

ČESKÁ KALIBRAČNÍ STANICE VODOMĚRNÝCH VRTULÍ

Nežádoucí jevy v procesu
kalibrace a jejich eliminace

Libuše Ramešová | Daniel Mattas

Vydal Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka,
veřejná výzkumná instituce

Praha 2010

Vědecká redakce:

Ing. Šárka Blažková, DrSc., prof. Ing. Alexander Grünwald, CSc.,
doc. Ing. Aleš Havlík, CSc., prof. Ing. Pavel Pitter, DrSc.,
prof. RNDr. Alena Sládečková, CSc., prof. Ing. Jiří Zezulák, DrSc.

Lektoroval:

doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Publikace vznikla v rámci úkolu 9044 Kalibrace vodoměrných vrtulí. Některé dílčí práce, použité v této publikaci, vznikly s podporou výzkumného záměru MSM 6840770002 „Revitalizace vodního systému krajiny a měst zatíženého významnými antropogenními změnami“.

© Libuše Ramešová, Daniel Mattas, 2010

ISBN 978-80-87402-09-2

Obsah

Úvod	4
Historie	5
Vodoměrné vrtule a další přístroje pro měření rychlosti proudění	16
Hydrometrické vrtule	16
Jiné přístroje pro měření rychlosti proudění.....	21
Vybavení ČKSVV.....	21
Metoda kalibrace vodoměrných vrtulí.....	27
Kalibrační list	29
Nejistota kalibrací	36
Chyby měření a nejistota měření	42
Chyby měření.....	42
Nejistota měření.....	45
Stanovení nejistoty měření pro odhad vstupních hodnot	46
Výpočet standardní nejistoty odhadu výstupní veličiny	48
Rozšířená nejistota měření	50
Návaznost	50
Nejistoty měřicího systému ČKSVV	51
Měření času a jeho nejistota.....	51
Měření počtu otáček a jeho nejistota.....	52
Měření dráhy a jeho nejistota	52
Stanovení nejistoty odhadu výstupních veličin	54
Výpočet nejistot výsledných veličin	55
Epperův efekt	57
Vliv teploty.....	58
Vliv uklidňovací doby mezi jednotlivými jízdami vozíku	61
Vliv upevnění vrtule a její polohy ve žlabu	61
Vliv opotřebení vrtule a její údržby	63
Nejistota měřidla	66
Výzkumné práce provedené ve VÚV v souvislosti s kalibracemi vodoměrných vrtulí.....	69
Jiné výzkumné práce provedené v kalibračním žlabu.....	70
Czech Calibration Station for Current Meters	73
Souhrn	75
Literatura	77

Úvod

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., oslavil v roce 2009 již 90 let od svého založení. Chceme při tomto výročí připomenout jednu důležitou činnost, kterou VÚV vykonává od otevření své první budovy v Praze-Podbabě roku 1930. Je to činnost veřejnosti sice málo známá, ale přesto nezbytná, protože zajišťuje přesná měření průtoků v nejrůznějších oblastech vodního hospodářství i jiných oborech. Touto činností je kalibrace hydrometrických vrtulí a dalších přístrojů, které lze kalibrovat ve smyslu ČSN ISO 3455 a ČSN ISO 2537. O tom, že se jedná o činnost zásadního významu, svědčí i to, že ji má VÚV jmenovitě uvedenou ve svém statutu.

Kvalita hydrologických údajů pro bilanční hodnocení zásob vody v povrchových tocích potřebných pro aktuální údaje hydrologické přepovědní služby i pro manipulační řády vodních děl je plně závislá na spolehlivé kalibraci používaných přístrojů. Nejspolehlivější a nejpresnější metodou pro měření průtoku vody ve vodních tocích je na celém světě metoda vycházející z proměrování rychlostních polí pomocí vodoměrných vrtulí. Podmínkou však zůstává, že kalibrace vodoměrných vrtulí musí být naprosto perfektní.

Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí (ČKSVV) ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka (VÚV TGM) v Praze je jediná kalibrační stanice svého druhu v České republice. Tato stanice provádí kalibraci vodoměrných vrtulí především pro Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) a dále pak pro podniky Povodí a ostatní zájemce.

Na základě trvalého požadavku Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) má každá kalibrační stanice vodoměrných vrtulí uskutečnit vlastní projekt (šetření) pro eliminaci nežádoucích jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí.

V návaznosti na trvalou výzvu Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) se ČKSVV od roku 1999 podílí na postupném odstraňování nežádoucích jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí. ČKSVV se svým vybavením (otevřená přímá nádrž o rozměrech 270 x 2,5 m s hloubkou vody 1,8 m; kalibrační vozík s pracovním rozsahem rychlostí pojezdu 0,02–10 ms⁻¹, v současnosti z provozních důvodů omezené na 7,0 ms⁻¹) řadí na jedno z předních míst v Evropě.

Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí reagovala na výzvu ISO, a to především řešením zakázky Ministerstva životního prostředí ČR (MŽP ČR) pod názvem Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí. Cílem úkolu je zabezpečení podmínek pro sladění kalibrace vodoměrných vrtulí s normami a předpisy EU a ISO. Víme, že voda je dnes strategickou surovinou, a tak dosažení tohoto cíle nabývá stále více na významu, a to nejen z hlediska členství ČR v NATO a EU. Podrobná analýza nás vedla k úsudku, že tohoto cíle lze dosáhnout jedině tím, když v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí bude dosaženo eliminace celého komplexu nežádoucích jevů ovlivňujících přesnost kalibrace.

Na následujících stránkách bychom chtěli tuto činnost přiblížit zájemcům z řad odborné i laické veřejnosti.

Kromě této brožury mají zájemci možnost se o České kalibrační stanici vodoměrných vrtulí informovat na internetových stránkách <http://cksvv.vuv.cz>.

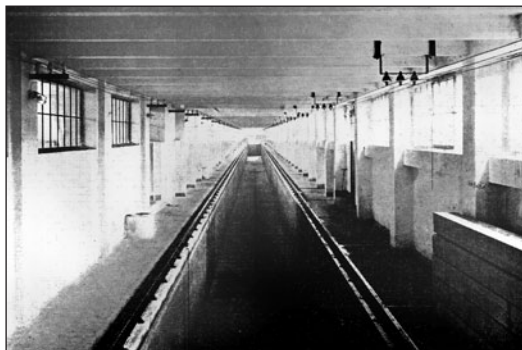
Historie

Historie kalibrací hydrometrických přístrojů v našem ústavu se datuje od okamžiku otevření nové budovy tehdy Státního výzkumného ústavu hydrotechnického v Praze-Podbabě vedle plavebního kanálu u Trojského jezu, a to roku 1930. Od té doby až dodnes je kalibrace hydrometrických vrtulí a dalších obdobných přístrojů stabilní činností, kterou ústav poskytuje svým zákazníkům.

