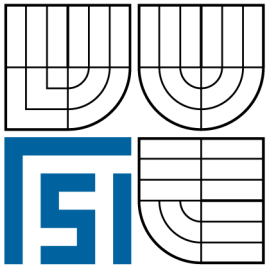


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH ZKOUŠEK

METHODS OF DATA PROCESSING FROM FLIGHT TESTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN KOZELSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. IVO JEBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2007



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2007/08

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Kozelský Martin

kteřý/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Metody zpracování dat z letových zkoušek**

v anglickém jazyce:

### **Methods of Data Processing from Flight Tests**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Orientace v problému letových měření.

Stanovení metod zpracování naměřených dat pro různé typy letových zkoušek.

Cíle bakalářské práce:

Cílem je zvládnout orientaci v problematice letových měření v návaznosti na moderní měřicí přístroje a v této souvislosti zpracovat popis možných matematických metod k vyhodnocení takto získaných dat.

Seznam odborné literatury:

[1] Meloun M., Militký J.: Statistické zpracování experimentálních dat, Praha 1995

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

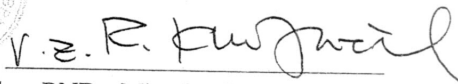
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 26.11.2007

L.S.



prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.  
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## Anotace

Přehled moderních přístrojů pro měření základních a dalších důležitých dat z letových zkoušek a jejich zpracování pomocí určení chyb a přesnosti přístrojů. V této práci jsou popsány principy a funkce používaných přístrojů a dále jsou v práci pospany chyby, které se při měření vyskytují a musí se započítávat do naměřených hodnot.

## Annotation

Summary of modern measuring instruments for measure basic and others important data from flight test. Processing through the use of definition of errors and accuracies of measuring instrument.

The principles and function of used measuring instruments are described in this work. The errors, which are participate at mistakes are described too. These errors must include with flight test data.

## Klíčová slova

základní rozdělení letových zkoušek, Přístroje pro měření základních veličin, Tenzometrické odporové snímače, Měřicí ústředny, Druhy chyb měření, Mezní hodnoty chyb, Přesnost přístrojů.

## Keywords

Basic partition of flight test, Measuring instruments of basic values, Tensiometer resistive sensors, Central measuring station, Types of measuring errors, Limiting value of errors, Accuracy of measuring instruments.

## **Bibliografická citace :**

KOZELSKÝ, M. *Metody zpracování dat z letových zkoušek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

**MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem byl, seznámen s předpisy pro vypracování bakalářské práce a že jsem celou bakalářskou práci, včetně příloh, vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 19.05.2008

.....

*Jméno*

V Brně 19.05.2008

*Martin Kozelský*

PODĚKOVÁNÍ:

*Děkuju svému vedoucímu ing.Jebáčkovi,Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a drahocení čas, který mi věnoval.*



**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ****OBSAH:**

1. Přehled použitých symbolů
2. Úvod
  - 2.1 Základní rozdělení letových zkoušek
  - 2.2 Základní postup při letových zkouškách
  - 2.3 Základní zvláštnosti letových zkoušek
3. Měření veličin a přístroje k tomu používané
  - 3.1 Měření rychlosti
  - 3.2 Měření teploty
  - 3.3 Měření úhlů náběhu a úhlů vybočení
  - 3.4 Měření polohových úhlů
  - 3.5 Měření zrychlení a násobků
  - 3.6 Měření úhlových rychlostí
4. Měření tenzometrickými odporovými snímači
  - 4.1 Úvod do měření tenzometrickými odporovými snímači
  - 4.2 Požadované vlastnosti tenzometrických odporových snímačů
  - 4.3 Drátkový tenzometrický odporový snímač
  - 4.4 Fóliový tenzometrický odporový snímač
  - 4.5 Polovodičový tenzometrický odporový snímač
  - 4.6 Konstanta snímače
  - 4.7 Rušivé vlivy při měření tenzometrickými odporovými snímači
5. Měřicí ústředny pro zpracování signálu z měřících přístrojů
6. Koncepce měření základních parametrů za letu
7. Charakteristika přesnosti přístrojů
  - 7.1 Druhy chyb měření
  - 7.2 Určení charakteristik přístrojů
  - 7.3 Mezní hodnoty chyb
  - 7.4 Třída přesnosti přístroje
  - 7.5 Zařazení přístroje do třídy přesnosti a jeho označení
9. Závěr
10. Seznam použité literatury

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ****1.PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ**

$v$	– rychlost proudění	$[ \text{m.s}^{-1} ]$
$v_i$	– indukovaná rychlost	$[ \text{m.s}^{-1} ]$
$v_f$	– skutečná rychlost při určité hustotě	$[ \text{m.s}^{-1} ]$
$\rho$	– hustota	$[ \text{kg.m}^{-3} ]$
$p_H$	– statický tlak	$[ \text{Pa} ]$
$p_0$	– celkový tlak	$[ \text{Pa} ]$
$q$	– dynamický tlak	$[ \text{Pa} ]$
$\kappa$	– Poissonova konstanta	$[ - ]$
$F$	– působící síla	$[ \text{N} ]$
$m$	– hmotnost	$[ \text{kg} ]$
$a$	– zrychlení	$[ \text{m.s}^{-2} ]$
$M$	– gyroskopický moment	$[ \text{kg.m}^2.\text{s}^{-1} ]$
$J$	– moment setrvačnosti	$[ \text{kg.m}^2 ]$
$\omega_1$	– úhlová rychlost ve směru 1	$[ \text{rad.s}^{-1} ]$
$\omega_2$	– úhlová rychlost ve směru 2	$[ \text{rad.s}^{-1} ]$
$\Delta R$	– přírůstek odporu tenzometru	$[ \Omega ]$
$R_0$	– odpor tenzometru při výchozím mechanickém zatížení	$[ \Omega ]$
$k$	– konstanta vyjadřující vlastnosti tenzometru	$[ - ]$
$\varepsilon$	– poměrné prodloužení	$[ - ]$
$\Delta$	– absolutní chyba přístroje	$[ - ]$
$y_{\text{real.}}$	– reálná charakteristika	$[ - ]$
$y_{\text{nom.}}$	– nominální charakteristika	$[ - ]$
$\delta$	– relativní chyba	$[ - ]$
$x_{\text{min.}}$	– minimální hodnota $x$	$[ - ]$
$x_{\text{max.}}$	– maximální hodnota $x$	$[ - ]$
$R$	– rozsahměřicího přístroje	$[ - ]$
$\Delta_0$	– mezní absolutní chyba	$[ - ]$
$\delta_s$	– relativní chyba citlivosti	$[ - ]$
$\delta_{0,R}$	– redukovaná mezní chyba	$[ - ]$
$\delta_0$	– redukovaná relativní odchylka	$[ - ]$
$x_c$	– práh citlivosti	$[ - ]$
$x_s$	– spodní mez citlivosti	$[ - ]$
$\delta_R$	– celková redukovaná relativní chyba	$[ - ]$
$\delta_k$	– třída přesnosti u kombinovaných chyb	$[ - ]$
$p$	– třída přesnosti	$[ - ]$
$x_i$	– naměřená veličina	$[ - ]$
$\mu$	– skutečná hodnota měřené veličiny	$[ - ]$

## 2. ÚVOD

### 2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ LETOVÝCH ZKOUŠEK

Letové zkoušky jsou jako takové těžko dělitelné do různých kategorií, protože mnoho zkoušek spolu úzce souvisí, nebo probíhají současně, čímž jsou na sobě závislé. Přesto existuje určité rozdělení letových zkoušek a to podle účelu, nebo podle předmětu zkoušení.

Rozdělení podle účelu zkoušky :

- 1. Výzkumné zkoušky :** při těchto zkouškách se měří základní veličiny aerodynamiky, mechaniky letu, pevnosti, zkouší se konstrukce a výstroj letounu za různých zvláštních podmínek, které často vyžadují, různé speciální měřicí systémy, nebo přímo speciálně upravený letoun.
- 2. Prototypové zkoušky :** při těchto zkouškách dochází k finálnímu zkoušení prototypu, při kterém se ověřuje správnost pevnostního a aerodynamického výpočtu letounu a taky zdali splňuje všechny parametry požadované na letoun v zadání.
- 3. Kontrolní zkoušky :** tyto zkoušky se provádějí u velkých sérií, kdy se porovnávají letové zkoušky i-tého letadla ze série s letovými zkouškami prototypu, nebo u jednoho stroje, ale po určitých cyklech používání letounu.

Rozdělení podle předmětu zkoušení :

Dělí se podle veličin, které chceme měřit na zkoušky letových výkonů, zkoušky letových vlastností a speciální zkoušky, které se tykají například zkoušení motorů, vrtulí a funkčnosti výstroje letounu.

### 2.2 ZÁKLADNÍ POSTUP PŘI LETOVÝCH ZKOUŠKÁCH

Ze základního rozdělení letových zkoušek jsou nejpodstatnější prototypové zkoušky, pro které se používá určitý postup práce, je to postupný soubor operací, které se musí v daném pořadí vykonat, aby byla zkouška co nejpřesnější.

