku.



Obr. 24 Schéma elektrického zapojení plného Wheatstonova můstku

- R₁.....odpor aktivního tenzometru,
- R₂.....odpor kompenzačního tenzometru,
- R₃.....odpor kompenzačního tenzometru,
- R₄ = R_x.....odpor aktivního tenzometru,
- U_Nreferenční napájecí napětí,
- U_M.....měřené napětí,
- ΔR.....změna odporu aktivního tenzometru.

Pro elektrické zapojení z Obr. 24 Schéma elektrického zapojení plného Wheatstonova můstku platí následující vztahy:

$$U_M = \frac{R_x}{R_3 + R_x} \times U_N - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_N$$

$$U_M = \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \times U_N$$

$$\frac{U_M}{U_N} = \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Za předpokladu, že platí

$$R_1 + \Delta R_1 \text{ a } R_4 + \Delta R_4 \Rightarrow \Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R$$

Lze do předchozího výrazu dosadit ΔR, pak

$$\frac{U_M}{U_N} = \frac{R_x + \Delta R}{R_3 + R_x + \Delta R} - \frac{R_2}{R_1 + \Delta R + R_2}$$

Podmínka vyváženého můstku (před začátkem měření):

$$R_1 \cdot R_x = R_3 \cdot R_2 \Rightarrow R_1 = R_x = R_3 = R_2 \dots R$$

Lze vyjádřit následující rovnici:

$$\frac{U_M}{U_N} = \frac{R + \Delta R}{R + R + \Delta R} - \frac{R}{R + \Delta R + R}$$

po úpravě:

$$\frac{U_M}{U_N} = \frac{\Delta R}{2R + \Delta R}$$

Pokud je můstek vyvážen, $\Delta R = 0$ a tím měřené napětí $U_M = 0$.

Pro vyjádření nejistoty dynamické měřicí ústředny do výpočtu celkové nejistoty měření je třeba převést závislost měřeného napětí na změnu odporu aktivního tenzometru úpravou předchozí rovnice do následujícího vztahu:

$$\Delta R = \frac{U_M \cdot 2R}{U_N - U_M}$$

Výše vyjádřenou změnu odporu tenzometru dosadíme do vztahu pro stanovení poměrné deformace

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)^{\frac{1}{k_d}} - 1$$

čímž obdržíme následující vztah:

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d}} - 1$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že nejistotu odporu tenzometru R_A není nutné uvažovat za předpokladů vyvážení Wheatstonova můstku před zahájením měření.

Vzhledem k tomu, že k hodnotě poměrné deformace ε je přistupováno jako k nepřímému měřené veličině, lze při stanovení výsledné standardní nejistoty typu B dynamické měřicí ústředny použít Gaussův zákon nejistot měření, definovaný následujícím způsobem:

$$u_{B7} = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_{xj}^2 \times u_{Bj}^2}$$

kde

A_{xj} parciální derivace poměrné deformace ε ,
 u_{Bj} nejistoty jednotlivých zdrojů (u_{BD} , u_{BK}).

Jednotlivé parciální derivace poměrné deformace ε lze vyjádřit následujícím způsobem:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial U_M} = \frac{1}{k_d} \cdot \left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d} - 1} \cdot \left(\frac{2 \cdot (U_N - U_M) + 2U_M}{(U_N - U_M)^2}\right)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial k} = \left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d}} \cdot \ln\left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right) \cdot \left(-\frac{1}{k_d^2}\right)$$

kde

k_dkonstanta tenzometru,
 U_Nkonstanta referenčního napájecího napětí,
 U_Mmaximální hodnota měřeného napětí $U_M = U_{Mmax}$.

Výsledný vztah pro určení nejistoty dynamické měřicí ústředny má pak následující tvar:

$$u_{B7} = \sqrt{\left[\frac{1}{k_d} \cdot \left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d} - 1} \cdot \left(\frac{2 \cdot (U_N - U_M) + 2U_M}{(U_N - U_M)^2}\right) \right]^2 \cdot u_{BD}^2 + \left[\left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d}} \cdot \ln\left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right) \cdot \left(-\frac{1}{k_d^2}\right) \right]^2 \cdot u_{BK}^2}$$

4.4.8 Nejistota kabelu propojujícího měřicí zesilovač s měřicím PC – u_{B8}

Řídicí jednotka dynamické měřicí ústředny převádí analogová data na digitální, která jsou dále přenášena do měřicího PC k dalšímu vyhodnocení pomocí GPIB sběrnice. Nejistota z hlediska přenosu dat (např. vlivem elektromagnetického rušení) je nepřijatelná. V případě, že by došlo k jakékoli kolizi v přenosu dat, je měření přerušeno a musí se opakovat. Z uvedeného je zřejmé, že tato nejistota měření je rovna nule, tedy $u_{B8} = 0 \mu\text{m/m}$.

4.4.9 Nejistota hardwaru měřicího PC – u_{B9}

Záznam má v měřicím PC pouze digitální podobu. Z toho důvodu se nejistota hardwaru měřicího PC neuvažuje, tedy $u_{B9} = 0 \mu\text{m/m}$.

4.4.10 Nejistota softwaru měřicího PC – u_{B10}

Software musí umožnit nastavení parametrů dynamické měřicí ústředny, sledování měření, zaznamenávání naměřených dat a provedení vyhodnocení. Nejistota měření z důvodu chybných algoritmů softwaru se neuvažuje, tedy $u_{B10} = 0 \mu\text{m/m}$. V případě výskytu hrubých chyb (chybné nastavení dynamické měřicí ústředny, kolize operačního systému, apod.) se musí nejprve tyto chyby odstranit a následně měření opakovat.

4.4.11 Výsledné stanovení nejistoty typu B

Výsledná standardní nejistota u_B typu B se stanoví přenosem a sloučením odhadnutých nejistot různého původu při použití zákona šíření nejistot.

Pro poměrnou deformaci ε platí následující vztah:

$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2 + u_{B7}^2 + u_{B8}^2 + u_{B9}^2 + u_{B10}^2}$$

Po dosazení výše stanovených hodnot jednotlivých nejistot obdržíme následující vztah:

$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{4,76^2 + 0^2 + 2,50^2 + 3,0^2 + 0^2 + 0^2 + u_{B7}^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2}$$

$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{37,9076 + u_{B7}^2}$$

Pro mechanické napětí σ platí analogický k předchozímu vztahu následující vztah:

$$u_{B\sigma} = E \cdot u_{B\varepsilon} \cdot 10^{-6} = E \times \sqrt{37,9076 + u_{B7}^2} \cdot 10^{-6}$$

Stanovení kombinované nejistoty měření

Sloučením výsledných standardních nejistot obou typů A a B dostaneme kombinovanou nejistotu měření pro poměrnou deformaci ε , respektive mechanické napětí σ ve tvaru:

$$u_y = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Stanovení rozšířené nejistoty měření

Rozšířená nejistota měření je součinem kombinované nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$, což při normálním rozdělení odpovídá pravděpodobnosti „pokrytí nejistot měření“ 95 %.

$$U = k \cdot u_y = 2 \cdot u_y$$

5. TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍHO VZORKU

Pro ověření teoretických předpokladů odvozených v kapitole 4 a pro odvození vztahu nejistoty měření způsobené geometrií tenzometru – měření α natočení = úhel natočení tenzometru, bylo provedeno tenzometrické měření zkušebních vzorků. Zkušebním vzorkem je ocelová tyč (S235) podle obrázku Obr. 25.