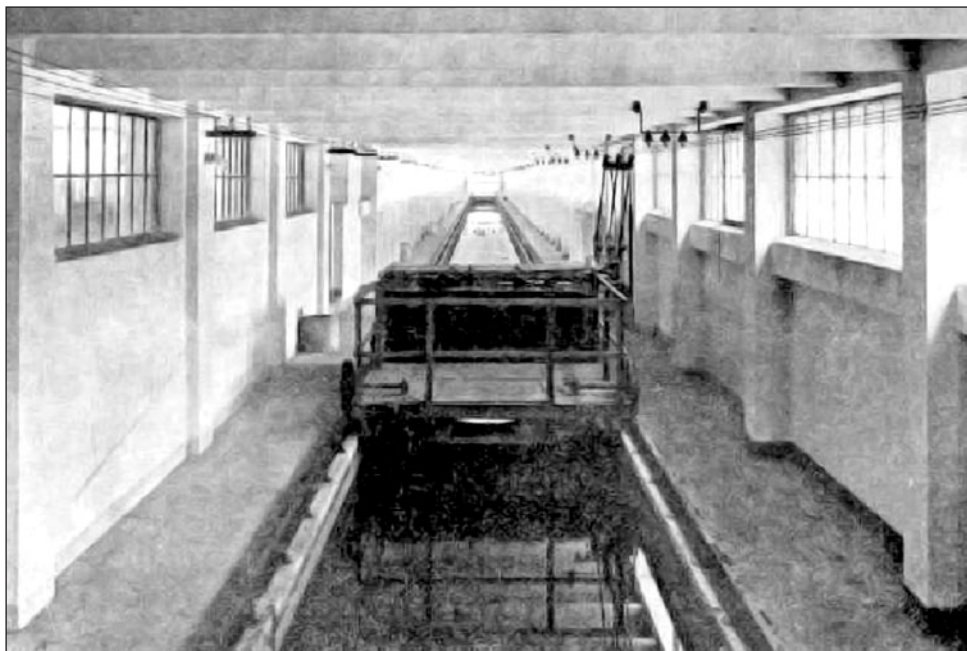
Zde je na místě zmínit, že vůbec první kalibrační trať v moderním pojetí vybudoval profesor pražské techniky a přednosta hydrometrické sekce Hydrografické komise pro království České A. R. Harlacher, jehož jméno je nerozlučně spjato s historií hydrometrie jako vědního oboru, roku 1875 v pražském vltavském přístavu. Trať měla 80 m dlouhou kolejovou dráhu, po níž pojížděl vozík s ručním pohonem. Až roku 1896 byly uvedeny do provozu kalibrační stanice ve Vídni a v Bernu, vybavené speciálními žlaby. Ve Vídni byly také až do zahájení provozu naší kalibrační stanice kalibrovány hydrometrické vrtule používané u nás.

Základním prvkem kalibrační laboratoře je velký hydraulický žlab o šířce 2,5 m a využitelné délce 152,5 m s hloubkou vody 1,8 m (jeden z největších v Evropě). Byl vybudován v rámci výstavby nové budovy ústavu (tehdy Státních výzkumných ústavů hydrologického a hydrotechnického T. G. Masaryka), která byla předána do provozu v roce 1930. Žlab je napájený vodou z Vltavy, stálou hladinu zajišťuje oboustranný přeliv ve vtokové části. Je možné jej uzavřít stavidly, takže voda v něm je zcela klidná. Po stranách žlabu jsou osazeny přímé vodorovné kolejnice. Po kolejích pojíždí vlečný vozík určený pro kalibrace vrtulí, ale dovolující i vlečení dalších těles v klidné vodě, např. pro stanovení hydrodynamických odporů lodí apod. Pro kalibrace vrtulí se využívá jen střední část žlabu v délce ca 100 m. Vlastní žlab (resp. jeho stavební část) se během let od doby výstavby téměř nezměnil, měnilo se však, a to i dosti radikálně, technické vybavení, zejména vozík a zařízení pro sběr dat.

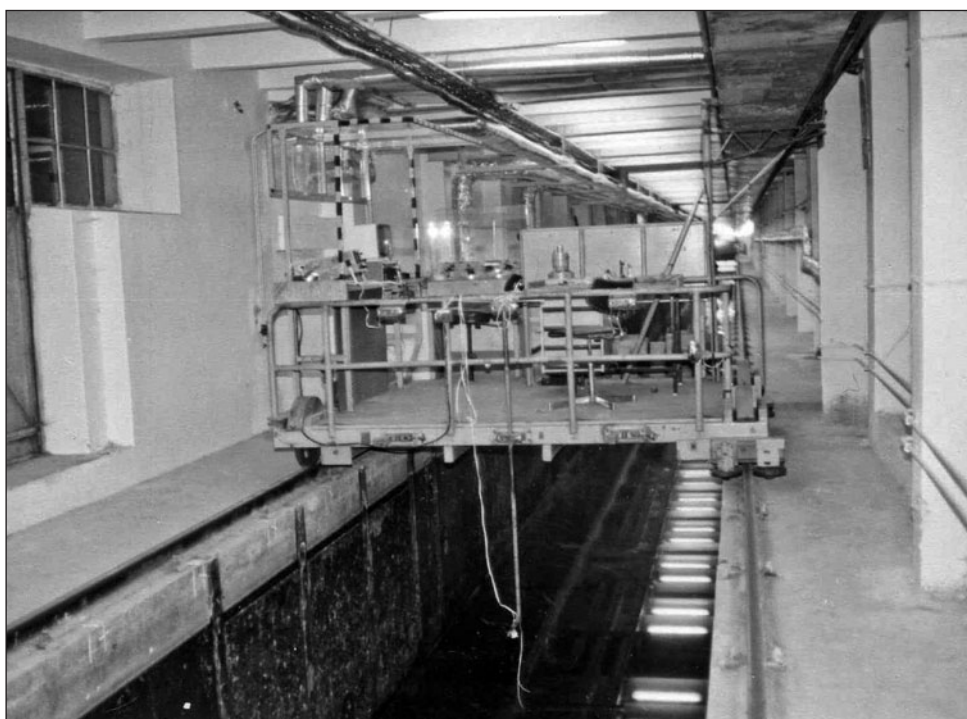
Původní vozík (podle tehdejší terminologie elektrická lokomotiva), vyrobený firmou Českomoravská-Kolben-Daněk roku 1930, měl elektrický pohon s regulací rychlosti mechanickou dvoustupňovou převodovkou a regulací obrátek motoru Ward-Leonardovým soustrojím. Rozmezí rychlostí pojezdu vozíku bylo 0,02–6,0 ms⁻¹. Snímání dráhy bylo zajištěno mechanicky – ve stojině levé kolejnice byly osazeny