Ostatní zkoušky se v některých operacích liší, ale přesto základní kostra základního postupu je velmi podobná. Základem letových zkoušek je předběžná příprava, kde je nutné seznámit s tím co máme měřit a s letounem na kterém to budeme provádět, potom je nutné vypracovat přesný časový plán zkoušek, dále následuje příprava před měřením, která se skládá z výběru a instalace potřebných měřících přístrojů s požadovanou přesností a výhodným výběrem místa pro instalaci těchto přístrojů, což velmi ovlivňuje přesnost měření. Hned potom následuje vážení letounu, stanovení polohy těžiště a přeměření základních rozměrů letounu – rozpětí, délka, výška apod., potom se určují výchylky klapek, měření vůlí tření v řízení, dále následují polohové úpravy pitotstatického systému, případně i ostatních přístrojů, které tuto úpravu potřebují pro zvýšení přesnosti měření. Po splnění těchto příprav se musí stanovit program měřících letů. Po stanovení programu můžeme přejít k vlastním zkouškám, a ty se dělají:

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ****a) Základní (kvalitativní)**

1. Porovnávací lety ( odkrytí hrubých nedostatků )
2. Ověřování funkce motoru, elektrické a speciální výstroje
3. Přezkoušení zdravotní nezávadnosti pilotního prostoru
4. Základní zkoušky letových vlastností

**b) Měřící (kvantitativní)**

1. Měření výkonů letounu
2. Měření letových vlastností

Po provedení těchto zkoušek se musí odečíst naměřené hodnoty a potom se tyto hodnoty musí početně zpracovat, provést opravy přístrojových chyb a redukce na standardní podmínky.

**2.3 ZÁKLADNÍ ZVLÁŠTNOSTI LETOVÝCH ZKOUŠEK**

Letové zkoušky na rozdíl od jiných technických zkoušek prováděných ve speciálních laboratořích, neprobíhá za stálých teplot a tlaku, ale za takových hodnot tlaků a teplot, jaké se zrovna nacházejí při zkouškách v atmosféře, výsledky je nutné přepočítat (redukovat) na standardní kombinaci tlaků a teplot v MSA (mezinárodní srovnávací atmosféru). Dalším problémem je nestálost ovzduší, tímto dochází ke značnému rozmezí výsledných hodnot, proto se musí výsledky zpracovat pomocí statistických metod. Další rozdíl je v ceně letových zkoušek, jsou finančně náročnější, protože se při nich používají drahé měřící přístroje, které musí mít malé rozměry, malou hmotnost, malý odběr energie a odolnost vůči velmi nízkým teplotám a vibracím, což značně zvedá jejich cenu.

**3. MĚŘENÍ VELÍČIN A PŘÍSTROJE K TOMU POUŽÍVANÉ****3.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI**

Rychlost je základním parametrem, měřeným při letových zkouškách. Měření hodnoty rychlosti musí být velmi přesné. Rychlost měříme pomocí venturiho, nebo pitotstatické trubice, takže rychlost vypočteme z rozdílů tlaků naměřených na trubici, k tomuto rozdílu musíme ještě pro přesný výpočet znát hustotu ovzduší, nebo teplotu ovzduší, přičemž hustota se ze stavové rovnice dá vyjádřit jako funkce teploty a tlaku. Samotné měření vzdušné rychlosti se ještě dělí podle rychlostí, v jejichž rozsahu se letoun pohybuje a to na:

*Měření rychlosti v oblasti nízkých rychlostí*

Při měření při velmi malých rychlostech nemusíme počítat se stlačitelností vzduchu, potom používáme známý tvar Bernoulliho rovnice pro nestlačitelnou tekutinu:

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

$$p_H + q = p_0 \quad (1)$$

$p_H$  – statický tlak ovzduší, je roven tlaku na statických otvorech trubice

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \text{ - dynamický tlak}$$

Potom v nulové výšce standardní atmosféry je rychlost rovna:

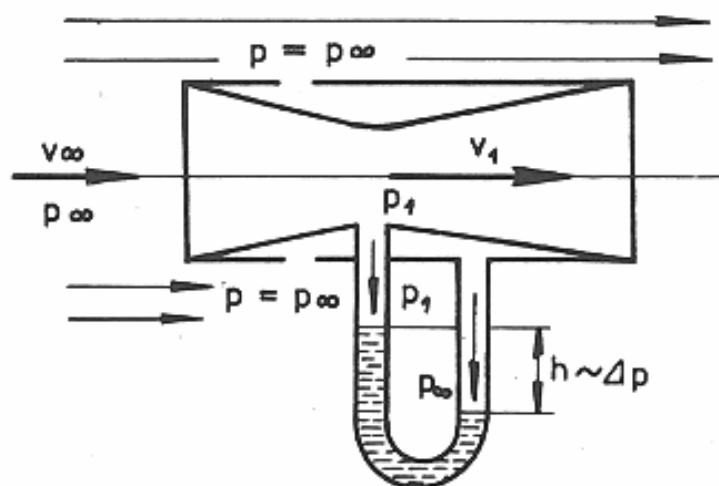
$$v = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_H)}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{2q}{\rho_0}} \quad (2)$$

Pokud hustota při měření není rovna hodnotě nulové hustoty není rychlost počítaná ve vzorci (2) rychlostí skutečnou, ale nazývá se rychlostí indukovanou, kterou potom pro různé hustoty vypočítáme dosazením do vzorce (2), pak pro různé hustoty platí vzorec:

$$v_i = v_f \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (3)$$

kde  $v_f$  je skutečná rychlost při hustotě  $\rho$ , indukovaná rychlost  $v_i$  je definována vztahem (3) a je to rychlost, kterou by ukazoval ideálně správný rychloměr, připojený na ideálně správnou a ideálně umístěnou měřicí trubici.

Při velmi nízkých rychlostech známých hlavně u kluzáků (50 - 150 km/h) se místo pitotstatické sondy používá tzv. venturiho trubice. Je to způsobeno tím, že pitotstatická trubice dává při těchto velmi nízkých rychlostech velmi nízké hodnoty přetlaku, což by vyžadovalo extrémně přesnou pitotstatickou trubici, naopak venturiho trubice dává značné podtlaky úměrné dynamickému tlaku, nehodí se ovšem pro oblast stlačitelných tekutin. Schéma venturiho trubice je na obr. 1



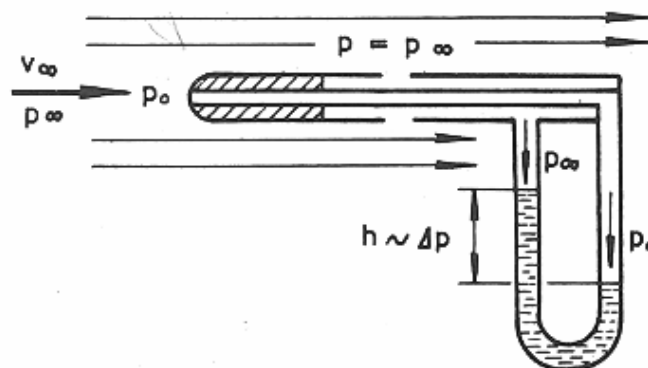
Obr. 1 Schéma venturiho trubice

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ***Měření rychlosti v subsonické oblasti*

Při měření v těchto oblastech už se nedá opomenout stlačitelnost tekutiny, pro stanovení tlaku v pitotstatické trubici se využívají vztahy pro jednorozměrné proudění stlačitelné tekutiny:

$$p_0 - p_H = \left\{ \left[ 1 + \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\rho_H}{\rho_H} \frac{v^2}{2} \right]^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\} \quad (4)$$

Schéma pitot-statické trubice je na obr. 2

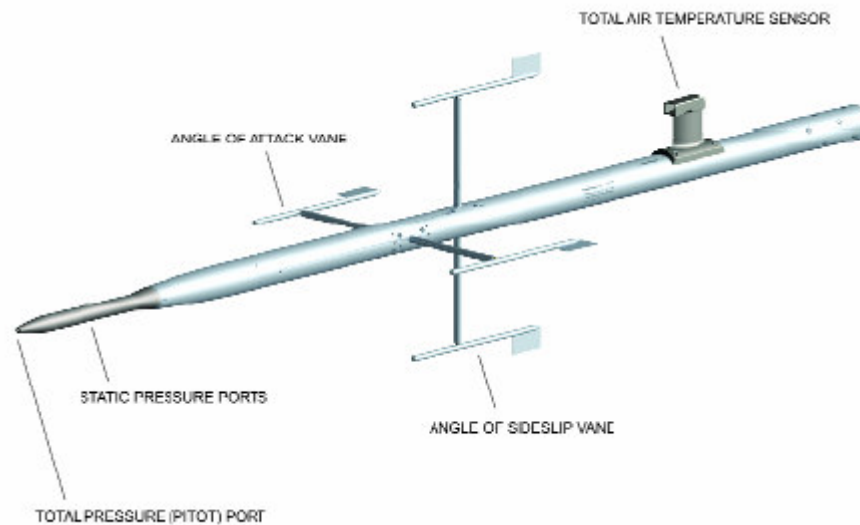


Obr. 2 Schéma Pitot-statické trubice

*Měření rychlosti v supersonické oblasti*

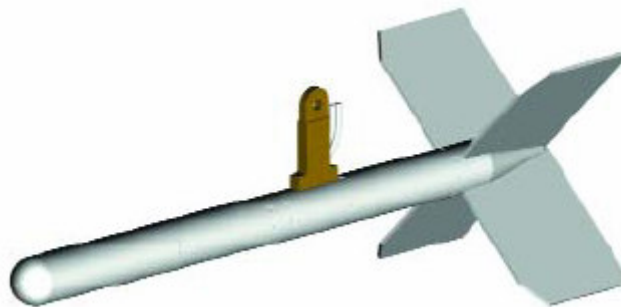
Při měření v nadzvukových rychlostech se používají štíhlé pitotstatické trubice, jejichž přední otvor má ostré hrany. Předpokládáme, že tlak v předním otvoru je tlakem zbrždění plynu, který při zpomalování z nadzvukové rychlosti prošel jedinou kolmou rázovou vlnou, ve statických otvorech opět předpokládáme přesně statický tlak klidného ovzduší.

Velký sortiment pitotstatických trubic využitelných pro letové zkoušky má firma space age control, která vyrábí dokonce pitot-statickou sondu, na které jsou umístěny dvě lopatky pro měření úhlu náběhu a dvě lopatky pro měření úhlu vybočení a k tomu je na sondě umístěn snímač celkové teploty vzduchu, tato sonda je na obr. 3.



