

# Meranie prietoku, pretečeného množstva (8)

## Meranie rýchlosti prúdenia tekutín

Mnohé z doteraz opisovaných prietokomerov, príp. meradiel pretečeného množstva, sú založené na rýchlostnom princípe merania, teda prietok, resp. pretečené množstvo sa vypočíta dodatočne z nameranej rýchlosti prúdenia tekutiny. Meradlá, ktoré sa používajú najmä na meranie okamžitej, resp. strednej rýchlosti prúdenia tekutín sa delia na rýchlostné sondy, anemometre a krídla.

Najčastejšie využívajú zmenu kinetickej energie prúdiacej tekutiny na tlakovú (Pitotova a Prandtlova trubica a rýchlostné sondy), dynamický účinok prúdiacej tekutiny (Woltmannovo krídlo, lopatkový, resp. miskový anemometer), prípadne sa využíva ochladzovanie žeravého drôtu alebo fólie prúdom tekutiny (žeravený anemometer). Presné bezdotykové meranie rýchlosti tekutín umožňuje laserový Dopplerov anemometer.

## Rýchlostné sondy

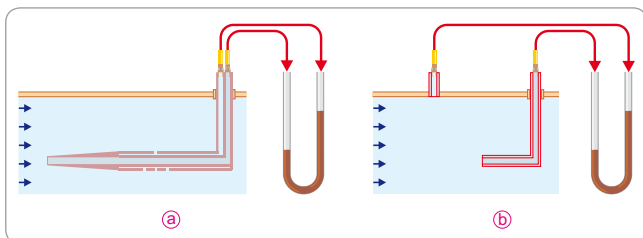
Rýchlostné sondy sú určené na meranie okamžitej alebo strednej rýchlosti prúdiacej tekutiny (najmä kvapaliny), ako aj na stanovovanie rýchlostného profilu v potrubiach, kanáloch a v riečnych korytách. Používajú sa najmä na laboratórne účely alebo na presné meranie. Využívajú pritom zmenu kinetickej energie na tlakovú.

Medzi rýchlostné sondy sa zaraďuje Pitotova a Prandtlova trubica, valcová, guľová a viacotvorová valcová sonda. Presnosť merania trubicami a sondami je ovplyvnená najmä správnou polohou ich nasmerovania. Čelo trubice, resp. sondy, sa musí presne nasmerovať do smeru prúdenia tekutiny. Odchýlenie trubice od smeru prúdu viac ako o 5° spôsobuje chybu merania, ktorá sa už nedá zanedbať.

## Pitotova trubica

Meranie rýchlosti prúdiacej tekutiny pomocou Pitotovej trubice bolo známe už v 18. storočí. Vyhotovenie sa líši podľa toho, či sa používa na meranie rýchlosti plynu (obr. 71a) alebo kvapaliny (obr. 71b). V druhom prípade sa skladá z dvoch samostatných trubic, rovnaj na meranie statického tlaku a ohnutej na meranie dynamického tlaku. Pri správnom meraní má byť os ohnutej trubice totožná s osou potrubia a má smerovať proti prúdiacemu toku. Vplyvom celkového tlaku  $p_c$  v nej vystúpi hladina tekutiny do výšky  $h_c$ . V druhej (rovnej) trubici sa meria výška hladiny tekutiny  $h_s$  (vplyv statického tlaku  $p_s$ ).

Pitotova trubica sa používa v širokom spektre aplikácií, napr. na meranie rýchlosti prúdiacej kvapaliny v otvorených kanáloch alebo v riečnych korytách.