Kalibrační žlab roku 1930 (vlevo), kalibrační žlab v současnosti (vpravo)



Původní vozík Českomoravská-Kolben-Daněk



Vozík Kempf-Römmers



Chronograf

železné válečky o rozteči 5 m, na které naráželo pružné pero. Registračním zařízením byl tříkanálový chronograf od známé firmy Ott v Kemptenu, zaznamenávající na papírový pás impulzy registrující projetou dráhu, čas ve vteřinách a počet obrátek, resp. impulzů hydrometrické vrtule.

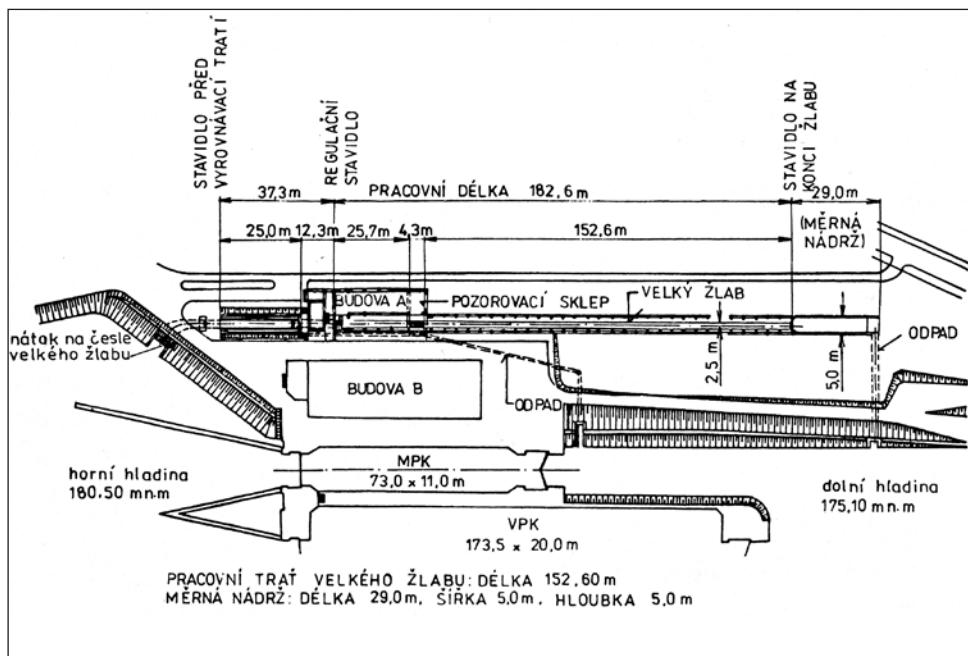
Tento první vozík byl roku 1962¹ nahrazen modernějším vozíkem německé firmy Kempf-Römmers. Systém řízení rychlosti Ward-Leonardovým soustrojím i její rozsah byly shodné s vozíkem původním, ale v podstatně modernějším provedení. Spolu s vozíkem byl zřejmě dodán i nový chronograf, umožňující současnou kalibraci tří vrtulí; projatá dráha byla snímána samostatným kolem pojíždějícím po kolejnici. V této době (1. polovina 60. let) byla značná pozornost věnována i stavební stránce žlabu, podle dochovaného materiálu zřejmě v té době dosti zanedbaného. Současně bylo snahou tehdejšího vedoucího kalibrační stanice Zdeňka Hubáčka optimalizovat práce při kalibracích vrtulí i způsob vyhodnocení kalibračních konstant. Byla též zavedena kartotéka vrtulí (bohužel zničená za povodně r. 2002). Vzhledem k tomu, že VÚV standardně prováděl prvotní kalibrace vrtulí typu FB-1 vyráběných ca od roku 1950 v n. p. Metra, z nichž značná část byla exportována do zahraničí, bylo navrženo a zhotoveno šestijazyčné cejchovní osvědčení, které se používalo až do začátku 90. let.

V roce 1965 byl uveden do zkušebního provozu prototyp elektronického záznamového zařízení, vyvinutého ve VÚV Ing. V. Sotorníkem, CSc. (čs. patent č. 127621),

¹ Vzhledem k povodni v srpnu 2002, která měla za následek totální zničení archivu ČKSVV, jsou informace i data založena převážně na základě vzpomínek pamětníků, takže nemusí být zcela přesná.



Elektronická aparatura Ing. Sotorníka



Umístění velkého žlabu vedle plavebních komor Praha-Subbaba



Vnitřní prostor kalibračního žlabu (stav 20. 4. 1994)



*Celkový pohled na vyrovnávací trať velkého žlabu v době přestavby areálu ústavu
(stav 20. 4. 1994)*