Obr. 3 Pittot-statická sonda s dalšími měřicími funkcemi od firmy space age control

Dále tato firma vyrábí také vlečné pittot statické sondy, které nejsou pevně přichyceny k letounu, ale jsou zavěšeny na vlečném laně za letounem. Foto takto vypadající sondy je na obr. 4.

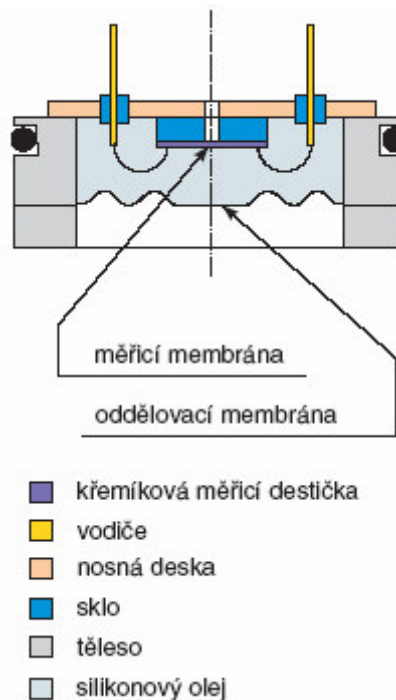


Obr. 4 Vlečná pittotstatická sonda

U nás vyrábí pittot-statické sondy například pražská firma Mikrotechna Praha a.s., která má určitý výběr sond na měření rychlosti.

Hodnoty získávané z pittot – statických sond musí být v podobě signálu, proto jsou umístěny v sondách tlakoměry, které nám převádí naměřený tlak na elektrický signál. V pittot – statických sondách se používají jako tlakoměry piezorezistivní polovodičové senzory. Měření se provádí pomocí destičky z vysoce odporového křemíku, protože její měrný odpor je silně závislý na mechanickém namáhání. Při mechanickém namáhání dochází k deformaci destičky, což se projeví změnou odporu. K destičce jsou připojeny vodiče a jako její nosič je použita skleněná destička přilepená na kovovou položku. Schématický řez senzorem je na obr. 5

## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ



Obr. 5 Schématický řez piezorezistivním polovodičovým senzorem

Použitý senzor musí měřit v určitém rozsahu tlaku, který se při měření rychlosti může vyskytnout. A to jeden pro statický tlak a jeden pro dynamický tlak.

### 3.2 MĚŘENÍ VÝŠKY

Pro měření výšky se používá stejných tlakoměrů z pittot – statických trubic, kterými měříme statický tlak, protože každé výšce podle MSA odpovídá nějaký statický tlak. Příkladem firmy, která se zabývá výrobou piezorezistivních polovodičových senzorů je firma BD Sensors, která poskytuje dostatečnou škálu tlakoměrů, které se dají k tomuto účelu použít. Firma nabízí tlakoměry s širokou škálou rozsahů tlaku, pro měření statického tlaku, určujícího výšku musí se nacházet rozsah tlaku minimálně v rozmezí 0,5 až 1,1 bar. Tlakoměr firmy BD Sensors je zobrazen na obr. 6.



Obr. 6 Tlakoměr BD Sensors



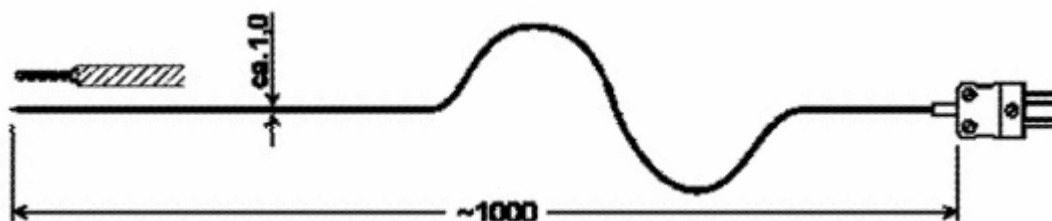
**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ****3.3 MĚŘENÍ TEPLoty**

K měření teploty se při letových zkouškách používají snímače teploty a to termočláňkové a odporové. Princip odporových snímačů spočívá ve změně odporu platinového drátu v závislosti na teplotě. Dělí se do třech tříd přesnosti označované od nejpřesnějšího A, B, C. Každý má určitou toleranci A – 0,15 °C, B – 0,3 °C a C – 0,6 °C. Nejčastěji se používají odporové čidla PT 100, číslice 100 v názvu tohoto čidla vyjadřuje, že při 0 °C je odpor čidla 100Ω. Při změně této teploty se změní taky odpor. Používají se pro rozsah teplot 0 – 800 °C. Odporové čidlo PT 100 je zobrazeno na obr. 7.



Obr. 7 Odporové čidlo PT 100

Termočláňkové snímače jsou vyrobeny svařením dvou vodičů v elektrickém výboji. Konec kterým se provádí měření má tvar kuličky o průměru mezi 0,5 až 1 mm. Používají se v rozsahu teplot 0 – 750 °C. Měření termočláňky se vyznačuje tzv. termoelektrickým dějem, který spočívá v převodu teploty na elektrické napětí. Spoj dvou různých kovů se zahřívá přičemž vzniká napětí závislé na teplotě a materiálu vodičů. Abychom mohli měřit napětí bez chyb, musíme připojit termočláňek na tzv. kompenzační vedení. Jedná se o vedení, které posune místo měření měřicím přístrojem do míst, kde lze bez problému měřit, aniž by vznikla chyba měření. Měření teploty se takto převádí na měření rozdílu teplot termočláňku a studeného konce kompenzačního vedení. Neznámější termočláňkové snímače teploty jsou typu J z materiálu železo – kobalt, nebo typu K z materiálu NiCr – NiAl. Schéma termočláňkového teplotního čidla je na obr. 8.



Obr. 8 Schéma termočláňkového teplotního čidla

Při měření teploty za letu je důležité, aby v okolí čidla zůstala teplota nulové rychlosti. Teplota tedy nesmí být ovlivněna rychlostí, kterou se letoun pohybuje. K tomu účelu jsou vyvinuté krytky, postavené proti proudu vzduchu.

**3.4 MĚŘENÍ ÚHLU NÁBĚHU A ÚHLU VYBOČENÍ**

Se speciální sondou na obr. 3 souvisí taky měření úhlu ofukování a to jak úhel náběhu, tak úhel vybočení, protože jsou na něm umístěny korouhvičky. Pro úhel náběhu s lopatkami v horizontálním směru a pro úhel vybočení ve směru vertikálním. Normálně se dají

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

zakoupit korouhvičky na měření úhlu ofukování taky samostatně například u stejné firmy jako sonda - Space Age Control, které můžeme umístit jak horizontálně tak zároveň i vertikálně, podle toho jaký úhel chceme měřit. Princip spočívá v tom, že lopatka se natáčí ve směru působení vzduchu na letadlo, její natočení snímá elektrický snímač umístěný v zakryté části a převádí toto natočení na elektrický signál, který nám tuto hodnotu zobrazí v digitální podobě na přístroji v letadle.



Elektrický snímač, který převádí polohu natočení lopatky na elektrický signál.

Obr. 9 Lopatka pro měření úhlu náběhu a úhlu vybočení – Space Age Control



Obr. 10 Miniaturní lopatka pro měření úhlů náběhu a úhlu vybočení – Space Age Control

**3.5 MĚŘENÍ POLOHOVÝCH ÚHLŮ**

K tomuto účelu se dnes používají gyroskopické sklonoměry, neboli tzv. gyra, jde o rychle se otáčející setrvačnick se třemi stupni volnosti, který při otáčení nemění svoji polohu vůči zemi, tím dává informaci o poloze letadla vůči prostoru - využívá zákona zachování momentu hybnosti, tyto přístroje jsou jednoduché konstrukce a dobře se na nich měří a odečítají hodnoty. Vysoce přesné a použitelné pro široký rozsah teplot ( - 40 °C ÷ 85 °C ) je gyro firmy Summit instruments. Které má navíc velmi malé rozměry a hmotnost. Trojosé gyro firmy Summit Instruments je na obr.11.



Obr. 11 Trojosé Gyro Summit Instruments

**3.6 MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ A NÁSOBKŮ**

Pro měření zrychlení a násobků se používají tzv. akcelerometry. Pro měření zrychlení a násobků se používají tzv. akcelerometry. Akcelerometry jsou přístroje, které jsou citlivé na zrychlení, tzn. reagují na síly, které zrychlení způsobují. Podle známého vzorce  $F = m \cdot a$  nám vyplývá, že celkové zrychlení je přímo úměrné součtu sil působících na těleso. Akcelerometr pracuje na principu závaží, umístěném mezi dvěma pružinami, když bude na závaží působit síla, závaží se vychýlí přímoúměrně působící síle. Určující je právě natažení pružiny, které se převádí na elektrický signál. Nejčastější jsou křemíkové akcelerometry, které využívají křemíkové pružiny a závaží a dělí se na kapacitní a mikroelektromechanické systémy. U kapacitních pohybujících závaží mění tvar plochy kondenzátoru, čímž se mění kapacita, což ovlivňuje výstupní signál. Mikroelektromechanické systémy jsou většinou malé integrované zařízení, které vzniklo kombinací mechanických a elektronických součástí. Pro letové zkoušky jsou výhodnější kapacitní akcelerometry.