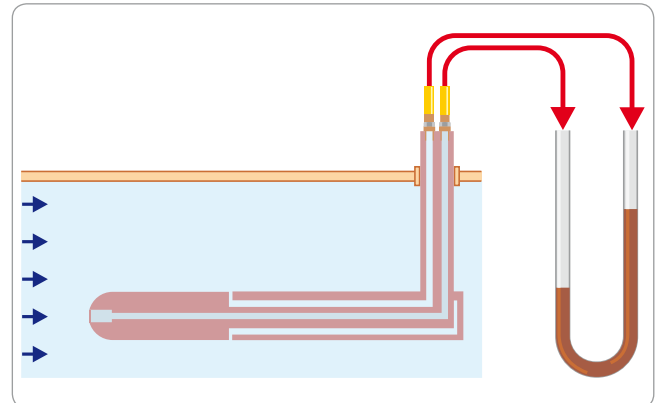


Obr. 71 Pitotova trubica a) pre plyn, b) pre kvapalinu

## Prandtlova trubica

Prandtlova trubica sa hodí najmä na meranie väčších rýchlostí prúdiacej tekutiny. Okamžitá rýchlosť prúdiacej tekutiny sa zisťuje v mieste ponoru trubice, pričom sa požaduje, aby prúdenie bolo laminárne a rovnomerné. Trubicu tvorí valcová sonda so zaobleným čelom a nosnou rúrkou, ktorá sa vysúva po celom meranom priereze (obr. 72). V čele valcovej sondy s priemerom  $d$  sa nachádza vstupný otvor. Tekutina prúdiaca týmto otvorom je vyvedená k diferenčnému manometru, pomocou ktorého sa zisťuje celkový tlak  $p_c$  prúdiacej tekutiny. Po obvode valca vo vzdialenosti  $3d$  sa nachádzajú

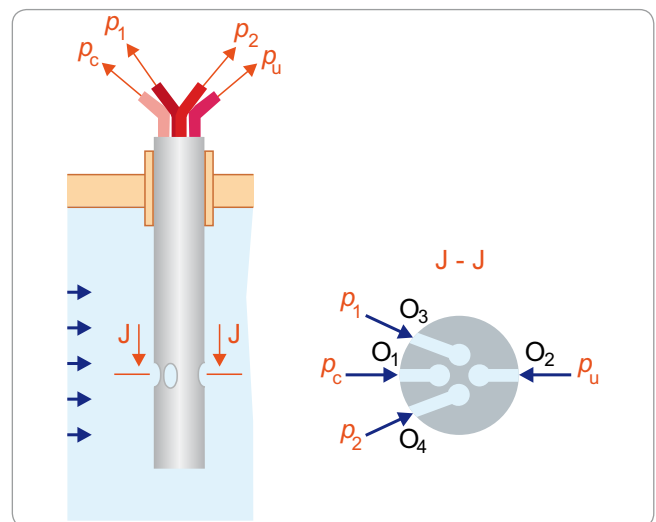
odberové otvory na snímanie statického tlaku  $p_s$ . Otvory sa umiestňujú do bodu, kde hodnota dynamického tlaku dosahuje nulu.



Obr. 72 Meranie rýchlosti prúdiacej tekutiny pomocou Prandtlovej trubice

## Valcová sonda

Valcová sonda sa používa na zisťovanie rýchlosti a smeru tekutiny pri stacionárnom dvojrozmernom prúdení. Tvorí ju valcové teleso so štyrmi otvormi  $O_1$  až  $O_4$ , ktoré ležia v jednej rovine (obr. 73). Otvorom  $O_1$  nastaveným proti smeru prúdenia sa sníma celkový tlak  $p_c$ , zadným otvorom  $O_2$  úplavový (statický) tlak  $p_u$ . Bočné otvory  $O_3$  a  $O_4$  sú umiestnené symetricky vzhľadom na pozdĺžnu os a zisťuje sa nimi smer prúdenia. Snímané tlaky sa vyvádzajú samostatnými vývrtmi k diferenčným manometrom. Otáčaním sondy v jednej rovine sa zisťuje správna hodnota smeru prúdenia tekutiny vtedy, keď budú tlaky v otvoroch  $O_3$  a  $O_4$  rovnaké, teda  $p_1 = p_2$ . Sonda býva upevnená na držiaku, pomocou ktorého sa posúva v jednej osi prierezu po celej dĺžke.