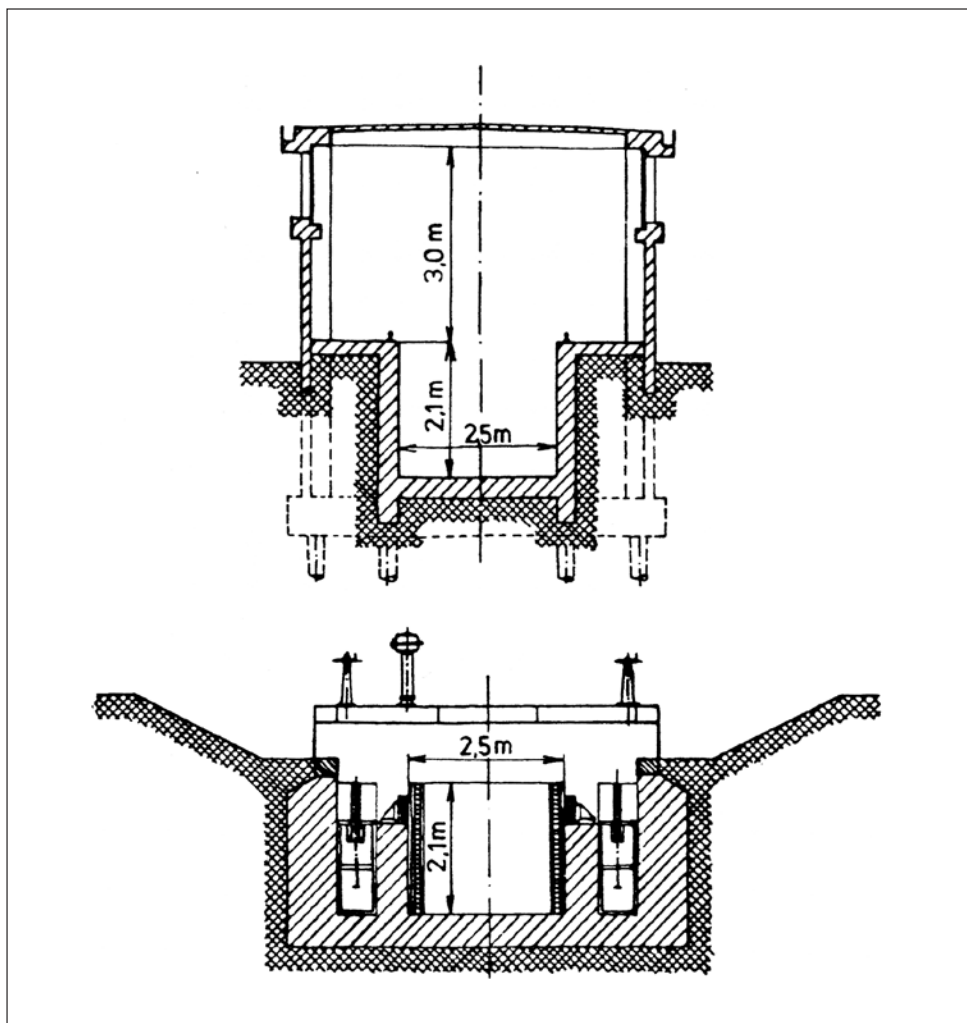
kteře po uvedení do řádného provozu nahradilo původní chronograf s mechanickým snímáním dráhy. Aparatura umožňovala současný sběr dat ze tří vrtulí. Základním přínosem systému byla, kromě výrazného zjednodušení vyhodnocení dat, možnost předvolby počtu impulsů vrtule a určení kalibrační dráhy pomocí dlouhého kovového pásu se čtvercovými otvory po 0,05 m s optoelektronickým snímáním. Tento systém se natolik osvědčil, že je (v poněkud modifikované podobě) používán dodnes. Počítadla otáček i počítadla impulsů dráhy byla elektromechanická, časovou základnu představovaly krystalové křemenné hodiny s číslicovým výstupem na digitrony, s rozlišením času 0,01 s. Přenos dat z vozíku do velínu umístěného vedle žlabu (zařízení bylo dosti objemné a ke správnému a bezporuchovému provozu vyžadovalo přiměřenou teplotu a vlhkost) byl prováděn bezdrátově vysílačem o malém výkonu.

V téže době začal být využíván i číslicový počítač CELLATRON Ser 2b pro výpočet tabulek $v = f(n)$, které byly přikládány k cejchovním osvědčením.

Během doby elektronika dosloužila. Zařízení Ing. Sotorníka značně překročilo svou životnost, což se projevovalo častými poruchami zejména počítadel, takže bylo nutno přistoupit k radikálnímu řešení situace. V oddělení měřicí techniky a elektroniky VÚV vypracoval Ing. J. Zaujec pod vedením RNDr. Ing. P. Čížka, CSc. (vedoucího oddělení) v roce 1986 ideový návrh a v roce 1987 postavil a uvedl do provozu nové zařízení na bázi průmyslového osmibitového počítače SAPI-1. Zařízení se osvědčilo a během doby byl tento prototyp až do tragické smrti jeho autora průběžně zlepšován. Stále však zůstával problém zpracování kalibračních dat, která se musela opisovat z televizního přijímače, sloužícího jako monitor, do formulářů a zpočátku se dále vyhodnocovala semigraficky. S nástupem počítačů třídy PC bylo roku 1991 zavedeno



Původní vozík Dicont



Typické příčné řezy velkého žlabu v pracovní trati a vyrovnávací trati

automatizované zpracování dat, program vypracoval Ing. P. Šnederfler. To sice bylo výrazným pokrokem proti dříve používanému graficko-početnímu vyhodnocení konstant kalibračních rovnic, ale přenosem dat z monitoru zařízení do formuláře a z formuláře do počítače narůstalo nebezpečí vzniku chyb, nehledě na to, že tento způsob práce byl značně neefektivní.

Také vlečný vozík posléze dosáhl stavu, kdy již bylo značně obtížné jej udržovat v provozu, a kromě toho elektronické zařízení na bázi SAPI-1 s rozvojem výpočetní techniky rychle morálně zastaralo. Proto se začalo uvažovat o komplexní inovaci celého zařízení kalibrační stanice. Ta měla zahrnovat nový vozík již s digitálním řízením a automatizovaný sběr dat s návazným vyhodnocením kalibračních rovnic. V roce 1995 se podařilo zajistit finanční prostředky pro rekonstrukci technického vybavení a byl zpracován ideový návrh řešení. Projekt nového vozíku a jeho výrobu

včetně systému pro řízení a sběr dat a jejich přenos do centrálního velínu zajistila firma DICONT, a. s. Vzhledem k ne příliš přívětivým podmínkám v prostorách kalibračního žlabu (zejména v zimním období) bylo zajištěno, aby mohl být tento nový vozík ovládán nejen přímo, ale i dálkově z velínu. Přenos dat mezi vozíkem a velínem byl řešen optoelektronicky, IČ prvky. Zákaznický software pro automatizované zpracování dat zajistila firma Hardware Software. V prosinci roku 1996 byl vozík nainstalován a po úspěšném odzkoušení bylo celé zařízení v únoru 1997 uvedeno do pravidelného provozu. Vzhledem k tomu, že parametry zařízení dosahovaly špičkové úrovně, zažádala ČKSVV v roce 1997 ČIA, o. p. s., o akreditaci jako kalibrační laboratoř a v témže roce byla úspěšně akreditována pod číslem laboratoře 2278.