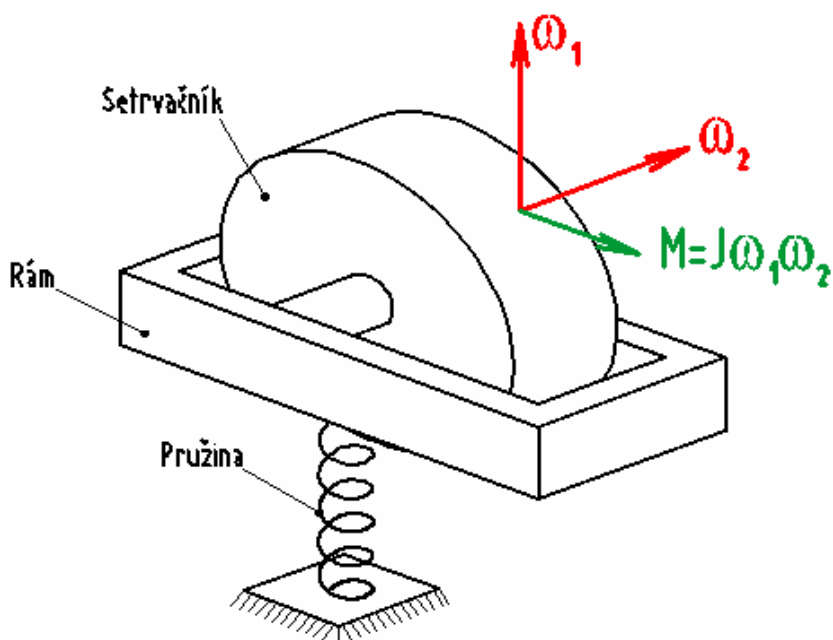
Obr. 12 Digitální akcelerometr Summit Instruments

**3.7 MĚŘENÍ ÚHLOVÝCH RYCHLOSTÍ**

Měření úhlových rychlostí se provádí pomocí omegametry – jedná se vlastně o gyroskopický přístroj, jehož princip je založen na setrvačnicku se dvěma stupni volnosti. Princip je popsán v obr. 13. Gyroskopický moment  $M$  se snaží otočit rámem, ve kterém je umístěn setrvačnick a snaží se stlačit pružinu, je již prohnutí je měřítkem momentu  $M$ , ze kterého se dále převádí podle vzorce (5) na úhlové rychlosti  $\omega_1$  a  $\varpi_2$ .

$$M = J \omega_1 \varpi_2 \quad (5)$$

## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ



Obr. 13 Schéma omegametru

## 4. MĚŘENÍ TENZOMETRICKÝMI SNÍMAČI

### 4.1 ÚVOD DO MĚŘENÍ TENZOMETRICKÝMI SNÍMAČI

Při letových zkouškách se také ověřuje zatížení různých částí letounu a to například : měření síly na řídicí páku, měření síly v příčném řízení, měření zatížení táhla v podélném řízení a ověření síly na řídicí páce, měření zatížení táhla v příčné řízení a ověření síly na řídicí páce, měření zatížení vztlakové mechanizace letounu, měření zatížení vodorovné ocasní plochy, měření zatížení trupu od ocasních ploch, měření zatížení hlavního podvozku letounu, měření zatížení předového podvozku letounu a také na únavové zkoušky materiálu letounu. Na tyto měření se používají tenzometrické snímače. Jsou to přístroje pro měření tenze, mechanického namáhání a jím vyvolaného mechanického napětí. Základem běžného elektrického tenzometru bývá odporový tenzometr což je pasivní čidlo, které měří mechanické prodloužení. Změny prodloužení jsou v tenzometru převáděny na změny elektrického odporu. Je-li vodič tenzometru pevně spojený s povrchem měřeného namáhaného objektu, má stejné deformace jako objekt. Tedy při natahování se zvětšuje jeho délka, zmenšuje průřez a podle použitého materiálu se mění i jeho měrný elektrický odpor. U kovových odporových tenzometrů je měrný elektrický odpor jejich materiálu prakticky nezávislý na deformaci, tedy veličina  $\rho$  je konstantní. Na změny odporu kovového tenzometru mají pak vliv jen rozměry jeho vodiče. U polovodičových odporových tenzometrů, v nichž vodičem je například křemíkový pásek, se výrazněji projevuje piezorezistivní jev, tj. závislost měrného odporu  $\rho$  na mechanické deformaci.

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ****4.2 POŽADOVANÉ VLASTNOSTI TENZOMETRICKÝCH SNÍMAČŮ**

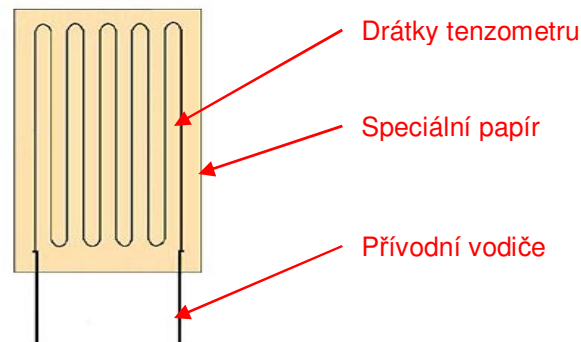
Tenzometrický odporový snímač se používá k měření povrchového napětí materiálu součástí. Dnes rozlišujeme tenzometrické snímače na starší drátkové snímače, jedná se o snímač vinutý z drátku, dále snímače foliové a nejmodernější z nich jsou snímače křemíkové, nebo germaniové. Vlastnosti snímače jsou ovlivněny použitým odporovým materiálem, který musí splňovat určité podmínky :

1. Citlivost jednotlivých snímačů vyjádřená poměrnou změnou odporu, musí být co největší.
2. Celkový odpor snímače musí být co největší, aby se co nejvíce eliminoval vliv odporu v měřícím obvodu a jejich změny byly co nejmenší. Jedná se hlavně o kabely a svorky.
3. Snímač by měl mít co nejmenší teplotní koeficient odporu, aby byly chyby vzniklé vlivem kolísání teploty co nejmenší.
4. Termoelektrický efekt se nesmí projevit na místech, kde je drátek připájen k přívodu.
5. Drátek musí být správně tepelně zpracován, aby nebyl křehký a dal se připájet k součásti.
6. Důležité je aby drátek měl v pokud možno co největším rozmezí lineární závislost mezi poměrnou deformací a změnou odporu drátku.

Výše uvedené vlastnosti většinou nejde u snímačů sloučit všechny dohromady, není materiál, který by vyhovoval všem těmto požadavkům najednou, ale je nutno vybrat takový materiál, který bude splňovat co nejvíce těchto podmínek. Dobře tyto podmínky splňuje například konstantan. Je to slitina složená z mědi a niklu. Specifický odpor není nijak oslnivý, ale z hlediska teplotního je velmi dobrý. Navíc je u konstantanu velmi velký rozsah lineární závislosti mezi poměrnou deformací a změnou odporu drátku. Dále je známý materiál Izo Elastic, který je specifický svou velkou citlivostí, ale je velmi náchylný ke změnám teploty, nelze jej použít dlouhodobě.

**5.2 DRÁTKOVÝ TENZOMETRICKÝ ODPOROVÝ SNÍMAČ**

Jedná se o nejstarší používaný druh odporových tenzometrů. Drátky tenzometru mívají průměr kolem 0,01 mm, jsou přilepeny na nevodivé podložce, jedná se o speciální papír a jejich konce jsou s přívodními vodiči spojeny svařením. Jak vypadá drátkový odporový tenzometr přilepený na speciální papír je vyobrazeno na obr. 14.

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

Obr. 14 Schéma drátkového odporového tenzometru

**Papír**

Také papír, na kterém jsou přilepeny drátky snímače, a který potom přilepený snímač drží na povrchu součásti, má předepsané taky nějaké podmínky, které musí splnit. První je tloušťka papíru. Například při lepení drátku na papír se musí postupovat opatrně, aby nedošlo k protržení papíru, který je ve změkklém stavu, nebo dokonce ke kontaktu mezi zkoušenou součástí a drátkovým snímačem, což souvisí s volbou tloušťky papíru, ta by ale měla být co nejmenší, aby byl drátek co nejbližší povrchu součástky, čímž se sníží zkreslení přenosu deformace ze součástky na drátek. Druhou podmínkou je pružnost papíru, to proto, aby se papír po zatěžování vrátil do původní polohy, a to bez časového zpoždění. Třetím požadavkem na papír je jeho poréznost, aby mohly vyprchat rozpouštědla z lepidla. Materiál, který se používal na papír se lišil podle firmy, která jej vyráběla, nejčastěji se jednalo o rýžový papír.

**Lepidlo**

Používané lepidla jsou nejchoulostivější částí zkompletovaného snímače, má vysoké nároky a to na odolnost proti vysokým teplotám, dále musí být odolný proti creepu, při dlouhodobém zatížení musí být povolování zanedbatelné, dále v rámci používání množství různých materiálů by mělo zajišťovat určitou přilnavost k těmto materiálům, dále by mělo být vodovzdorné, mělo by také odolávat olejům. Také musí být takové, aby přenášelo deformaci s velkou přesností na snímač. Většina lepidel používaných na snímačích je vyrobena na bázi termoplastů. Tyto lepidla nesnášejí příliš velké teploty, některé měknou už při 100 °C. Odolnosti lepidel se liší podle výrobce.

Používá se například nitrocelulósová lepidla, bakelitová lepidla, zahraniční firmy třeba Tepic M a firma Phillips používá lepidlo PR 9241. Pokud je místo použití snímače silně tepelně namáháno, používá se speciálních lepidel na bázi vodního skla v kombinaci s vhodným plnidlem.