Obr. 25 Zkušební tyč

Geometrie zkušební tyče:

Délka vzorku l [mm] 300,0 mm

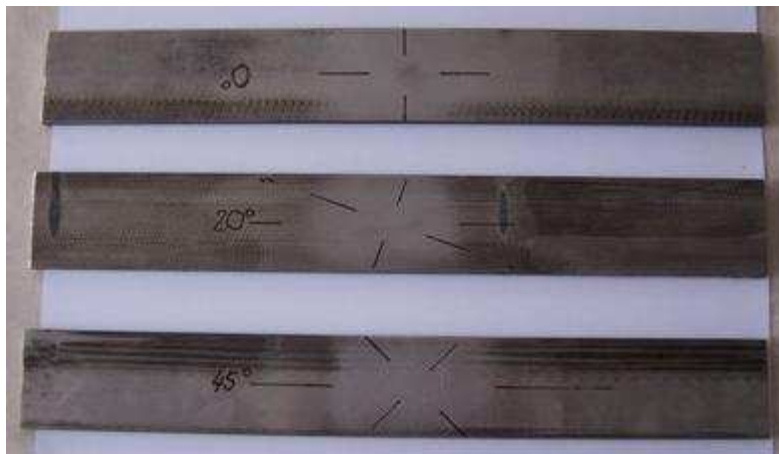
Výška vzorku h [mm] 40,2 mm

Tloušťka vzorku [mm] 5,0 mm

Plocha průřezu [mm^2] 201,0 mm^2

5.1 Příprava měření

K měření byly připraveny 3 vzorky, na které byly vyneseny osové vynášecí kříže.



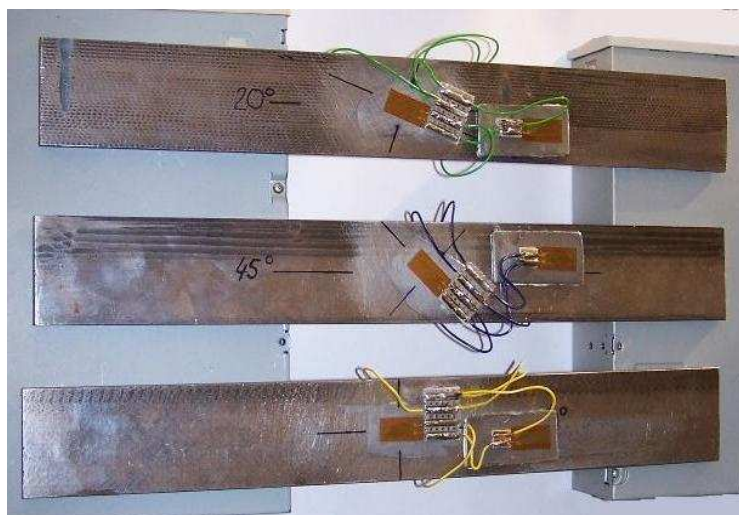
Obr. 26 Připravené vzorky s vnesenými osovými kříži

Způsobem podle kapitoly 3 byly na zkušební vzorky nalepeny tenzometry pod různými úhly natočení α .

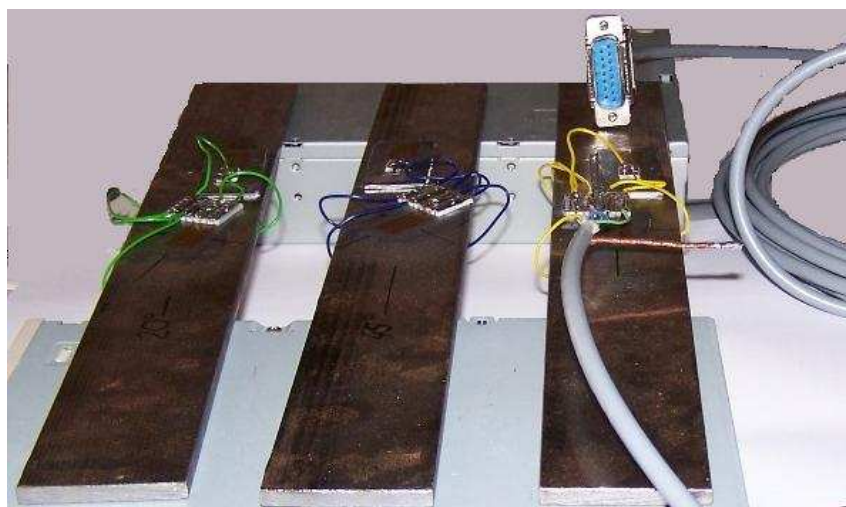
Zkušební vzorek	Úhel natočení tenzometru α [°]
vzorek č. 1	0°
vzorek č. 2	45°
vzorek č. 3	20°

Tabulka 3 Úhly natočení tenzometrů na jednotlivých vzorcích

Vzorky byly připraveny k provedení měření, tenzometry byly propojeny přes svorkovnice a přes tyto svorkovnice byl připojen propojovací kabel pro připojení vzorku k dynamické měřicí ústředně. Na kabel byl podle technických listů dynamické měřicí ústředny připojen konektor. Následně bylo provedeno ověření zapojení – byla změřena hodnota odporu tenzometrů, ověřena vodivost jednotlivých pájených spojů a správnost zapojení na jednotlivé póly konektoru. Vzorky připravené k měření jsou zobrazeny na Obr. 27 a Obr. 28.



Obr. 27 Hotové vzorky, nalepené tenzometry zapojené přes svorkovnice do plného měřícího můstku



Obr. 28 Připojení konektoru ke vzorkům

Připravené vzorky byly následně zatěžovány na dynamickém zkušebním stavu INOVA Dopravní fakulty Jana Pernera, na kterém byla provedena statická i dynamická zkouška a byl proveden záznam zatěžovacích sil v závislosti na čase zatěžování. Zkušební vzorky byly připojeny na dynamickou měřicí ústřednu DMC HBM, pomocí které byl proveden záznam naměřených hodnot, a to napětí v závislosti na čase zatěžování.