V srpnu roku 2002 byl ústav postižen katastrofální povodní, která měla za následek totální devastaci prostor i zařízení kalibrační stanice. Vlastní žlab sice povodeň přestál bez vážnějších škod, ale veškeré vybavení bylo zcela zničeno. Za své vzal, bohužel, i rozsáhlý archiv kalibrační stanice. Znalecký posudek týkající se rentability opravy kalibračního vozíku prokázal, že cena případné opravy kalibračního vozíku zasaženého povodní by s vysokou pravděpodobností dosáhla ceny nového vozíku. Zároveň bylo důrazně upozorněno, že v případě opravy nemusí kalibrační vozík dosáhnout ani parametrů a vlastností, jež měl před povodní. V důsledku toho bylo v ústavu rozhodnuto o pořízení nového kalibračního vozíku. Přitom se cíleným úsilím mnoha pracovníků ústavu podařilo dosáhnout toho, že ČKSVV má dnes kalibrační vozík vskutku nové generace. Při návrhu vozíku a jeho stavbě byly uplatněny zkušenosti z provozu



Jeřábek pro evakuaci vozíku



Vrtule Ott C-31 se závažím 5 kg



Vrtule se závažím na stabilní hydrometrické lanovce v profilu Nespeky



Pohled na ústav a ÚČOV Praha po kulminaci povodně 2002



Kalibrační vozík po povodni 2002

předcházejících kalibračních vozíků v ČKSVV (nový vozík je od roku 1930 již čtvrtým kalibračním vozíkem v pořadí) i poznatky z provozu kalibračních laboratoří (stanic) v zahraničí, které v posledních letech pracovníci ČKSVV navštívili (Švýcarsko, Německo, Maďarsko, Slovensko).

Nový vozík ve zdokonalené verzi, s příslušnou elektronikou pro řízení provozu a sběr dat, dodala opět osvědčená firma DICONT, a. s. Spojení vozíku s velínem je nyní řešeno pomocí WiFi LAN. Protože v rámci stavebních úprav žlabu došlo i k přesunu velínu o poschodí výše (nad úroveň hladiny 100leté povodně), byl žlab vybaven kamerovým systémem, dovolujícím vizuální kontrolu při automatickém bezobslužném provozu. Nový systém byl po úspěšných zkouškách uveden do provozu v lednu 2005. V rámci stavebních úprav prostor žlabu byla též provedena opatření, která umožňují v případě vyhlášení povodňového nebezpečí evakuaci vozíku z prostoru žlabu na střechu ústavní kotelny. V prosinci roku 2006 byla provedena generální oprava kolejové dráhy vozíku včetně rektifikace a přebroušení kolejnic.

Vodoměrné vrtule a další přístroje pro měření rychlosti proudění

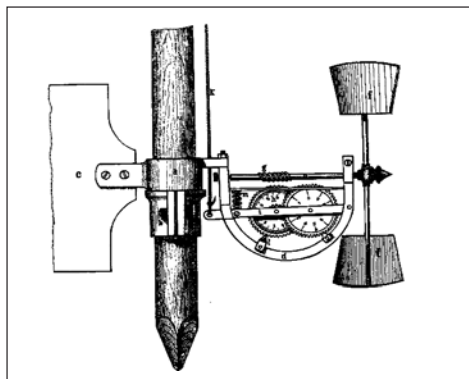
Hydrometrické vrtule

Hydrometrické (či vodoměrné) vrtule jsou i přes rozvoj systémů založených na jiných principech dodnes nejpoužívanějšími přístroji pro měření rychlosti vody i průtoků metodou rychlostního pole (též rychlost-plocha) v hydrologii a vodním hospodářství.

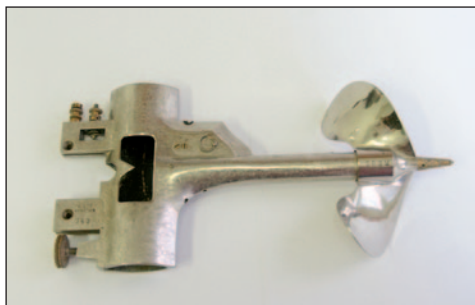
Hydrometrická vrtule je poměrně jednoduchý mechanický přístroj dovolující určit rychlost proudění na základě změřeného počtu otáček za určitou dobu, přičemž závislost rychlosti na frekvenci otáčení je v zásadě lineární.

První hydrometrickou vrtuli dnes používaného typu navrhl Reinhard Woltmann v roce 1877. Měla horizontální osu s propelerem tvaru lopatkového kola se dvěma šikmými lopatkami a mechanickým počítadlem otáček. Přístroj začal být brzy široce využíván a mnoha autory upravován a vylepšován, zejména se změnil tvar propelerů z lopatkových kol na propelery šroubovicové, používané dodnes (úpravu navrhl Trevianos kolem roku 1820). Profesor Harlacher vybavil roku 1871 vrtuli elektrickou signalizací otáček, na kterou posléze získal patent. Harlacher ve spolupráci s Amslerem zavedl též upevnění vrtule na závaží s lanovým závěsem.

S vývojem vrtulí je neodmyslitelně spojeno jméno Ott. Počátek firmy není zcela jasný. Na firemních stránkách se dočteme, že Albert Ott založil roku 1873 „Mathematisch-Mechanisches Institut A. OTT“ v bavorském Kemptenu a tato firma začala roku 1875 vyrábět i hydrometrické vrtule. Oproti tomu Fraser uvádí, že Albert



Původní Woltmannova vrtule (podle Kolupaily)



Vrtule Ott typ IV



Vrtule Ott Texas



Vrtule Metra FB-1



Priceova vrtule

Ott spolu s G. Coradim založili roku 1873 společnou firmu v bavorském Kemptenu, přičemž Coradi odešel roku 1880 do Curychu, kde založil firmu vlastní. A. Ott začal roku 1881 na doporučení Harlachera vyrábět vrtule s elektrickou signalizací, na níž měl Harlachera patent.