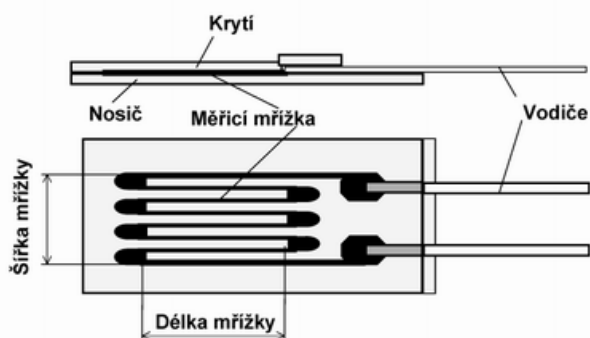
**5.3 FÓLIOVÝ TENZOMETRICKÝ ODPOROVÝ SNÍMAČ**

Rozdíl spočívá v tom, že místo drátku je k papíru přilepena naleptaná folie, na které leptáním dostaneme požadovaný tvar. Fólie jsou vyráběny ze stejných materiálu jako drátkové, mezi ně patří hlavně konstantan a pro vyšší teploty dokonce nichrom, použitelný pro teploty okolo 300 °C. Rozdíl je také v tloušťce folie a drátku. Fólie mají menší tloušťky a to od 0,001 mm do 0,01 mm. Pomocí velké ochlazovací ploše můžou

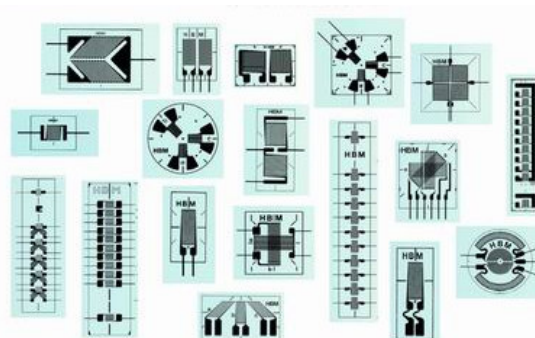
## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ

pracovat fóliové snímače při velkých proudových zatíženích. Jsou vyráběny v nejrůznějších tvarech a skupinách pro měření různě tvarovaných objektů a působení sil z různých směrů. Základní klasické provedení je, že na nosné izolační vrstvě (nosič) obdélníkového tvaru tloušťky zhruba 20 až 50  $\mu\text{m}$ , která je typu polyamid nebo sklem vyztužený fenolový film, je upevněn měřicí odporový meandr (měřicí mřížka) o tloušťce 3 až 6  $\mu\text{m}$ , určité délky, šířky a klidového odporu  $R$  (obvykle 100, 120, 350, 700 nebo 1000 $\Omega$ ). Meандр je obvykle vyráběn fotolitografickou technikou z kovových fólií materiálů konstantan, karma (slitina chromu a niklu). Na povrchu je pak senzor pokryt krycí vrstvou tloušťky okolo 30  $\mu\text{m}$  a vyvedeny jsou buď pájitelné plošky, nebo již přímo vodiče. Takové provedení tenzometru velmi dobře kopíruje měřenou deformaci. Životnost bývá obvykle přes 10 miliónů cyklů deformace, která se pohybuje do 0.5% rozměrů tenzometru.

Při měření působících sil je nutné vždy správně natočit tenzometr do daného směru působení. Pokud je nutné najednou měřit působící sílu či deformace ve více směrech, využívá se dnes tenzometrů obsahujících již více meandrů natočených do různých směrů. Základní schéma skladby fóliových tenzometrů znázorňuje obr. 15 a obr. 16 ukazuje různé druhy provedení od firmy HBM.



Obr. 15 Základní schéma skladby fóliových tenzometrů



Obr. 16 Provedení fóliových snímačů od firmy HBM

Závislost mezi deformací a poměrnou změnou odporu je u drátkových i fóliových snímačů lineární a je vyjádřena pomocí vzorce č. 6.

$$\Delta R/R_0 = k \cdot \varepsilon \quad , \quad \text{kde } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (6)$$

$k$  je konstanta vyjadřující vlastnosti tenzometru hlavně jeho citlivost,  $\Delta R$  je přírůstek odporu tenzometru při poměrném prodloužení  $\varepsilon$ ,  $R_0$  je odpor tenzometru při výchozím mechanickém zatížení.

### 5.4 POLOVODIČOVÝ TENZOMETRICKÝ ODPOROVÝ SNÍMAČ

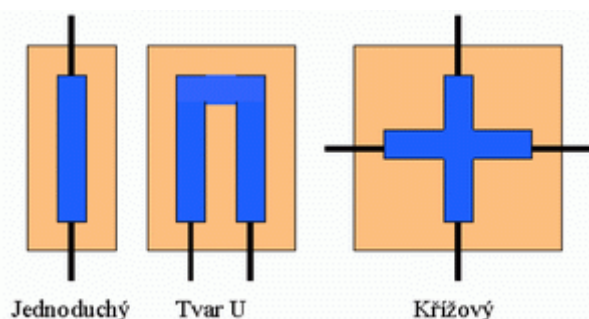
Z popisovaných tenzometrických odporových snímačů je polovodičový nejmladší. Základem těchto snímačů jsou pásy vyříznuté z monokrystalů germania, nebo křemíku, které mohou být difúzí znečištěny jiným prvkem a to jako polovodiče s

## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ

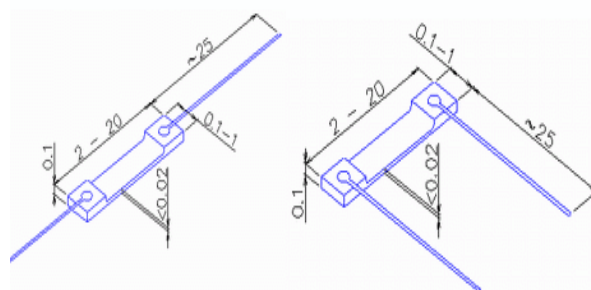
nečistotami typu N, nebo typu P, díky kterým se stává vodivým. Mechanické namáhání krystalické mřížky ovlivňuje výrazně pohyblivost nosičů náboje a tím i měrný odpor materiálu tenzometru. Vodivost se reguluje množstvím těchto nečistot, díky kterým můžeme dostat odpor  $100\Omega - 10\text{ k}\Omega$ . Z tohoto faktu vyplývá i hlavní rozdíl vůči ostatním druhům odporových snímačů a to ten, že velikost odporu nezávisí na rozměrech snímače, ale na množství nečistot v krystalu snímače. Velkou výhodou potom je skutečnost, že můžeme vyrobit velmi malý polovodičový snímač, který bude mít odpor větší, než velké drátkové snímače. Navíc mají polovodičové snímače velmi vysokou citlivost. Lepení polovodičových snímačů lze provádět stejně jako u fóliových a díky jejich malé tloušťce jsou použitelné i na zakřivené plochy. Závislost deformace a poměrného odporu je u polovodičových snímačů vyjádřena vzorcem č. 7.

$$\Delta R/R_0 = k_1 \cdot \varepsilon + k_2 \cdot \varepsilon^2 \quad (7)$$

kde  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ,  $\Delta R$  je přírůstek odporu tenzometru při poměrném prodloužení  $\varepsilon$ ,  $R_0$  je odpor tenzometru při výchozím mechanickém zatížení a konstanty  $k_1$  a  $k_2$  vyjadřují vlastnosti snímače, hlavně jeho citlivost. Hodnota těchto dvou konstant závisí tedy převážně na množství nečistot v polovodiči. Například pro znečištění bórem, které se hojně používá jsou typické hodnoty konstant  $k_1 = +130$  a  $k_2 = +2500$ . Závislost deformace a poměrného odporu je tedy kvadratická, na rozdíl od ostatních odporových snímačů, kdy je lineární. Tři nejběžnější provedení polovodičových tenzometrů je vyobrazuje obr. 17. A polovodičové tenzometrické snímače firmy VTS Zlín je na obr. 18.



Obr. 17 Nejběžnější provedení polovodičových tenzometrů.



Obr. 18 Provedení polovodičových tenzometrických snímačů české firmy VTS Zlín.

### 4.6 KONSTANTA TENZOMETRICKÝCH ODPOROVÝCH SNÍMAČŮ

Konstanta tenzometrických odporových snímačů vyjadřuje míru citlivosti, která je závislá na úměrnosti mezi poměrnou změnou odporu snímače a poměrnou deformací součástí. Označuje se jako K, v angličtině gage faktor. Udává se u každého snímače na obalu. Jedná se o průměrnou hodnotu naměřenou na zkušebních vzorcích, lepených stejným lepidlem na stejný papír, takže ve skutečnosti mají snímače v balení trochu odlišné hodnoty K-faktoru. Potom tedy K-faktor uvedený na obalu platí jen pro snímač lepený za stejných podmínek jako zkušební vzorek. Konstanta je závislá hlavně na použitém materiálu, dále na lepidle, kterým je přilepen k papíru, dále se konstanta



## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ

mění s oteplením snímače a také v čase. Nejvyšších konstant  $K$  dosahují polovodičové tenzometrické snímače, které mají  $K$  až 125, mnohonásobně méně mají drátkové a fóliové snímače,  $K$  se pohybuje v rozmezí 2 až 4, podle použitého materiálu, například nejpoužívanější konstantan má  $K=2,05$ , dále Karma  $K=2,1$ , Nichrom V  $K=2,2$  a Platina-wolfram  $K=4$ . Z toho plyne, že u polovodičových tenzometrů je deformační citlivost až šedesátkrát větší a nepotřebujeme k měření zesilovače, můžeme měřit běžnými ohmmetry, voltmetry a osciloskopy, dále jejich citlivost umožňuje měřit deformaci kovů již od miliontiny milimetru na délkovém metru.

### 6.1 RUŠIVÉ VLIVY PŘI MĚŘENÍ TENZOMETRICKÝMI SNÍMAČI

#### 1. TEPLOTA

Ovlivňuje nejen vodivost materiálu tenzometru, ale její změna způsobuje i teplotní roztažnost tenzometru. Nejčastějším způsobem kompenzace vlivu teploty je vhodné spojení více tenzometrů do můstku. Proud tekoucí tenzometrem z vyhodnocovacích obvodů musí být také zvolen dostatečně malý, aby tenzometr zahříval jen zanedbatelně.

#### 2. TEČENÍ (Creep)

Tenzometr, na který působí konstantní mechanické zatížení, po čase ztrácí citlivost. Je to způsobeno jevy v materiálech tenzometru, měřeného objektu a lepidla.