5.2 Nastavení dynamické měřicí ústředny:

Dynamická měřicí ústředna byla nejprve nastavena pro snímání hodnot. Bylo třeba stanovit závislost

$$\frac{U_M}{U_N} [mV/V] \cong \sigma [MPa]$$

když

$$U_M = 1,25 \text{ mV} \text{ a } U_N = 2,5 \text{ V}$$

pak

$$\frac{U_M}{U_N} = 0,5 \text{ mV/V}$$

$k_d = 2,08$ (z technických listů tenzometrů)

dosazením do dříve odvozeného vztahu

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d}} - 1$$

pak poměr napětí odpovídá deformaci ε

$$\varepsilon = 4,8204 \cdot 10^{-4}$$

Z Hookova zákona $\sigma = \varepsilon \times E$ a hodnoty modulu pružnosti oceli $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

pak poměr napětí odpovídá napětí σ

$$\sigma = 101,2288 \text{ MPa}$$

Výsledné nastavení dynamické měřicí ústředny odpovídá vztahu

$$0,5 \text{ mV/V} \approx 101,2288 \text{ MPa}$$

5.3 Statická zatěžovací zkouška

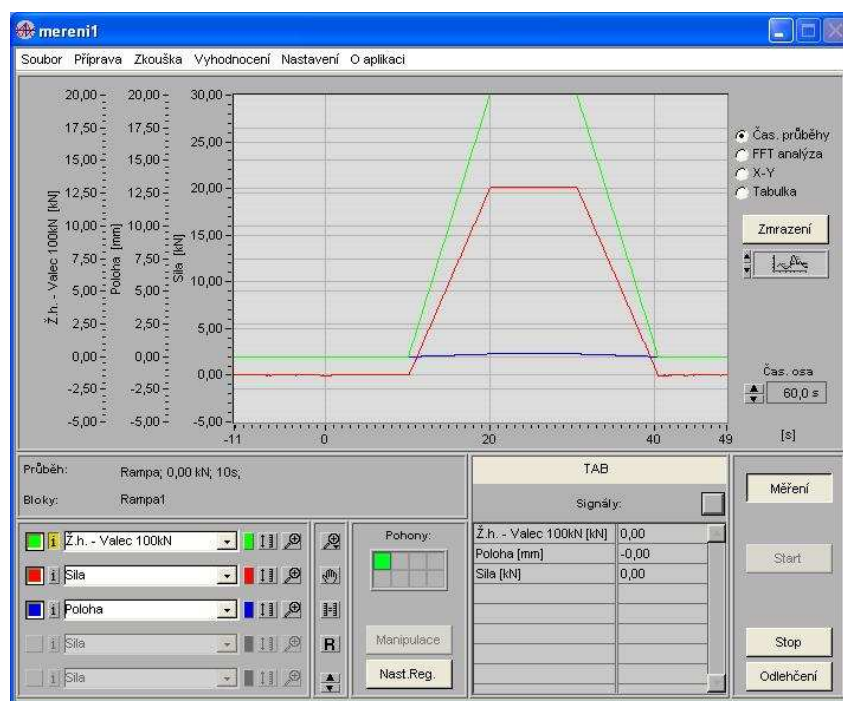
Nastavení zatěžovacího stavu INOVA

Pro statickou zkoušku byl zatěžovací stav nastaven podle grafu Graf 1, při požadované hodnotě napětí vyvolané na zkušební tyči $\sigma = 100 \text{ MPa}$, při známé ploše průřezu zkušební vzorku $S = 201 \text{ mm}^2$ byl vzorek zatěžován maximální silou $F = 20,1 \text{ kN}$. Vzorkování bylo nastaveno na 75ms. Při testech byly všechny tři vzorky zatěžovány stejným způsobem.



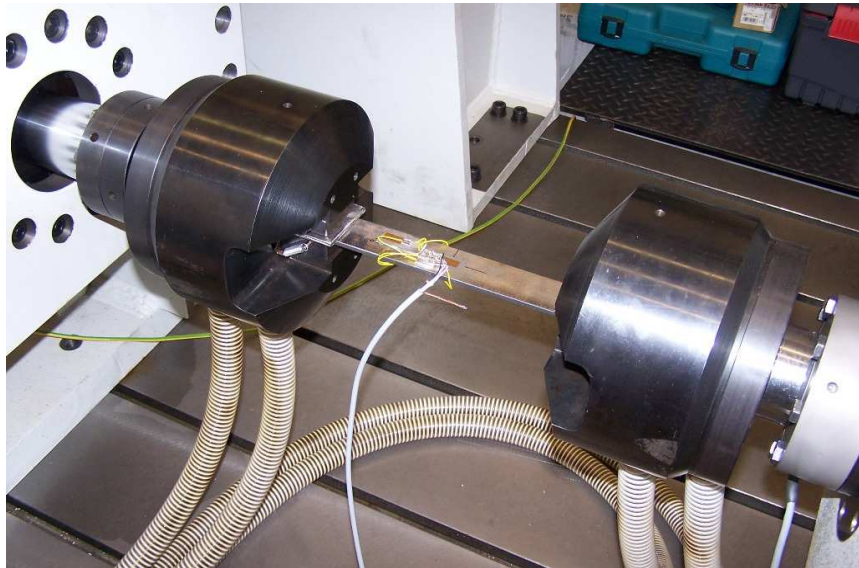
Graf 1 Statická zatěžovací zkouška – zatížení stavem INOVA

Průběh měření zaznamenaný softwarem obsluhujícím zatěžovací stav je uveden na Obr. 29 Záznam měření INOVA.



Obr. 29 Záznam měření INOVA

Po zapojení a nastavení dynamické měřicí ústředny a zatěžovacího stavu byly postupně jednotlivé vzorky upevněny do čelistí zatěžovacího stavu (viz Obr. 30) a provedena zatěžovací zkouška.



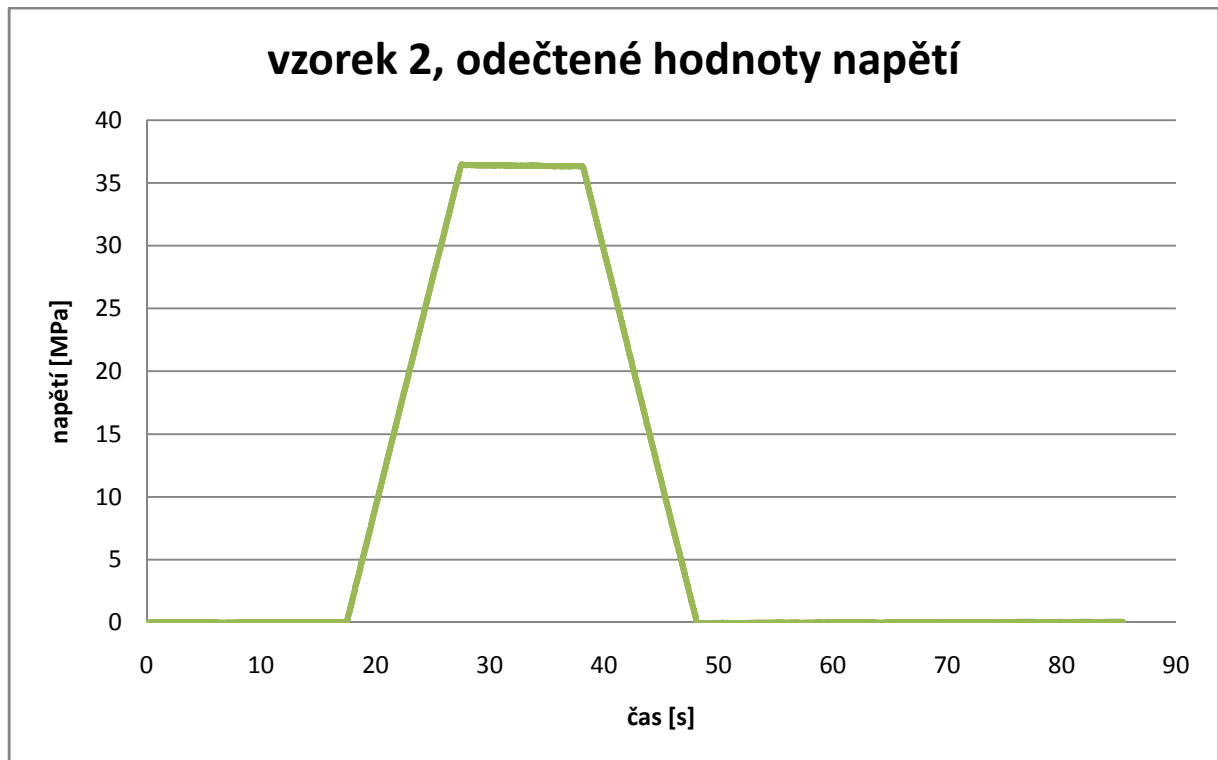
Obr. 30 Vzorek upnutý v čelistech zatěžovacího stavu a připojen na dynamickou měřící ústřednu, stav před počátkem měření