Firma Ott produkuje vrtule dodnes, i když současný název firmy je Ott Messtechnik. Firma během doby vyvinula řadu typů vrtulí, které se zapsaly do historie – zejména Typ V, jehož výroba začala ve 30. letech, a z něj odvozený typ známý pod jménem Texas, který byl vyráběn ještě v 70. letech minulého století. S firmou spolupracovala řada významných odborníků, kteří měli velký vliv na vývoj přístrojů. Jedním z nejznámějších byl Steponas Kolupaila, který po sovětské okupaci Litvy pracoval



Měřidlo Flow Probe FP311 – celkový pohled a detail propelleru

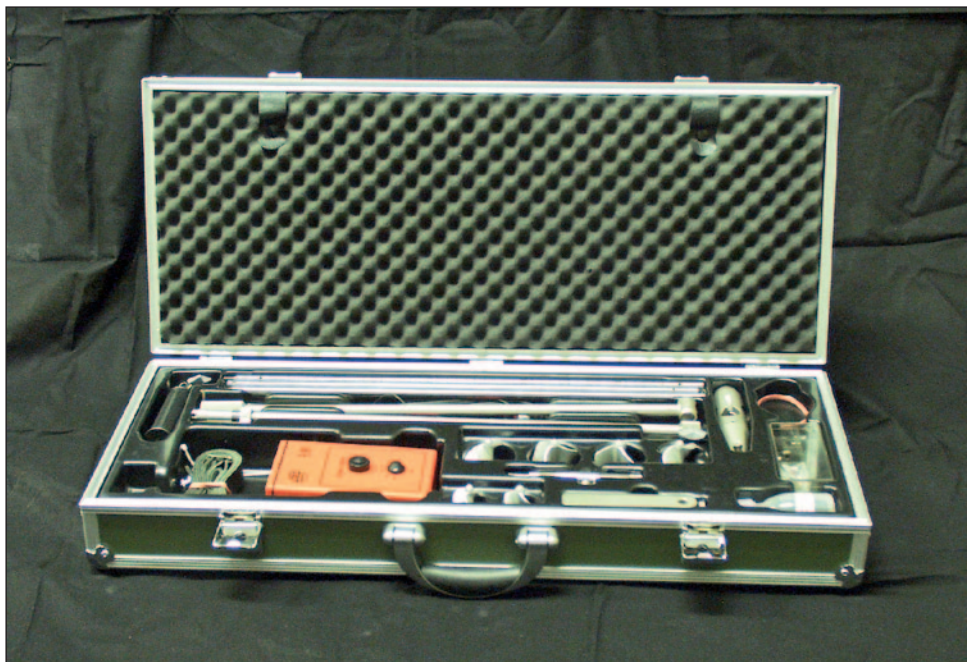
u firmy Ott v letech 1940–1944 a kromě jiného zde vyvinul tzv. komponentní propeler, který je součástí všech moderních vrtulí.

Kromě firmy Ott existovala řada dalších výrobců (ze známějších např. Amsler, Ganser, SEBA, NEYRPIC, ale i tuzemská Metra, v 80. letech vyráběl vrtule i Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava, několik typů vrtulí se vyrábělo v bývalém SSSR). Z nich do dnešních dnů zřejmě přečkala jenom SEBA; jaká je současná situace v zemích bývalého SSSR, lze těžko říci. Kromě těchto klasických firem však existuje i řada dalších, které vyrábějí hydrometrické vrtule i jiných, často dosti netradičních typů (viz např. měřidlo Flow Probe).

Kromě klasických i neklasických vrtulí určených pro hydrometrická měření na vodních tocích se vyrábějí i speciální vrtule pro měření v laboratořích (např. na hydraulických modelech), které mají propelery značně menší než standardní vrtule a často mají i jiný způsob snímání otáček. Stejně tak existují i speciální vrtule používané v oceánografii pro měření rychlosti mořských proudů.

Vrtule Woltmannova typu je specifická zejména pro Evropu. Vývoj v Americe, jmenovitě ve Spojených státech, šel poněkud jinou cestou – roku 1885 americký inženýr W. G. Price patentoval svůj typ vrtule se svíslou osou, jehož uspořádání bylo velmi podobné miskovému anemometru.

Klasická Priceova vrtule ve tvaru používaném v současnosti (tzv. typ AA) má propeler složený ze šesti kornoutů uspořádaných na obvodu kružnice tak, že osy kornoutů jsou tečné k této kružnici. Kromě těchto klasických typů se v USA často používá i „kapesní“ typ, tzv. Pygmy, který je menších rozměrů.