#### 3. HYSTEREZE

Samotný tenzometr má obvykle zanedbatelnou hysterezi. Větší hysterezi může vykazovat materiál, na který je tenzometr nalepen.

#### 4. VLHKOST

Hygroskopická nosná podložka mění s obsahem vody své rozměry. Také některá lepidla mění s vlhkostí své vlastnosti. Po nalepení tenzometru je třeba jej překrýt ochrannou proti vlhkosti. Pro tento účel se užíval i včelí vosk.

#### 5. ELEKTROMAGNETICKÉ POLE

Elektrickou složku pole lze snadno odstínit. Problémy může způsobovat silné střídavé magnetické pole a s ním spojená indukce v přívodních kabelech.

## 6. MĚŘÍCÍ ÚSTŘEDNY PRO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU Z MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ

Měřicí ústředny jsou hlavním centrem pro sběr dat elektronicky měřených veličin, podporované počítačovou technologií. Tyto sběrné stanice signálu umožňují zaznamenávání a vyhodnocování statických i dynamických dat. Při letových zkouškách je důležité, aby tyto stanice byly jednoduše přenosné, to znamená, aby mělo co nejmenší rozměry a hmotnost. Důležitým faktorem je také typ napájení, je důležité, aby byl co nejmenší. Data se ukládají do flash pamětí, z kterých se přenáší pomocí flash disků do počítače, kde se potom tyto data zpracovávají, úplně nejvýhodnější jsou však takové systémy, které jsou schopny okamžitě přenést signál z měřicí ústředny v letadle do počítače, který je na zemi, a který může rovnou zpracovávat tyto data. Velmi

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

výhodné jsou pro tyto účely měřicí ústředny od německé firmy ESA Messtechnik GmbH, která nabízí dostatečnou nabídku těchto měřících ústředn, která je pojmenována jako série Traveller. Hlavní měřicí ústřednou této série je Traveller CF, jedná se o systémy měřících zesilovačů, které jsou podporované počítačem. Velmi dobře se hodí pro měření statických i dynamických dat a obsahuje flash paměť o velikosti 2GB, takže se data přenáší pomocí flash disků. Zařízení je vybaveno analogovými i digitálními vstupy a umožňuje až 100 000 měření za sekundu na každém kanále. Ústřednu je možné pomocí USB portu připojit také přímo na počítač, ale to se při letových zkouškách z důvodů nedostatku místa příliš nepoužívá. Systém Traveller CF se prodává v provedení 32, nebo 64 kanálů, může být napájen zdrojem od 10 do 36 V a jeho váha je 3 kg pro 32 kanálový a 5 kg pro 64 kanálový. Model Traveller CF je zobrazen na obr. 19.



Obr. 19 Traveller CF

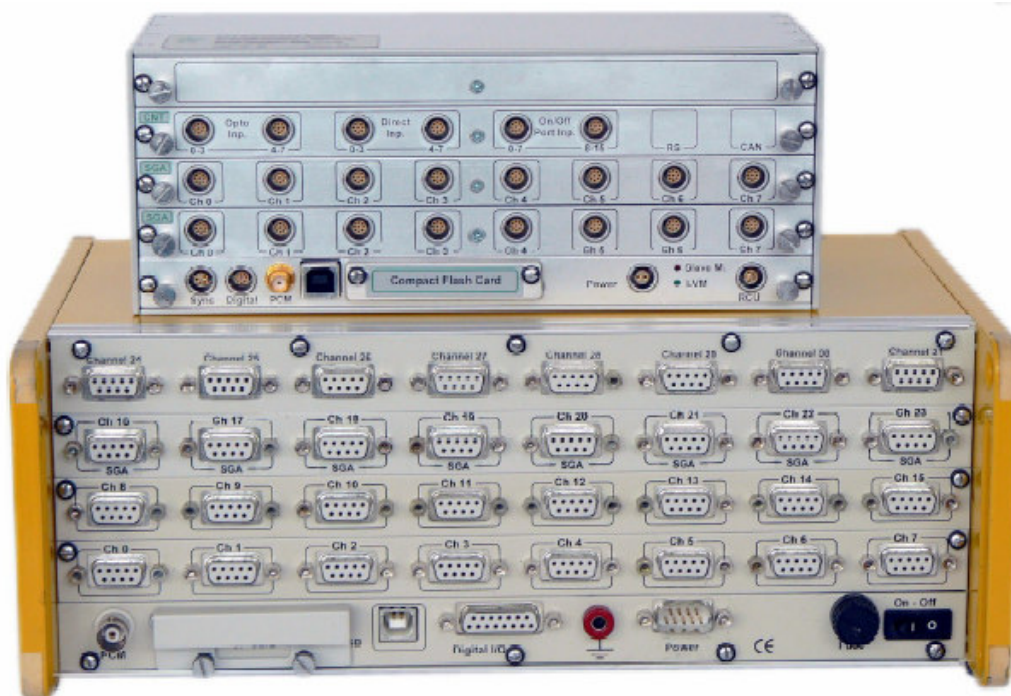
Dalším a podle mého názoru ještě více výhodným přístrojem pro sběr dat při letových zkouškách je Traveller CFM, který je ještě mnohem menší a lehčí než model CF, dělá se sice jen v provedení 32 kanálů, ale má velmi malé rozměry a hmotnost oproti CF, jeho rozměry jsou 101 x 214 x 84 mm a hmotnost 2 kg, a maximální počet měření za sekundu na jeden kanál je stejný jako u CF. Nevýhodou je trošku externí zdroj, což však vyvažuje vestavěný PCM – koder, který umožňuje bezdrátový přenos dat na velké vzdálenosti a to je asi největší výhoda tohoto přístroje. Model Traveller CFM je zobrazen na obr. 20.

## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ



Obr. 20 Traveller CFM

Rozdíl v rozměrech modelů Traveller CF a Traveller CFM je zřetelný z obr. 21.



Obr. 21 Porovnání rozměrů Traveller CF a CFM

Další firma zabývající se výrobou měřících ústředí je další německá firma HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Zde jsem objevil dvě měřící ústředny, použitelné pro sběr dat z letových zkoušek a to jejich nově vyvinutý QuantumX a potom také starší Spider8, jedná se o univerzální vícekanálové ústředny pro měření statických i dynamických dat, obě však obsahují jen 8 kanálů na rám, umožňují měřit hodnoty tenzometrické, indukčnostní, napětí, proudy, termočlánky, frekvence, odpory Pt100, Pt1000. Tyto ústředny jsou určitě velmi vhodné pro sběr dat z letových zkoušek, ale

V Brně 19.05.2008

Martin Kozelský

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

myslím si, že ústředny firmy ESA Messtechnik jsou mnohem lépe zkonstruovány a mají také lépe vypracovaný systém přenosu dat a můžeme měřit na mnohem více kanálech, která také zvládnou za sekundu více měření. Model QuantumX je vyobrazen na obr. 22 a Spider8 na obr. 23.



Obr. 22 QuantumX



Obr. 23 Spider8

Firma zabývající se přímo výrobou měřících ústředěn pro testy v letectví je Dewetron, která nabízí pro sběr dat multifunkční systém DEWE-5000, výhody tohoto systému jsou v celkovém zpracování tohoto přístroje. Systém DEWE-5000 je zkonstruován ve stylu notebook, to znamená, že ke svým 16 kanálovým vstupům má také zabudovanou klávesnici a zaklápěcí monitor, jedná se v podstatě o kombinaci normálního počítače a měřící ústředny se vstupy pro signál. Základem počítače vestavěného do přístroje je procesor Intel Pentium 4 a pracuje s operačním systémem Windows XP, což je jeho velká přednost. Jinak umožňuje klasický přenos dat přes 4 USB porty a 1 Firewire interface. Velkou nevýhodou však podle mého názoru jsou hmotnost 17 kg a rozměry 460 x 351 x 200, to je o mnohem více než u přístrojů firmy ESA Messtechnik. Důležité je pro výběr mezi těmito dvěma přístroji druh použití, pro měření v malých letounech budou výhodnější rozměrově a hmotnostně menší a také levnější přístroje ESA, ovšem u velkých letadel je určitě výhodnější přístroj firmy Dewetron, protože máme více místa, ale také více měření, a přístroj DEWE-5000 má v sobě zabudováno vše potřebné včetně počítače s nejpoužívanějším operačním systémem. Navíc tato firma vyrábí také DEWE-5001, který má 32 kanálů. Přístroj Dewetron DEWE-5000 je na obr. 24.

## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ

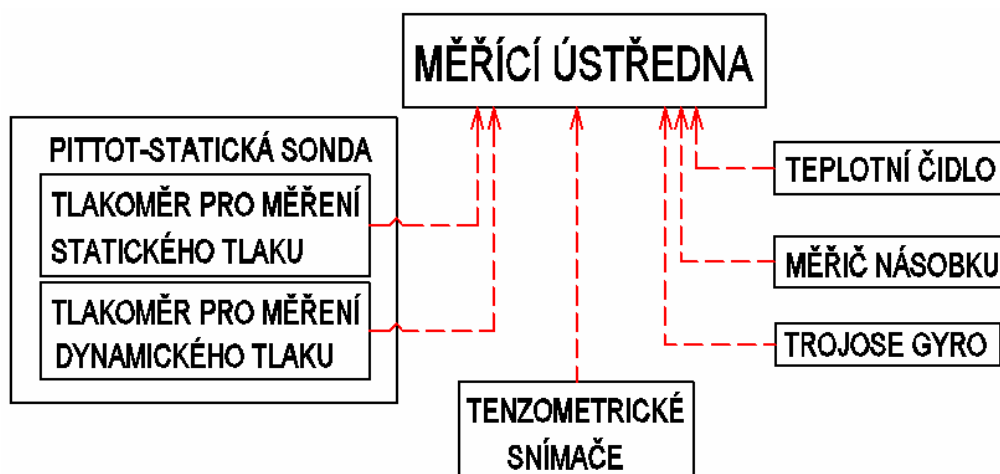


Obr. 24 DEWE-5000

### 6. KONCEPCE MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ ZA LETU

Základem této koncepce je měřicí ústředna, která zpracovává data nashromážděné z přístrojů k ní připojených. K měřicí ústředně je připojena pittot-statická sonda, ve které jsou dva snímače tlaku, jeden pro dynamický tlak a druhý pro statický tlak, pomocí rozdílu hodnot tlaků těchto tlakoměrů získáváme rychlost a pomocí hodnot z tlakoměru pro statický tlak určujeme výšku letu, dále máme do ústředny zapojeno teplotní čidlo pro měření teploty, měřiče násobku, trojosé gyro pro měření polohy a hlavně také tenzometrické snímače, pro snímání povrchového napětí za letu. Toto jsou pouze přístroje pro měření základních parametrů, většinou se do ústředny zapojují ještě další měřicí přístroje, jako potenciometry pro měření posuvu v řízení, na to samé se dá použít snímač poloh, který je rozměrově menší a má lepší způsob uchycení, nebo indukční snímač pro měření výchylek kormidel.