Hodnoty odečtené dynamickou měřící ústřednou (HBM DMC Plus) a softwarem (HBM Catman) zatěžovacího stavu byly zaznamenány do textových souborů, následně byly exportovány do tabulkového procesoru, kde byly naměřené hodnoty zpracovány pomocí grafů. Naměřené hodnoty jsou přílohou diplomové práce na samostatném CD.

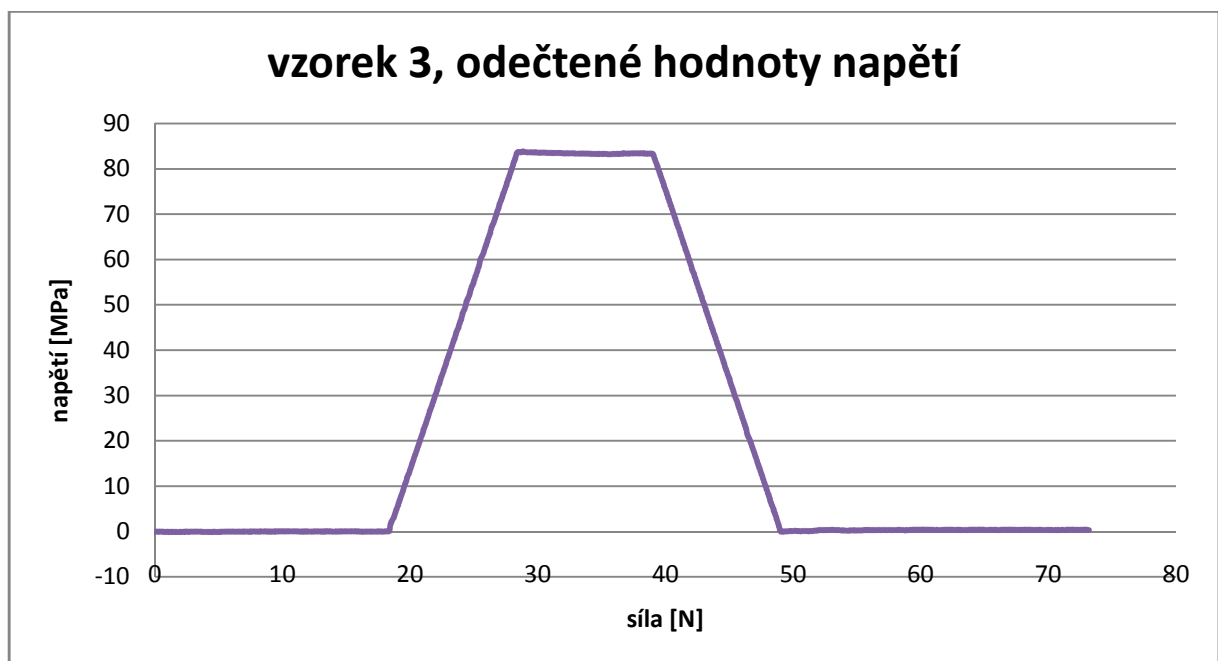
Výsledky měření



Graf 2 VZOREK 1, statická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM



Graf 3 VZOREK 2, statická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM



Graf 4 VZOREK 3, statická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM

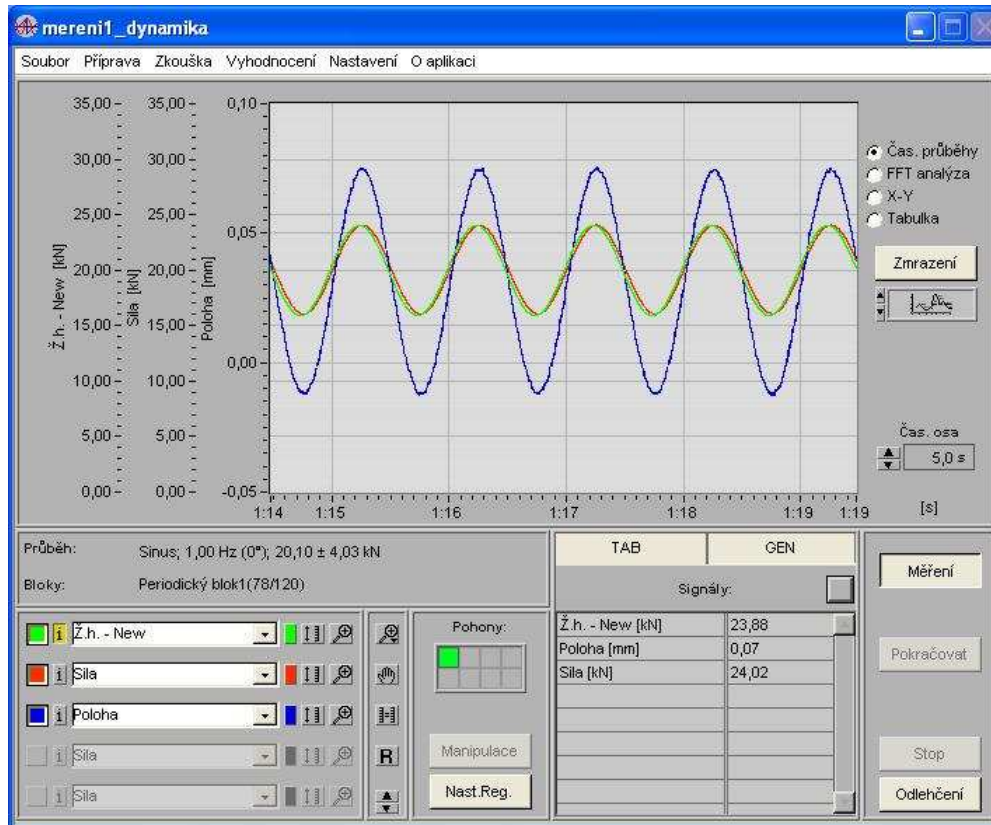
5.4 Dynamická zatěžovací zkouška

Nastavení zatěžovacího stavu INOVA

Pro dynamickou zkoušku byl zatěžovací stav nastaven pro požadovanou střední hodnotu napětí vyvolanou na zkušební tyči $\sigma = 100 \text{ MPa}$ s rozkmitem $\pm 20 \text{ MPa}$. Při známé

ploše průřezu zkušební vzorku $S = 201 \text{ mm}^2$ byly vzorky zatěžovány silou $F = 15,975 - 24,025 \text{ kN}$. Vzorkování bylo nastaveno na 2ms.