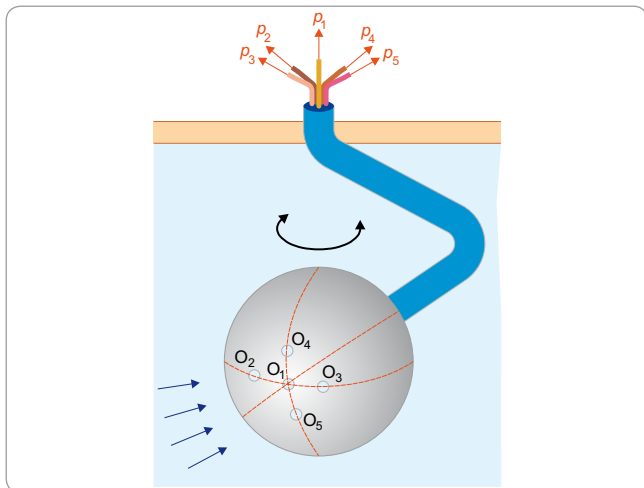


Obr. 73 Valcová sonda

## Guľová sonda

Na priestorové meranie smeru a rýchlosti stacionárneho prúdenia je výhodné použitie guľovej sondy (obr. 74). Sondu tvorí guľa s priemerom 5 mm až 10 mm s piatimi otvormi  $O_1$  až  $O_5$ , ktoré sa nachádzajú v dvoch na seba kolmých rovinách. Tlaky  $p_1$  až  $p_5$ , ktoré sa snímajú týmito otvormi, sú vyvedené samostatne vývrtmi k príslušným diferenčným manometrom. Otvorom  $O_1$  v priesečníku rovin sa sníma celkový tlak  $p_c$ . Otvory  $O_2$  a  $O_3$  sú vytvorené symetricky v horizontálnej rovine pod uhlom  $\pm 45^\circ$  vzhľadom na stredový otvor. V kolmej rovine sa nachádzajú symetricky uložené otvory  $O_4$  a  $O_5$  umiestnené pod uhlom  $\pm 50^\circ$  vzhľadom na stredový otvor. Princíp merania spočíva v natáčaní sondy tak dlho, kým sa

nerovnajú tlaky  $p_2$  a  $p_3$  (otvory  $O_2$  a  $O_3$ ) a tlaky  $p_4$  a  $p_5$  (otvory  $O_4$  a  $O_5$ ).

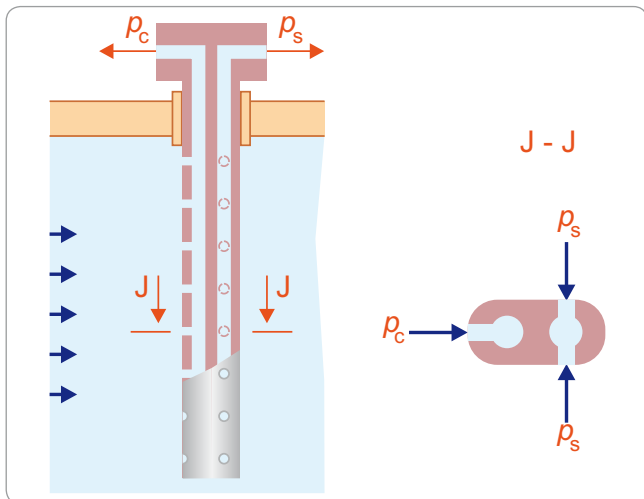


Obr. 74 Guľová sonda

### Viacotvorová valcová sonda

Viacotvorová valcová sonda sa niekedy označuje ako integračná Prandtlova trubica. Konštrukčne je prispôbená na snímanie strednej rýchlosti toku tekutín aj v prípade meniaceho sa rýchlostného profilu (obr. 75). Skladá sa z valcovej sondy, ktorá má štyri až desať otvorov na nábehovej strane a jeden otvor na bočnej strane sondy. Otvory na nábehovej strane sú rozmiestnené tak, aby sa snímala stredná hodnota celkového tlaku, napríklad podľa logaritmicko-lineárneho rozdelenia. Sú vyvedené jedným spoločným vývrtom k diferenčnému tlakomeru. Otvor na snímanie úplavového tlaku  $p_u$  je izolovaný od otvorov na nábehovej strane.

Merací rozsah býva 1,7 až 48 m/s. Sonda sa výhodne používa v prípade potrubí so štvorcovým alebo obdĺžnikovým prierezom, pretože sa v nich ťažko dajú aplikovať iné spôsoby merania rýchlostí.