Blokové schéma měření základních parametrů za letu je na obr. 25.



Obr. 25 Blokové schéma měření základních a dalších parametrů za letu

## **7. CHYBY PŘÍSTROJŮ PŘI MĚŘENÍ A JEJICH PŘESNOST**

Ke zpracování dat patří taky neodmyslitelně matematické vyjádření přesnosti a chyb přístrojů, se kterými musíme při zpracování výsledků počítat. Omezená přesnost měřících přístrojů a proměnnosti podmínek měření mají za následek to že výsledky měření nejsou stejné ani na homogenním materiálu, kde je skutečná hodnota měřené veličiny konstantní. Výsledkem každého měření je náhodná veličina, která obsahuje také chyby měření. Tyto chyby mohou být způsobeny různými vlivy.

### **7.1 DRUHY CHYB MĚŘENÍ**

Chyby lze rozdělit podle různých hledisek, podle místa vzniku v měřícím řetězci a podle příčin vzniku.

*Rozdělení podle místa vzniku v měřícím řetězci:*

#### **1. Instrumentální chyby**

Jsou způsobeny konstrukcí měřícího přístroje a určují jeho kvalitu. U řady přístrojů jsou známy a garantovány výrobcem.

#### **2. Metodické chyby**

Souvisejí s použitou metodikou stanovení výsledků měření, jako je odečítání dat, organizace měření a eliminace vnějších vlivů.

#### **3. Teoretické chyby**

Souvisejí s použitým postupem měření. Jde zejména o principy měření, fyzikální modely měření, použité parametry a fyzikální konstanty.

#### **4. Chyby zpracování dat**

Jedná se o chyby numerické metody a chyby způsobené užitím nevhodných metod statistického vyhodnocení.

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

*Rozdělení podle příčin vzniku:*

**1. Náhodné chyby**

Kolísají náhodně jak velikostně tak i v orientaci znaménka při opakování měření, nedají se předvídat a jsou popsány určitým pravděpodobnostním rozdělením. Jsou způsobeny řadou příčin a je problém je odstranit, nebo omezit jejich vliv.

**2. Systematické chyby**

Působí předvídatelně, jsou většinou funkcí času, nebo parametrů měřícího procesu. Mají stejná znaménka, konstantní systematické chyby snižují, nebo zvyšují numerický výsledek všech měření o konstantní hodnotu. Lze je odhalit tak, že naměřené hodnoty porovnáme s naměřenými hodnotami z jiného přístroje. Tyto chyb mohou být způsobeny také opotřebením měřícího přístroje a jeho stárnutím. Systematické chyby se dále dělí na aditivní – chyba nastavení nulové hodnoty a multiplikativní – chyba citlivosti. Velikost a druh systematické chyby uvádí výrobce.

**3. Hrubé chyby**

Jsou to hodnoty, které se od ostatních výrazně liší, jsou zapříčiněny nějakým výjimečným vlivem, například špatný odečet měřené hodnoty, nebo selhání měřícího přístroje.

**7.2 URČENÍ CHARAKTERISTIK PŘÍSTROJŮ**

Kalibrace přístrojů se provádí opakovaným měřením závislosti  $y = f(x)$ , tím se získá soustava bodů, po jejichž vykreslení do grafu získáváme pás neurčitosti, je to pás, v kterém se nacházejí naměřené hodnoty. Čára uprostřed pásu neurčitosti se nazývá nominální charakteristika  $y_{nom.}$ , ze které lze vypočítat reálnou charakteristiku  $y_{real.}$  a to tak, že k ní přičteme absolutní chybu měřícího přístroje. Potom se tedy při zadané hodnotě  $y$  rovná absolutní chyba měřícího přístroje:

$$\Delta = x_{real.} - x_{nom.} \quad , \quad (\Delta^I = y_{real.} - y_{nom.}) \quad (8)$$

Absolutní chyba je vypočtena v nějakých jednotkách, což není pro vyjádření přesnosti nejlepší, proto se používá relativní chyba, která je vyjádřena v procentech a z absolutní chyby se vypočítá jako:

$$\delta = 100 \frac{\Delta}{x} \quad , \quad (\delta^I = 100 \frac{\Delta^I}{y}) \quad [ \% ] \quad (9)$$

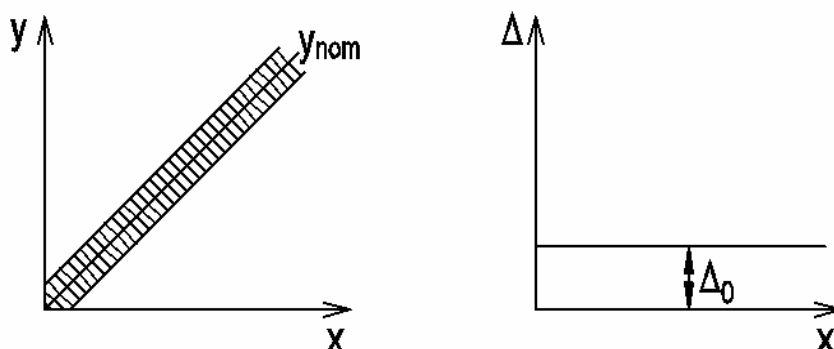
## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ

Taky se často používá tzv. redukovaná relativní chyba, kde se využívá znalosti rozsahu měřícího přístroje R:

$$\delta_R = 100 \frac{\Delta}{x_{\max.} - x_{\min.}} = 100 \frac{\Delta}{R} \quad [ \% ] \quad ( 10 )$$

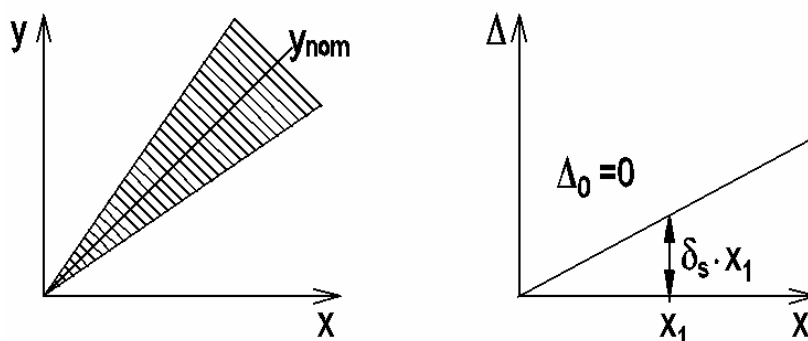
Každý přístroj může mít nějaký tvar pásu neurčitosti, existují tři základní druhy a to model aditivní, multiplikativní a kombinovaný, podle kterých se navrhuje korekce, které nám chyby co nejvíce sníží, nebo nejlépe úplně odstraní.

1. Aditivní model – U tohoto modelu jsou naměřené hodnoty v celém rozsahu ohraničeny konstantní mezní chybou  $\Delta_0$ , Systematické aditivní chyby vznikají nesprávným nastavením přístroje na nulovou hodnotu, což však u moderních přístrojů odpadá, protože mají automatickou korekci na nulovou hodnotu.



Obr. 26 Aditivní model

2. Multiplikativní model – velikost absolutních chyb se zvětšuje se vstupní hodnotou x, pro nulovou hodnotu x je i absolutní chyba nulová, multiplikativní systematické chyby jsou způsobeny poruchami přístrojů a označují se jako chyby citlivosti.

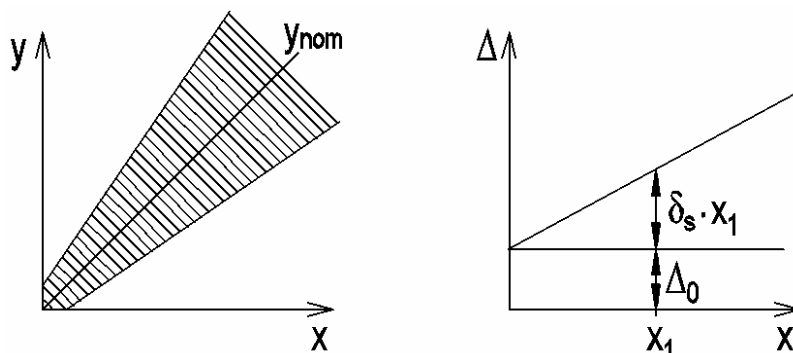


Obr. 27 Multiplikativní model



## METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ

3. Kombinovaný model - v reálných případech se většinou vyskytují kombinované modely, nebo také složité nelineární funkce  $y = f(x)$ .



Obr. 28 Kombinovaný model

Hodnota  $\delta_s$ , která se objevuje ve výše uvedených obrázcích je relativní chyba citlivosti, která se dále využívá při určování třídy přesnosti.