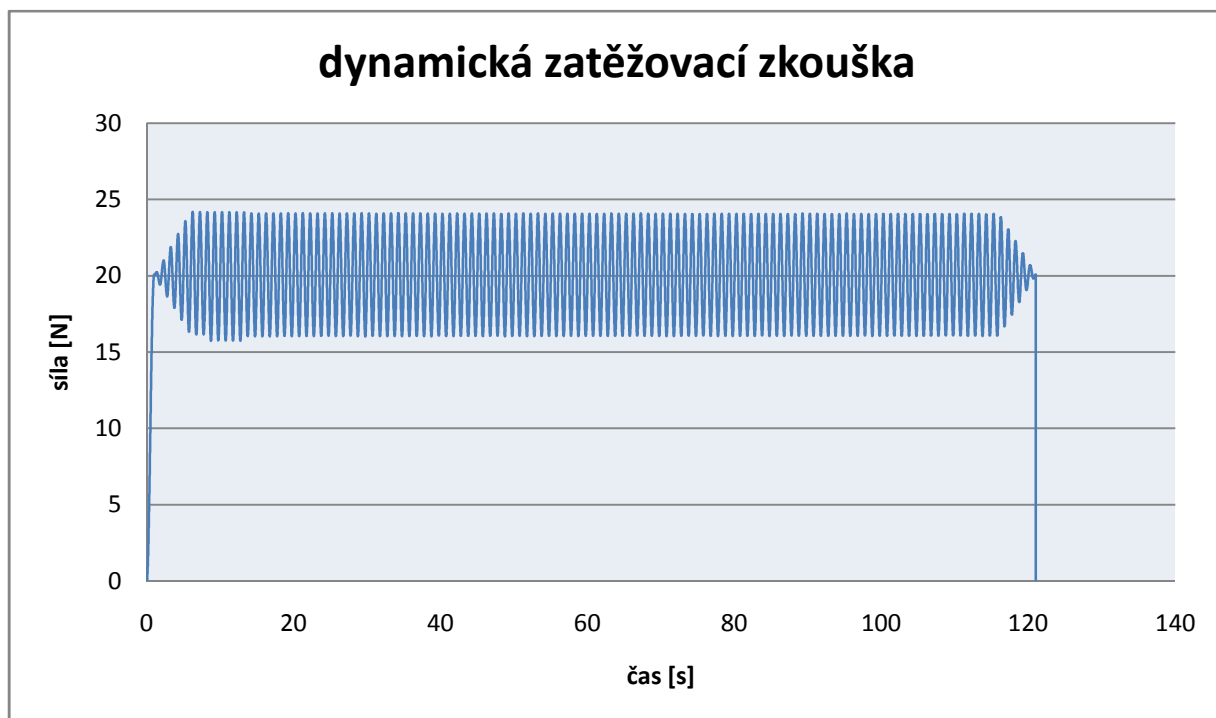
Průběh měření zaznamenaný softwarem obsluhujícím zatěžovací stav je uveden na Obr. 31.



Obr. 31 Záznam měření INOVA

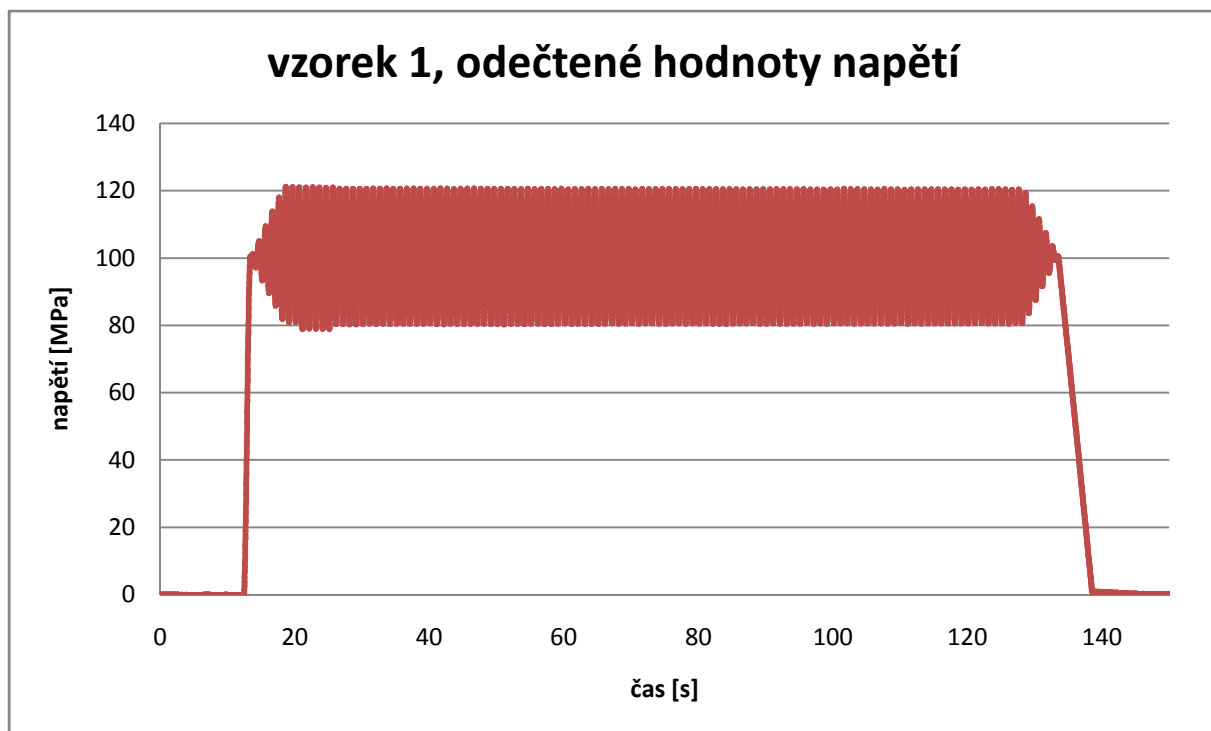
Po zapojení a nastavení dynamické měřicí ústředny a zatěžovacího stavu byl vzorek č. 1 upevněn do čelistí zatěžovacího stavu (viz Obr. 30, statická zatěžovací zkouška) a byla provedena dynamické zatěžovací zkouška.

Hodnoty odečtené dynamickou měřicí ústřednou a softwarem zatěžovacího stavu byly zaznamenány do textových souborů, následně byly exportovány do tabulkového procesoru, kde byly naměřené hodnoty zpracovány pomocí grafů. Naměřené hodnoty jsou přílohou diplomové práce na samostatném CD.