Obr. 75 Viacotvorová valcová sonda

### Anemometre

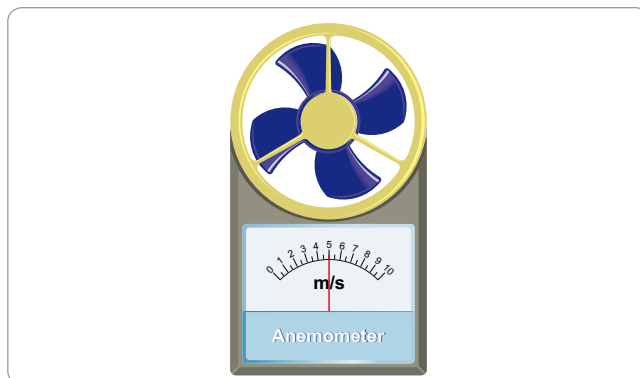
Anemometre využívajú silový účinok prúdu meranej tekutiny alebo ochladzovanie citlivej časti anemometra prúdiacou tekutinou, najčastejšie plynom. Podľa konštrukcie sa anemometre delia na mechanické, žeraviace (elektrické) a laserové.

#### Mechanické anemometre

Mechanické anemometre využívajú silový účinok prúdiacej tekutiny. Tá roztáča lopatky alebo misky upevnené na rotore, ktorého os sa umiestňuje do osi prúdenia tekutiny. Rýchlosť prúdiaceho plynu (najčastejšie vzduchu) sa zisťuje podľa frekvencie otáčania rotora apretečené množstvo podľa počtu otáčok rotora.

### Lopatkový anemometer

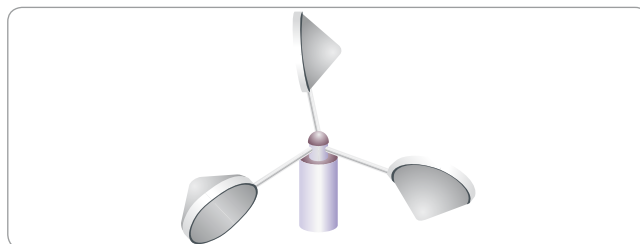
Hlavnou časťou lopatkového anemometra je hriadeľ, na ktorom sú pripevnené radiálne hliníkové lopatky so skrutkovým zakrivením (obr. 76). Používa sa najmä na meranie rýchlosti plynov, ktoré prúdia potrubím alebo kanálom, ako aj na meranie rýchlosti vetra od 0,1 až do 30 m/s. Nehodí sa na meranie pulzujúceho prúdu a pri rýchlosti nad 30 m/s je nespoľahlivý.



Obr. 76 Lopatkový anemometer

### Miskový anemometer

Miskový anemometer, známy ako Robinsonov miskový kríž (obr. 77), sa používa na meranie strednej rýchlosti prúdiaceho plynu. V meteorologických stanicích slúži na orientačné určovanie rýchlosti vetra. Jeho merací rozsah pokrýva 1 až do 75 m/s.

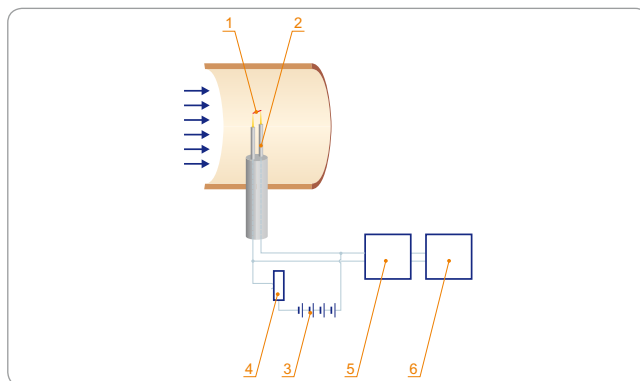


Obr. 77 Miskový anemometer

### Žeraviace anemometre

Žeraviace anemometre sú v podstate elektrické rýchlostné sondy, ktoré slúžia na bodové meranie miestnych rýchlostí prúdiacich tekutín, najčastejšie plynov. Tvar i konštrukcia žeraviacich anemometrov býva rôzna, majú však spoločný princíp merania: ohriate teleso, ktoré sa vloží do prúdiacej tekutiny, sa ochladzuje tým intenzívnejšie, čím je vyššia rýchlosť prúdenia tekutiny.

Snímaciu časť žeraviaceho anemometra môže tvoriť buď tenké vlákno alebo tenký film. Tento drôt, resp. film, sa môže žeraviť konštantným prúdom, takže ho prúdiaca tekutina ochladzuje a mení jeho odpor, ktorý sa meria. Inou možnosťou je udržiavanie



Obr. 78 Žeraviaci anemometer s kovovým vláknom, napájaný konštantným prúdom  
1 – vlákno, 2 – držiak 3 – zdroj, 4 – odpor, 5 – zosilňovač, 6 – vyhodnocovacia jednotka

konštantného odporu, a teda aj teploty snímacieho prvku premenlivým napájacím prúdom.