### 7.3 MEZNÍ HODNOTY CHYB

Nejvyšší přípustnou chybou u měřicích přístrojů je právě mezní chyba  $\Delta_0$ , ostatní odchylky přístroje ji nepřekročí. Pro procentuální vyjádření této chyby se používá redukovaná mezní chyba, která se označuje  $\delta_{0,R}$ , závisí na mezní chybě  $\Delta_0$  a měřícím rozsahu přístroje R. A vypočítá se podle vzorce:

$$\delta_{0,R} = \frac{100\Delta_0}{R} \quad [\%] \quad (11)$$

### 7.4 TŘÍDA PŘESNOSTI PŘÍSTROJE

Charakterizuje hodnotu přesnosti přístroje v celém jeho měřícím rozsahu. Tato hodnota je vyjádřena kladným bezrozměrným číslem a musí být vždy větší, nebo rovna největší absolutní hodnotě redukovaných chyb z celého rozsahu měřicího přístroje. Hodnota třídy přesnosti závisí také na tom zda se jedná o aditivní, multiplikatívni, nebo kombinované chyby měření. U aditivních chyb měření je třídou přesnosti přístroje přímo redukovaná relativní odchylka, která se počítá podle vzorce:

$$\delta_0 = 100 \frac{\Delta_0}{x_{\max.} - x_{\min.}} = 100 \frac{\Delta_0}{R} \quad (12)$$

U multiplikatívni chyb měření je třídou přesnosti přístroje přímo relativní chyba citlivosti, která se potom počítá podle vzorce:

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

$$\delta_s = 100 \frac{\Delta_0}{x} \quad (13)$$

Další veličinou související s třídou přesnosti přístroje je práh citlivosti, jedná se o vstupní hodnotu, která je rovna absolutní mezní chybě  $\Delta_0$ , to znamená, že relativní chyba je potom rovna 100%. Práh citlivosti závisí na třídě přesnosti a měřícím rozsahu přístroje R a vypočítá se podle vzorce:

$$x_c = \frac{\delta_0 R}{100} \quad (14)$$

Dále se taky definuje tzv. spodní mez pracovního intervalu, to se dělá proto, abychom dosáhli co nejmenší hodnoty relativní chyby a to tak, aby relativní chyba byla právě p %, obvykle to bývá 4, nebo 10 %. Spodní mez pracovního intervalu vypočteme podle vzorce:

$$x_s = 100 \frac{\Delta_0}{p} = 100 \frac{x_c}{p}$$

A nakonec třída přesnosti u kombinovaných chyb měření, u těchto chyb lze celkovou chybu vyjádřit jako součet aditivních a multiplikativních složek. Z toho vyplývá vzorec:

$$\Delta = \Delta_0 + \delta_s x \quad (15)$$

Pás neurčitosti je potom dán součtem ploch aditivního a multiplikativního pásu neurčitosti a celková redukovaná relativní chyba se vypočítá podle vzorce:

$$\delta_R = \delta_0 + \delta_s \frac{x}{R} \quad (16)$$

Třidu přesnosti u kombinovaných chyb měření potom vyjádříme jako součet redukované relativní chyby a chyby vzniklé na horní hranici měřícího rozsahu. Třída přesnosti u kombinovaných chyb měření je vyjádřena vzorcem:

$$\delta_k = \delta_0 + \delta_s \quad (17)$$

**7.5 ZAŘAZENÍ PŘÍSTROJE DO TŘÍDY PŘESNOSTI A JEHO OZNAČENÍ**

Když určujeme třídu přesnosti, do které přístroj zařadíme, je pro nás směrodatné, že největší mezní chyba musí být při zvolené třídě přesnosti p menší než hodnota  $R \cdot p / 100$ . Skutečnou hodnotu měřené veličiny potom dostaneme ze vzorce:

$$\mu = x_i \pm \frac{R p}{100} \quad (18)$$

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

Používané třídy přesnosti, používané u měřících přístrojů jsou 6%, 4%, 2,5%, 1,5%, 1%, 0,5%, 0,2%, 0,1%, 0,05%, 0,02%, 0,01%, 0,005%, 0,002%, 0,001%, které se doplňují značkou chyby, podle toho o jaký druh chyby se jedná. Pro aditivní  $\delta_0$ , která se zapíše přímo jako číslo třídy přesnosti, například pro třídu přesnosti 0,2% se zapíše jako 0,2. Potom pro multiplikativní  $\delta_S$ , označuje se jako hodnota  $\delta_S$  v kroužku, například třída přesnosti 0,5% se označí jako **(0,5)** a pro kombinované  $\frac{\delta_k}{\delta_0}$ , což je potom na přístroji uvedeno například jako 1,5/0,5, to znamená, že  $\delta_k = 1,5\%$  a  $\delta_0 = 0,5\%$ .

Výsledky měření se potom zaokrouhlují na stejný počet desetinných míst jako má absolutní mezní chyba přístroje. Podstatný je taky fakt, že přístrojům s jejich stárnutím klesá třída přesnosti, což je způsobeno zvětšováním mezních chyb přístrojů.

**8. ZÁVĚR**

V závěru bych chtěl shrnout základní poznatky o letových zkouškách. Hlavním centrem všech letových zkoušek jsou měřící ústředny, které nám sbírají a zpracovávají data z měřících přístrojů, které jsou k těmto ústřednám připojeny. Při porovnání těchto ústředí, od tří firem, které se na jejich výrobu specializují a to ESA Messtechnik GmbH, HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH a firmy Dewetron. Porovnáním parametrů a vybavení těchto ústředí jsem zjistil, že nejlépe vybavený a přímo pro letové zkoušky určený je přístroj DEWE-5000 firmy Dewetron, jeho vybavení je špičkové, ale na druhou stranu má velké rozměry, velkou hmotnost, protože je vyroben z kovových materiálů a také je nejdražší. Proto bych viděl jeho použití v měření u velkých letadel, ve kterých budou jeho rozměry a hmotnost zanedbatelné a jejich cena bude přímoúměrná jejich použití, navíc velké letouny vyrábí velké firmy, které si můžou tyto špičkové přístroje dovolit. Pro měření v malých letadlech a pro malé společnosti, které se letovými zkouškami zabývají budou určitě výhodnější výrobky firmy HBM a zejména potom výrobky firmy ESA Messtechnik, výhodou jsou jejich velmi malé rozměry a hmotnost, při docela velkém vybavení a přímo u výrobku Traveller CFM se mi líbil bezdrátový přenos dat do počítače na zemi. Velmi důležitým měřícím přístrojem připojeným do měřící ústředny je pittot – statická sonda. Při hledání těchto sond jsem nenašel příliš mnoho výrobců z české republiky, objevil jsem pouze pražskou firmu Mikrotechna Praha a.s., která nabízí určitý sortiment těchto sond, vhodných pro měření rychlosti a výšky letu. Opravdu skvělé sondy však vyrábí zahraniční firma Space Age Contorol, která nabízí vícefunkční sondu, se kterou lze navíc díky na ní ve dvou osách umístěných lopatkách měřit úhel náběhu a úhel vybočení a taky je na ní umístěno teplotní čidlo pro měření teploty, což je velmi výhodný z hlediska úspory místa při uchycování měřících přístrojů na letoun. Dalším důležitým měřícím přístrojem jsou právě teplotní sondy, pokud nejsou umístěny přímo na pittot – statické sondě, jako v případě výrobku firmy Space Age Control. Teplotní sondy vyrábí mnoho firem a je proto na výběr mnoho možností, velmi důležité jsou však u těchto sond jejich kryty, které musí zajistit, aby měřená teplota nebyla ovlivněna prouděním vzduchu. Dalšími přístroji jsou gyra a akcelerometry, kterých je na výběr také celkem velké množství, vhodná firma, která se zabývá jejich výrobou je Summit Instruments. Zvláštní oblast při letových zkouškách patří tenzometrickým snímačům, které mají velkou škálu použití,

**METODY ZPRACOVÁNÍ DAT Z LETOVÝCH MĚŘENÍ**

technologie tenzometrických snímačů je dnes velmi rozšířena a to nejen v letectví a je mnoho firem, které se touto problematikou zabývají. V dnešní době se už příliš, řekl bych, že vůbec nepoužívají drátkové odporové tenzometry, ty jsou dnes nahrazeny foliovými tenzometry, které jsou cenově výhodné, ale jejich konstanta K je velmi malá oproti polovodičovým odporovým tenzometrům, jejichž K je mnohonásobně vyšší, v dnešní době se jedná o nejvíce používané tenzometry. Všechny tyto měřicí přístroje vysílají elektrický signál do měřících ústředen, které tyto data sbírají a potom se dále pomocí flash disků, kabelů, nebo bezdrátově přenášejí na osobní počítače, ve kterých se pomocí různých programů tyto data zpracovávají. Výhodu má přístroj firmy Dewetron DEWE-5000, který má zabudován počítač, na kterém je nainstalován operační systém WindowsXP, nemusí tedy data nikam přenášet a může je rovnou zpracovávat. Ke kvalitnímu zpracování dat je nutné znát chyby přístrojů a jejich zařazení do třídy přesnosti, což jsem popsal v kapitole před závěrem. Je pravdou, že moderní přístroje se snaží tyto chyby co nejvíce eliminovat. Úplně závěrem bych se chtěl pozastavit nad tím, že je o tématu zkoušení za letu zpracováno velmi málo literatury a to jak v českém, tak i v cizím jazyce, také je pravdou, že většina měřících přístrojů pro měření za letu vyrábí zahraniční firmy, u nás se tím zabývá stále velmi málo firem.

**9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

[ 1 ] DANĚK, M.: Zkoušení letadel za letu, Brno, 1962

[ 2 ] MELOUN, M-MILITKÝ, J.: *Statistické zpracování experimentálních dat*, East Publishing, Praha, 1998