Graf 5 VZOREK 1, dynamická zkouška, průběh zatěžovací síly vyvozené zat. Stavem INOVA

Výsledek měření

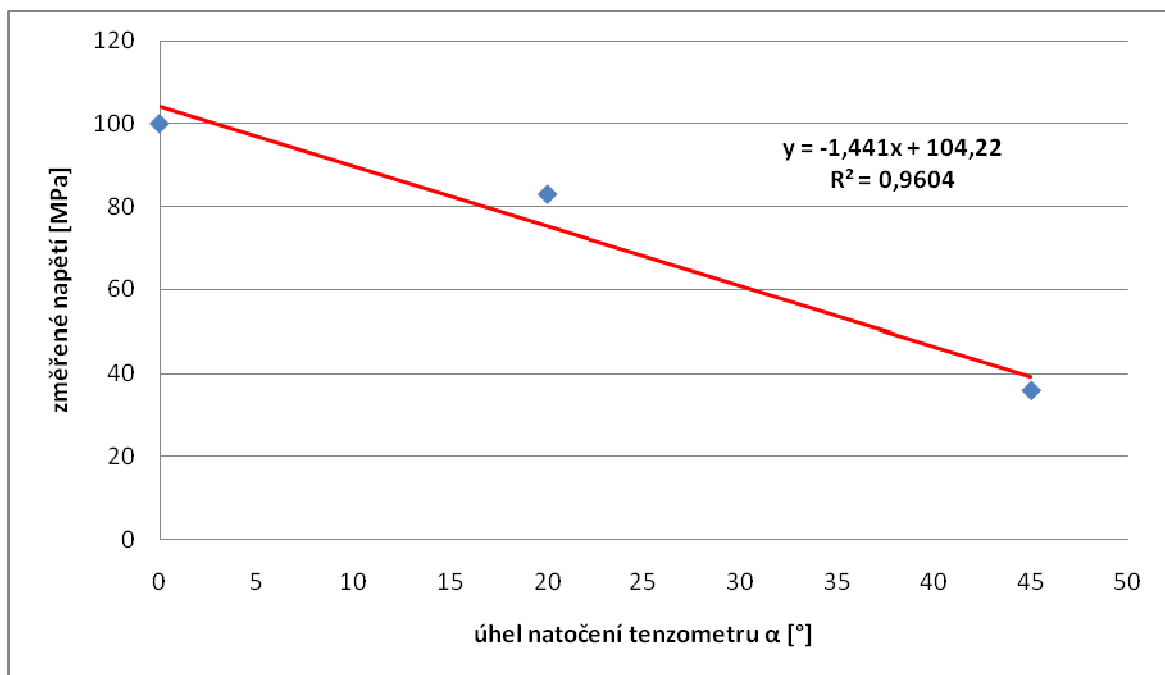


Graf 6 VZOREK 1, dynamická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM

6. STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ Z HLEDISKA GEOMETRIE TENZOMETRU DANÉ NATOČENÍM O ÚHEL α

Na základě naměřených hodnot (kapitola 5.3) byla stanovena hodnota nejistoty geometrie tenzometru $u_{B1\alpha}$ a to pro definovanou přípustnou míru nejistoty natočení ($\alpha = 5^\circ$). Získaná hodnota nejistoty měření $u_{B1\alpha}$ byla následně použita v kapitole 4 pro odvození teoretického vztahu celkové nejistoty měření.

Závislost napětí σ naměřené na zkušebních vzorcích a úhlu natočení tenzometru byla vynesena do grafu Graf 7. Následně byla pomocí regresní analýzy odvozena rovnice závislosti úhlu natočení tenzometru na změřené hodnotě napětí.



Graf 7 Závislost úhlu natočení tenzometru na změřené hodnotě napětí

Závislost úhlu natočení α na změřené hodnotě napětí na zkušebním vzorku udává vzorec:

$$\sigma = -1,441\alpha + 104,2$$

Předchozí vztah lze při znalosti Hookova zákona upravit na vztah vyjadřující závislost úhlu natočení α na poměrné deformaci ε (E ... Youngův modul pružnosti):

$$\varepsilon = \frac{-1,44\alpha + 104,2}{E}$$

Pro přehlednost byly použité hodnoty včetně hodnot vypočtených uvedeny v tabulce.

zatěžovací síla F [kN]	číslo vzorku	úhel natočení tenzometru α [°]	změřené napětí na zkušebních vzorcích [MPa]	modul pružnosti E	poměrná deformace ε
20	1	0	100	210000	4,7619e-4
	2	45	36		
	3	20	83		
		5	97		4,6190e-4

Tabulka 4 Přehled hodnot použitých při odvození rovnice závislosti úhlu natočení tenzometru na napětí změřeném na zkušebním tělese.

Nejistota měření je daná rozdílem hodnoty měření při natočení 0° a 5° tj.:

$$\varepsilon_0 - \varepsilon_5 = 4,7619 \cdot 10^{-4} - 4,6190 \cdot 10^{-4} = 1,429 \cdot 10^{-5}$$

7. VYJÁDŘENÍ HODNOTY NEJISTOTY MĚŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍ DYNAMICKÉ ZKOUŠKY ZKUŠEBNÍHO VZORKU

7.1 Vyčíslení jednotlivých odvozených nejistot měření

Maximální mechanické napětí: $\sigma = 121,104 \text{ MPa}$

Youngův modul pružnosti: $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

Maximální mechanická poměrná deformace: $\varepsilon = \sigma/E = 5,77 \cdot 10^{-4}$

Maximální odchylka úhlu nalepení tenzometru : $\alpha = 5^\circ$

7.1.1 Nejistota geometrie tenzometru:

Zkušební vzorek (prutový prvek) byl namáhán pouze rovnoměrným, nejistota geometrie tenzometru z hlediska posunutí x, y je **nulová**, a to z důvodu rovnoměrného rozložení napětí po ploše průřezu.

Nejistota geometrie tenzometru pro poměrnou deformaci z hlediska natočení o úhel α byla stanovena analyticky $u_{B1\alpha} = 4,76 \text{ } \mu\text{m/m}$