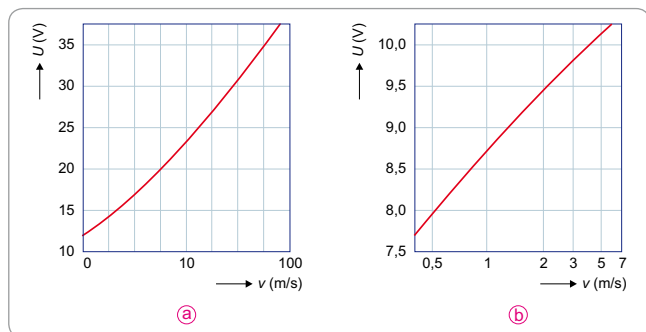
V skupine žeraviacich anemometrov s tenkým vláknom (obr. 78) tvorí snímaciu časť volfrámové, platinové, resp. platino-irídiové vlákno 1. Na teplotu 200 °C až 500 °C ho zohrieva konštantný prúd zo zdroja 3. Zmena teploty vlákna sa prejaví v zmene jeho ohmického odporu. Meranie je jednoduché a používa sa pri pomalých rýchlostných zmenách, najmä v prípade pomaly prúdiacich tekutín.

V prípade merania žeraviaceho prúdu pri konštantnej teplote vlákna (teda pri konštantnom odpore) je snímač zabudovaný priamo vo Wheatstonovom mostíku ako jeden z odporov. Regulačným odporom sa udržuje konštantný odpor snímača. Takéto usporiadanie sa používa na meranie pri dynamických zmenách rýchlosti prúdenia do 300 m/s. Časová konštanta môže byť veľmi malá, až 0,002 s.

Výhodou žeraviaceho anemometra s tenkým drôtikom sú malé rozmery, nevýhodou je náchylnosť na mechanické poškodenie.

Závislosť sklonu snímača od smeru prúdenia sa určuje kalibrovaním v rôznom stacionárnom prúdení. Typická statická charakteristika kovového anemometra pre prúdiaci vzduch je na obr. 79a.

Žeraviace anemometre s kovovou fóliou sa osvedčili najmä pri meraní rýchlosti prúdenia kvapalín a pri meraní rýchlo prúdiacich plynov. Používa sa fólia s hrúbkou približne 2 µm. Typická statická charakteristika fóliového anemometra pre prúdiacu vodu je na obr. 79b. Niektoré vyhotovenia snímacích prvkov s tenkou fóliou predstavuje obr. 80. V jednom prípade pritom ide o fóliu obalenú okolo drôtika, takže pripomína predchádzajúci typ žeraviaceho anemometra s tenkým drôtikom. Fóliové anemometre sa hodia najmä na dynamické merania.



**Obr. 79** Kalibračné krivky žeraviacich anemometrov  
a) kovový anemometer pre vzduch, b) fóliový pre vodu



**Obr. 80** Rôzne vyhotovenia snímacích prvkov s tenkou fóliou

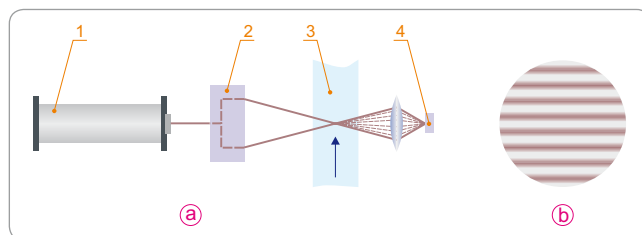
### Laserový Dopplerov anemometer (LDA)