Kompletní souprava vrtule Ott C-2

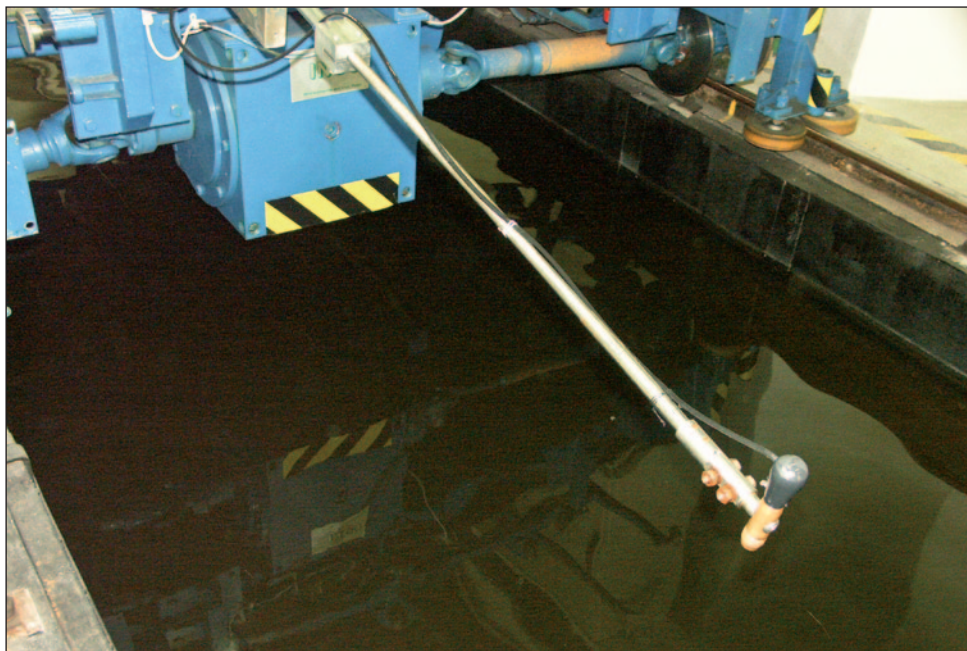


Elektromagnetické měřidlo Ott Nautilus 2000

Zásadní rozdíl mezi oběma typy spočívá v tom, že vrtule Woltmannova typu reaguje správně pouze na rychlost, jejíž směr je rovnoběžný s její osou, zatímco u Priceovy vrtule na směr vektoru rychlosti v horizontální rovině nezáleží. To má dosti zásadní důsledky z hlediska měření – vrtule s horizontální osou (pokud nemají komponentní propeler – viz dále) je třeba při měření vždy ustavit ve směru proudění. Kromě toho se udává, že vrtule s horizontální osou má, zejména při malých rychlostech proudění, poněkud větší nejistoty měření. Priceova vrtule je navíc konstrukčně jednodušší. I přesto má však Woltmannův typ řadu výhod a díky nim v poslední době získává popularitu i tam, kde Priceovy vrtule doposud převažují.

Renomovaný výrobci zpravidla dodávají vrtule s těly různých velikostí a propelery různých průměrů se šroubovicemi o různých stoupáních, takže přístroje jsou značně flexibilní a použitelné v širokém rozmezí podmínek. V současnosti je řada vyráběných propelerů tzv. komponentních – takový propeler i při šikmém nátoku proudění registruje pouze složku rychlosti rovnoběžnou s osou vrtule. Úhel komponentnosti se liší podle typu propeleru a pohybuje se v rozmezí 0–45°. Někteří výrobci dodávají i celé soupravy, nebo si lze v sestavě soupravy zvolit určité vybrané propelery.

Během doby se měnil i systém počítání otáček. Původní mechanické počítadlo, tvořící integrální součást vrtule, bylo již před více než stoletím nahrazeno elektrickou signalizací. I tento systém se postupně vyvíjel – dříve používané mechanické kontakty typu kolíku na šnekovém kole, kterým otáčel šnek na ose vrtule, jež dávaly signál po několika otáčkách či několika desítkách otáček, jsou dnes nahrazeny magnetickými spínači, které dávají impuls při každé otáčce. Tato změna byla podmíněna i rozvojem elektroniky – akustická signální zařízení (zvonky či bzučáky) byla



Elektromagnetické měřidlo Flow-Mate

postupně nahrazena elektromechanickými a posléze čistě elektronickými čítači, které načítají impulzy generované spínacím zařízením vrtule po předem nastavenou dobu, popřípadě měří čas nutný k vykonání předem nastaveného počtu otáček. Pro některá speciální měření (zejména při garančních měřeních vodních strojů), kdy se používá větší počet – až několik desítek – vrtulí, je dnes zaveden sběr dat pomocí počítače.

Zajímavou vrtulí je již nevyroběný Ottův typ C 60, který neměl pulzní výstup, ale byl vybaven měřicím dynamem s analogovým napětovým výstupem, což dovovalo registraci fluktuací rychlosti v čase.

Dnes existují i měřidla typu hydrometrických vrtulí, která již mají zabudovanu i vyhodnocovací jednotku udávající přímo měřenou rychlost (viz např. měřidlo Flow Probe).

Vrtule se při měření upevňují buď na tyč (tzv. soutyčí), nebo na lanový závěs. Soutyčí bývají skládací, délky 3–5 m s jednotlivými díly dlouhými 1–1,5 m, opatřena stupnicí s dělením po 0,01 nebo 0,1 m a zpravidla jsou vybavena přesuvným rukávem, který dovoluje nastavení vrtule do požadované hloubky bez nutnosti vyjmout ji z vody. Upevnění vrtule na tyči se nejčastěji používá při měření v mělkých tocích, kde lze brodit, popř. při měření z plavidel, nízkých lávek nebo mostů. Při větších hloubkách vody a měření z vyšších mostů se obvykle používá závěsu vrtule na laně. Při použití lanového závěsu se vrtule upevňuje k závaží proudnicového tvaru opatřenému kormidlem; lanovým závěsem jsou vedeny i signální kabely. Závaží musí mít jistou minimální hmotnost, která odpovídá maximální rychlosti proudění, jinak je vrtule vlivem hydrodynamických sil vynášena k hladině; běžně se používají závaží o hmotnosti 5, 10, 25, 50 nebo 100 kg.

V některých speciálních případech (zejména při garančních měřeních vodních strojů – turbín a čerpadel) se větší počet vrtulí upevňuje k pevné nebo pohyblivé konstrukci. Konstrukce vestavěné do potrubí bývají pevné, tvaru čtyř nebo šestiramenného kříže (podle průměru potrubí). Často se též měří průtok ve vtoku přivaděče turbíny; zde se používá nejen pevných konstrukcí tvaru mříže, ale často i pohyblivého zařízení zavěšeného na laně, které nese jednu řadu vrtulí a pohybuje se v drážkách provizorního hrazení vtoku.

Jiné přístroje pro měření rychlosti proudění

Kromě vodoměrných vrtulí se stále častěji používají i přístroje založené na jiných principech.

V současnosti jsou nejběžnější měřidla elektromagnetická (indukční), založená na Faradayově zákonu – při pohybu vodiče v magnetickém poli se na vodiči indukuje elektrický proud. Vzhledem k tomu, že voda běžné kvality je vodičem, stačí vhodnou cívkou vybudit magnetické pole a dvěma elektrodami snímat indukované napětí, které je přímo úměrné rychlosti proudění v daném místě. Indukční měřidla mají oproti vrtulím jisté výhody – nemají pohyblivé části, takže s nimi lze měřit i v podmínkách, kdy standardní vrtule selhávají (splašky, vodní rostliny apod.), a dovolují i měření značně malých rychlostí (až řádu $0,001 \text{ ms}^{-1}$), kdy vrtule již nereagují, i když s poněkud větší nejistotou měření. Na druhou stranu mají indukční měřidla i některé nevýhody – elektrody je třeba udržovat v čistotě a měření v blízkosti kovových prvků, ovlivňujících vybudené magnetické pole, může vést i k dosti výrazným chybám.