Celková nejistota z geometrie snímače

$$u_{B1} = 4,76 \text{ } \mu\text{m/m}$$

7.1.2 Nejistota geometrie kvality povrchu měřeného místa:

$$u_{B2} = 0 \text{ } \mu\text{m/m}$$

7.1.3 Nejistota lepidla:

$$u_{B3} = 2,5 \text{ } \mu\text{m/m}$$

7.1.4 Nejistota teplotní deformace snímače:

$$u_{B4} = 3,0 \text{ } \mu\text{m/m}$$

7.1.5 Nejistota příčné deformace tenzometru:

$$u_{B5} = 0,0 \text{ } \mu\text{m/m}$$

7.1.6 Nejistota kabelu propojujícího tenzometr s dynamickou měřicí ústřednu:

$$u_{B6} = 0,0 \text{ } \mu\text{m/m}$$

7.1.7 Nejistota dynamické měřicí ústředny:

referenční napájecí napětí: $U_N = 2,5 \text{ V}$

maximální hodnota měřeného napětí:

nastaveno: $101,2288 \text{ MPa} \sim 0,5 \text{ mV/V} \sim 1,25 \text{ mV} / 2,5 \text{ V}$

$$U_{M(120 \text{ MPa})} = 1,4817 \text{ mV}$$

$$u_{BO} = 0,14 \text{ } \Omega$$

$u_{BR} = 0,000053 \text{ mV/V}$ – (hodnota získaná z kalibračního listu dynamické měřicí ústředny, která je přílohou této diplomové práce)

$$u_{BD} = 0,0000265 \text{ mV/V} \quad u_{BD} = u_{BR} / k \quad k=2$$

$$u_{BK} = 0,0121$$

$$k_d = 2,08$$

Výpočet nejistoty u_{B7} :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial U_M} = \frac{1}{k_d} \cdot \left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d} - 1} \cdot \left(\frac{2 \cdot (U_N - U_M) + 2U_M}{(U_N - U_M)^2}\right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial U_M} &= \frac{1}{2,08} \times \left(1 + \frac{2 \times 1,4817 \cdot 10^{-3}}{2,5 - 1,4817 \cdot 10^{-3}}\right)^{\frac{1}{2,08} - 1} \\ &\times \left(\frac{2 \times (2,5 - 1,4817 \cdot 10^{-3}) + 2 \times 1,4817 \cdot 10^{-3}}{(2,5 - 1,4817 \cdot 10^{-3})^2}\right) = \mathbf{0,3848} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial k_d} = \left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right)^{\frac{1}{k_d}} \cdot \ln\left(1 + \frac{2U_M}{U_N - U_M}\right) \cdot \left(-\frac{1}{k_d^2}\right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_d} &= \left(1 + \frac{2 \times 1,4817 \cdot 10^{-3}}{2,5 - 1,4817 \cdot 10^{-3}}\right)^{\frac{1}{2,08}} \\ &\cdot \ln\left(1 + \frac{2 \times 1,4817 \cdot 10^{-3}}{2,5 - 1,4817 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot \left(-\frac{1}{2,08^2}\right) = \mathbf{2,741 \cdot 10^{-4}} \end{aligned}$$

$$u_{B7} = \sqrt{(0,3848)^2 \cdot (0,0000265)^2 + (2,741 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,0121)^2} = 1,0723 \cdot 10^{-5}$$

$$u_{B7} = 10,723 \text{ } \mu\text{m/m}$$

7.1.8 Nejistota kabelu propojujícího měřicí zesilovač s měřicím PC:

$$u_{B8} = 0,0 \mu\text{m/m}$$

7.1.9 Nejistota hardwaru měřicího PC:

$$u_{B9} = 0,0 \mu\text{m/m}$$

7.1.10 Nejistota softwaru měřicího PC:

$$u_{B10} = 0,0 \mu\text{m/m}$$

7.2 Výsledné stanovení nejistoty měření typu B:

Pro **poměrnou deformaci** ε platí vztah pro nejistotu měření typu B:

$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2 + u_{B7}^2 + u_{B8}^2 + u_{B9}^2 + u_{B10}^2}$$

$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{4,76^2 + 0^2 + 2,50^2 + 3,0^2 + 0^2 + 0^2 + 10,723^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2} = 12,36 \mu\text{m/m}$$

$$\boxed{u_{B\varepsilon} = 12,36 \mu\text{m/m}}$$

Pro **mechanické napětí** σ platí vztah pro nejistotu měření typu B:

$$\boxed{u_{B\sigma} = E \cdot u_{B\varepsilon} \cdot 10^{-6} = 2,596 \text{ MPa}}$$

$$\boxed{u_{B\sigma} = 2,596 \text{ MPa}}$$

Standardní rozšířená nejistota měření:

$$U_{\sigma} = k \cdot u_{B\sigma}$$

$k = 2$ 95% ... výskyt hodnoty s pravděpodobností 95%

$$\boxed{U_{\sigma} = 2 \cdot 2,596 = 5,192 \text{ MPa}}$$

$$\boxed{U_{\sigma} = 5,192 \text{ MPa}}$$

8. ZÁVĚR

Náplní diplomová práce bylo stanovení teoretické hodnoty nejistoty měření plného Wheatstoneova tenzometrického můstku. Po obecném úvodu zabývajícím se technickým měřením byla rozebrána problematika tenzometrických můstků se zaměřením na plný Wheatstoneův tenzometrický můstek. Dále byla rozebrána problematika měření stavebních konstrukcí, předpoklady, podmínky, způsob měření a vyhodnocení naměřených dat. V následující kapitole byl odvozen teoretický vztah pro stanovení teoretické hodnoty nejistoty měření typu B. Nejistota typu A je nejistotou, kterou v první řadě ovlivňuje měření samotné, s počtem měření klesá, a proto se týká konkrétního měření stavební konstrukce a nebylo třeba se jí v daném případě podrobněji zabývat a vyčíslovat ji, když prvořadým úkolem bylo odvození teoretického vztahu pro nejistotu typu B pro dané měření a zapojení tenzometrů. Stanovení hodnoty nejistoty měření s ohledem na geometrii tenzometru – úhel natočení tenzometru α , bylo provedeno analyticky, na základě výsledků měření. Vrcholem čtvrté kapitoly bylo odvození teoretického vzorce nejistoty měření u_B . V páté kapitole bylo provedeno vyhodnocení měření zkušebního vzorku včetně zpracování naměřených dat do grafů. V sedmé kapitole byly vyčísleny hodnoty nejistoty měření zkušebního vzorku – ocelového prutu a to pro poměrnou deformaci a mechanické napětí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FICKER, T.: *Tenzometrie stavebních konstrukcí*, Vysoké učení technické v Brně ISBN 80-214-0483-3, Brno 1992.
- [2] KOPECKÝ, J.: *Experimentální ověřování konstrukcí*, Vysoké učení technické v Brně, ISBN 55-63584, Brno 1984.
- [3] HOFFMANN, K.: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. HBM GmbH Darmstadt, 2000.
- [4] *Technický předpis metrologický TPM 0051-93*. Slovenský metrologický ústav Bratislava, 1993.
- [5] CULEK, B.: *Tenzometrické měření ocelových konstrukcí*, Zkušební laboratoř AL DFJP, Univerzita Pardubice, Pardubice 2007.
- [6] Measurement [on-line]. Dostupné z URL: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Measurement>> [cit. 2009-09-10]
- [7] Wheatstone bridge [on-line]. Dostupné z URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge> [cit. 2009-10-12]
- [8] Signál a jeho zpracování [on-line]. Dostupné z URL: <<http://files.ujephelp.webnode.com/200000017-e7474e8418/Signal.pdf>> [cit. 2010-08-15]
- [9] HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, HBP měřící technika [on-line]. Dostupné z URL: <<http://www.hbm.cz/>> [cit. 2010-09-01]
- [10] Měřící technika jako součást automatizační techniky, měřící řetězec [on-line]. Dostupné z URL: <http://web.vscht.cz/kadleck/archiv/mrt_fpbt/prednasky/6-FPBT06-Mereni_uvod.pdf> [cit. 2009-10-01]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázka determinovaného periodického signálu	14
Obr. 2 Ukázka vzorkování signálu	15
Obr. 3 Schéma měřicího můstku	17
Obr. 4 Wheatstoneův můstek	18
Obr. 5 Schéma měřicího řetězce	22
Obr. 6 Schéma tenzometru	23
Obr. 7 Ukázka fóliových tenzometrů	23
Obr. 8 Schéma principu fungování fóliového tenzometru	24
Obr. 9 Ukázka dynamické měřicí ústředny (MGC Plus firmy HBM)	27
Obr. 10 Příklad čistícího a odmašťovacího prostředku	30
Obr. 11 Příklad čistícího a odmašťovacího prostředku	31
Obr. 12 Krycí a ochranné prostředky HBM	31
Obr. 13 Zapojení dvou aktivních a dvou kompenzačních tenzometrů do plného můstku.	32
Obr. 14 Katalogový list tenzometrických snímačů 10/120LY11	38
Obr. 15 Umisťovací kříž tenzometru	39
Obr. 16 Horizontální posunutí tenzometru	39
Obr. 17 Vertikální posunutí tenzometru	39
Obr. 18 Úhel natočení tenzometru	40
Obr. 19 Strmost změny deformace vzhledem k neutrální ose	41
Obr. 20 Konstantní deformace v konstantní vzdálenosti od neutrální osy	42
Obr. 21 Nerovný povrch měřeného místa	43
Obr. 22 Jmenovité hodnoty odporu tenzometru a k-faktoru + další charakteristiky tenzometru uvedené na balení tenzometru	45
Obr. 23 Katalogový list stíněných šestižilových kabelů	47
Obr. 24 Schéma elektrického zapojení plného Wheatstonova můstku	48
Obr. 25 Zkušební tyč	53
Obr. 26 Připravené vzorky s vnesenými osovými kříži	53
Obr. 27 Hotové vzorky, nalepené tenzometry zapojené přes svorkovnice do plného měřicího můstku	54
Obr. 28 Připojení konektoru ke vzorkům	54
Obr. 29 Záznam měření INOVA	56
Obr. 30 Vzorek upnutý v čelistech zatěžovacího stavu a připojen na dynamickou měřicí ústřednu, stav před počátkem měření	57
Obr. 31 Záznam měření INOVA	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Definované nejistoty měření pro zatěžovací cykly jednotlivých lepidel	44
Tabulka 2	Dílčí nejistoty tenzometrických snímačů	44
Tabulka 3	Úhly natočení tenzometrů na jednotlivých vzorcích.....	54
Tabulka 4	Přehled hodnot použitých při odvození rovnice závislosti úhlu natočení tenzometru na napětí změřeném na zkušebním tělese.	62