Prostredníctvom laserového Dopplerovho anemometra sa bezdotykovovo meria bodová rýchlosť prúdiacej tekutiny v opticky priehľadnom prostredí. Používa sa v laboratórnej aj v priemyselnej praxi. Pri svojej činnosti využíva Dopplerov jav (obr. 81a). Základnou časťou anemometra je laser 1, ktorého lúč sa pomocou optiky 2 rozdeľuje na dve časti. Tie sa zbiehajú v bode, v ktorom sa má merať rýchlosť prúdiacej tekutiny 3. Obidva lúče majú rovnakú frekvenciu. Molekuly meranej tekutiny, ako aj čiastočky ňou unášané prechádzajú cez bod, v ktorom sa lúče križujú a čiastočne odrážajú, resp. rozptyľujú, svetlo obidvoch lúčov. Rýchlosť prúdiacich častí spôsobuje, že odrazené svetlo má pri obidvoch lúčoch inú frekvenciu. Svetlo rozptýlené z lúča, ktorý mieri po prúde tekutiny, má vyššiu frekvenciu, svetlo rozptýlené z lúča mieriaceho proti

prúdu tekutiny má nižšiu frekvenciu. Svetlo z obidvoch lúčov s odlišnými frekvenciami navzájom interferuje a pritom vytvára tretiu frekvenciu. Tá je priamo úmerná zložke rýchlosti, ktorá je v rovine lúčov kolmá na os uhla obidvoch lúčov. Pritom sa tvorí interferenčná mriežka, kde sa striedajú svetlejšie a tmavšie pruhy (obr. 81b). Pruhy sníma fotočlen 4 a generuje elektrický signál úmerný rýchlosti prúdenia tekutiny. Vzďialenosť medzi pruhmi závisí iba od vlnovej dĺžky svetla lasera a od uhla medzi obidvoma lúčmi. Po vynásobení vzdialenosti medzi pruhmi frekvenciou výstupného elektrického signálu dostaneme rýchlosť prúdenia.

Takýmto spôsobom sa meria jedna zložka rýchlosti prúdiacej tekutiny. Na meranie všetkých troch zložiek rýchlosti sa používajú viacrozmerné LDA. V každom prípade treba pri meraní dbať na použitie vhodného polohovacieho zariadenia umožňujúceho presnú identifikáciu bodu, v ktorom sa meria rýchlosť prúdiacej tekutiny. Výhodou laserového Dopplerovho anemometra je veľký merací rozsah.

V priemyselnej praxi sa dá LDA použiť na určenie prietoku plynov vo veľkých rozvodných potrubiach. Zisťuje sa rýchlostný profil, z ktorého sa odvodza objemový prietok plynu. Takéto riešenie dovoľuje zníženie chyby merania na 1 % pri priemere potrubia až 1 500 mm.

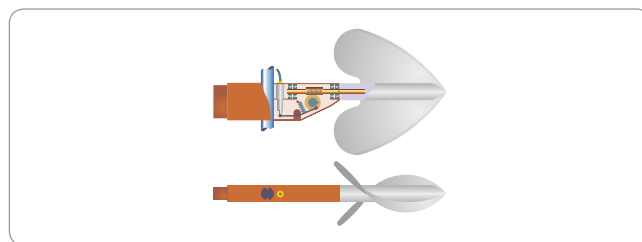


**Obr. 81** Laserový Dopplerov anemometer  
a) schematické znázornenie činnosti, b) interferenčná mriežka  
1 – laser, 2 – optika, 3 – prúdiaca tekutina, 4 – fotočlen

### Hydrometrické krídlo

Hydrometrické (tzv. Woltmannovo) krídlo nachádza široké uplatnenie pri meraní rýchlosti kvapalín (najmä vody) v otvorených kanáloch a riečnych tokoch. Najčastejšie sa skladá z dvoch až štyroch lopatkových plôch v tvare lodnej skrutky (obr. 82). Tvar lopatiek je navrhnutý tak, aby bol prístroj čo najcitlivejší a aby bola začiatočná rýchlosť kvapaliny potrebná na roztočenie krídla čo najmenšia. Otáčky rotora sa prevádzajú cez prevod na počítadlo.

Krídlo meria rýchlosť iba v jednom mieste prietoku, preto treba na určenie strednej rýchlosti prúdu vyjadriť rýchlostný profil. Používa sa v rôznych vyhotoveniach. Nechránené býva upevnené na pevnej nosnej tyči alebo zavesené na lanku. Konštanty meradla sa určujú experimentálne v laboratórnych kanáloch s daným typom prúdenia.



**Obr. 82** Hydrometrické krídlo

**doc. Ing. Martin Halaj, PhD.**

Slovenský metrologický ústav  
Karloveská 63, 842 55 Bratislava 4  
halaj@smu.gov.sk

**doc. Ing. Eva Kureková, PhD.**

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Strojnícka fakulta  
Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava  
eva.kurekova@stuba.sk