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Statická zatěžovací zkouška – zatížení stavem INOVA	56
Graf 2 VZOREK 1, statická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM.....	57
Graf 3 VZOREK 2, statická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM.....	58
Graf 4 VZOREK 3, statická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM.....	58
Graf 5 VZOREK 1, dynamická zkouška, průběh zatěžovací síly vyvozené zat. Stavem INOVA	60
Graf 6 VZOREK 1, dynamická zkouška, odečtené hodnoty napětí DMC HBM	60
Graf 7 Závislost úhlu natočení tenzometru na změřené hodnotě napětí	61



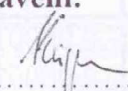
ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT

Laboratoře primární metrologie
V Botanice 4, 150 72 Praha 5

KALIBRAČNÍ LIST č. 8011-KL-F091-05

Datum vystavení: 17. srpen 2005

List 1 z 12 listů


.....
Ing. Petr Kašpar

vedoucí oddělení síly a vážicích zařízení



Zadavatel: Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra dopravních prostředků
Studentská 95
532 10 Pardubice

Měřidlo: Měřicí zesilovač
Typ měřicího zesilovače: DMC plus
Výrobní číslo: D419295A
Kalibrovaný rozsah: 0,1 mV/V až 2,5 mV/V
Výrobce: Hottinger Baldwin Messtechnik, GmbH

Použité etalony: kalibrátor K3607
Typ: K3607
Výrobní číslo: 001
Výrobce: Hottinger Baldwin Messtechnik, GmbH
Číslo kalibračního listu: 8011-KL-F090-05

Metoda měření:
Kalibrace byla provedena podle metodiky ČMI č. 801-MP-C107-02.

Výsledek kalibrace:
Kalibrace je provedena vystavením tohoto kalibračního listu a nalepením kalibrační značky žluté barvy s logem ČMI.

Dne: 8.8.2005

Kalibraci provedl: 
Ing. Chlumský

1. Referenční hodnoty měřicího zesilovače DV 55, v.č 5645, vstup 1/1

1.1. Polarita výstupního signálu záporná

Údaj kalibrátoru K3607 V_K	Skutečný výstupní signál K3607 V_{Ks}	Střední hodnota údajů DMCplus V_Z	Odchylka indikace měřicího zesilovače DMCplus		Rozšířená nejistota kalibrace měřicího zesilovače DMCplus	
			absolutní	relativní	absolutní	relativní
			f_q	q	U	W
mV/V	mV/V		mV/V	%	mV/V	%
0,05	-0,049998	-0,049935	0,000063	-0,13	0,000028	0,04
0,1	-0,099996	-0,099926	0,000070	-0,070	0,000028	0,018
0,2	-0,199994	-0,199868	0,000126	-0,063	0,000047	0,012
0,4	-0,399994	-0,399790	0,000204	-0,051	0,000049	0,005
0,6	-0,599995	-0,599790	0,000205	-0,034	0,000057	0,004
0,8	-0,799994	-0,799823	0,000171	-0,021	0,000050	0,003
1,0	-0,999992	-0,999848	0,000144	-0,014	0,000045	0,002
1,2	-1,199988	-1,199872	0,000117	-0,010	0,000041	0,0019
1,4	-1,399984	-1,399850	0,000134	-0,010	0,000047	0,0017
1,6	-1,599980	-1,599808	0,000172	-0,011	0,000038	0,0012
1,8	-1,799978	-1,799778	0,000199	-0,011	0,000067	0,0019
2,0	-1,999977	-1,999737	0,000241	-0,012	0,000075	0,0016
2,5	-2,499971	-2,500117	-0,000146	0,0058	0,000039	0,0008

Údaje pro knihovnickou databázi

Název práce	Stanovení teoretické hodnoty nejistoty měření tenzometrického plného Wheatstoneova můstku
Jméno autora	Bc. Miroslav Vohlídal
Obor	Dopravní inženýrství a spoje
Rok obhajoby	2011
Vedoucí práce	doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.
Anotace	Tato diplomová práce se zabývá stanovením teoretické hodnoty nejistoty měření plného tenzometrického Wheatstoneova můstku. Teoretické předpoklady jsou ověřeny praktickým měřením, výsledky měření a porovnání je uvedeno v závěru práce.
Klíčová slova	měření, měřicí aparatura, tenzometr, plný tenzometrický Wheatstoneův můstek, nejistoty měření, standardní rozšířená nejistota měření