V poslední době se též používají měřidla ultrazvuková, obvykle založená na Dopplerově principu. Ta existují ve dvou provedeních – jednak jako ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) měřící vektor rychlosti v bodě, jednak jako ADP (Acoustic Doppler Profiler) měřící rychlost v řadě míst podél akustického paprsku. Zatímco ADV se zatím používají hlavně pro laboratorní měření, i když již jsou dostupné systémy vhodné pro měření ve vodních tocích (např. ADC firmy Ott), ADP v třípaprskovém provedení se i přes značné pořizovací náklady zvolna stávají standardním vybavením profesionálních organizací zajišťujících měření průtoků na vodních tocích.

Oproti tomu se ostatní starší typy přístrojů, ať již založené na měření dynamického tlaku proudící vody (Pitotova trubice a přístroje od ní odvozené) či jiných principech (velice pěkný historický přehled uvádí Kolupaila), používají, pokud nebyly úplně zapomenuty, již jen zcela výjimečně (převážně v laboratořích).

Vybavení ČKSVV

Základními prostorami ČKSVV jsou kalibrační žlab, velín a rozvodna, ze které jsou dálkově ovládána všechna stavidla žlabu.

Kalibrační žlab byl vybudován při výstavbě budovy tehdejších Státních výzkumných ústavů hydrologického a hydrotechnického T. G. Masaryka a uveden do provozu byl roku 1930. Je napájen vodou z plavebního kanálu Trojského jezu, má celkovou délku ca 250 m, užitnou délku 152,5 m, šířku 2,5 m a střední hloubku vody 1,8 m (může se poněkud měnit v závislosti na kótě hladiny v plavebním kanálu), sklon dna je 0,04 ‰. Žlab je betonový, v přední části opatřený přelivem k udržení konstantní



Vtoková část žlabu s přelivem

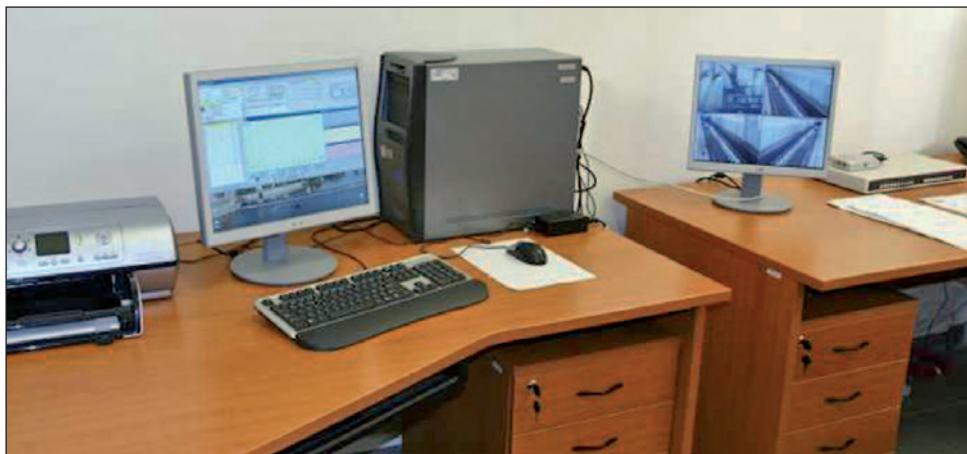
hladiny. Vtok do žlabu z plavebního kanálu je opatřen stavidlem, dalším stavidlem lze oddělit vtokovou část od části pracovní, na konci žlabu je situováno další stavidlo sloužící k vypouštění žlabu. Za tímto stavidlem se žlab rozšiřuje na 5,00 m v celkové délce 25 m a má zde hloubku 5,0 m (tato část může sloužit např. pro případné pokusy s účinností turbín apod., lze ji použít i jako měrnou nádrž). Z této části pak vede odpadní potrubí do dolní části plavebního kanálu pod komorami, odpad lze uzavřít šoupětem. Všechna stavidla jsou ovládána elektricky z hlavního rozvaděče žlabu, ale lze je ovládat i přímo z místa osazení stavidla, v případě nouze i ručně.

Pracovní sekce žlabu délky ca 150 m je krytá a je temperována. Podél ní je umístěna kolejová dráha pro pojezd vlečného kalibračního vozíku. Vozík je napájen z třífázové troleje situované po pravé straně žlabu pod stropem; tam je umístěno i pravitko snímání dráhy. Pracovní sekce je dále vybavena kamerovým systémem pro vizuální kontrolu činnosti vozíku při bezobslužném provozu. Na začátku pracovní sekce je situována podesta sloužící k údržbě vozíku, instalaci vrtulí i dalším běžným činnostem. V rámci stavebních úprav po povodni roku 2002 byl kalibrační žlab v koncové části vybaven zařízením, umožňujícím v případě povodňového nebezpečí evakuaci kalibračního vozíku na střechu kotelny ústavu.

Velín kalibrační stanice byl po povodni přemístěn z původního místa vedle žlabu a nyní se nachází v prvním podlaží, nad kalibračním žlabem. Ve velínu je umístěn centrální řídicí počítač sloužící k řízení automatizovaného bezobslužného provozu, sběru, vyhodnocení a archivaci dat. Dále je zde monitor kamerového systému žlabu – dění ve žlabu je sledováno čtyřmi kamerami.



Pracovní sekce žlabu



Velín

Současný kalibrační vozík byl vyroben firmou DICONT, a. s., a uveden do pravidelného provozu v lednu roku 2005. Vozík má elektrický pohon, napájen je z trolejového vedení žlabu a pojíždí po kolejnicích umístěných podél pracovní sekce. Řídicí jednotka vozíku dovoluje nastavení rychlosti pojezdu v rozmezí $0,02\text{--}10\text{ ms}^{-1}$ (v současné době je max. rychlost omezena na 7 ms^{-1}) v obou směrech. Vozík je vybaven třemi držáky pro kalibrace vrtulí na tyči a navijákem pro kalibrace vrtulí na lanovém závěsu se závažím do hmotnosti 100 kg. Držáky automaticky otáčejí vrtule při změně směru pohybu vozíku. Ovládání vozíku je možné jednak z konzoly řídicího počítače umístěné na vozíku, jednak dálkově z velínu. Z velínu lze zadat i všechny parametry



Vozík s osazenými třemi vrtulemi



Současný kalibrační vozík od firmy DICONT, a. s.

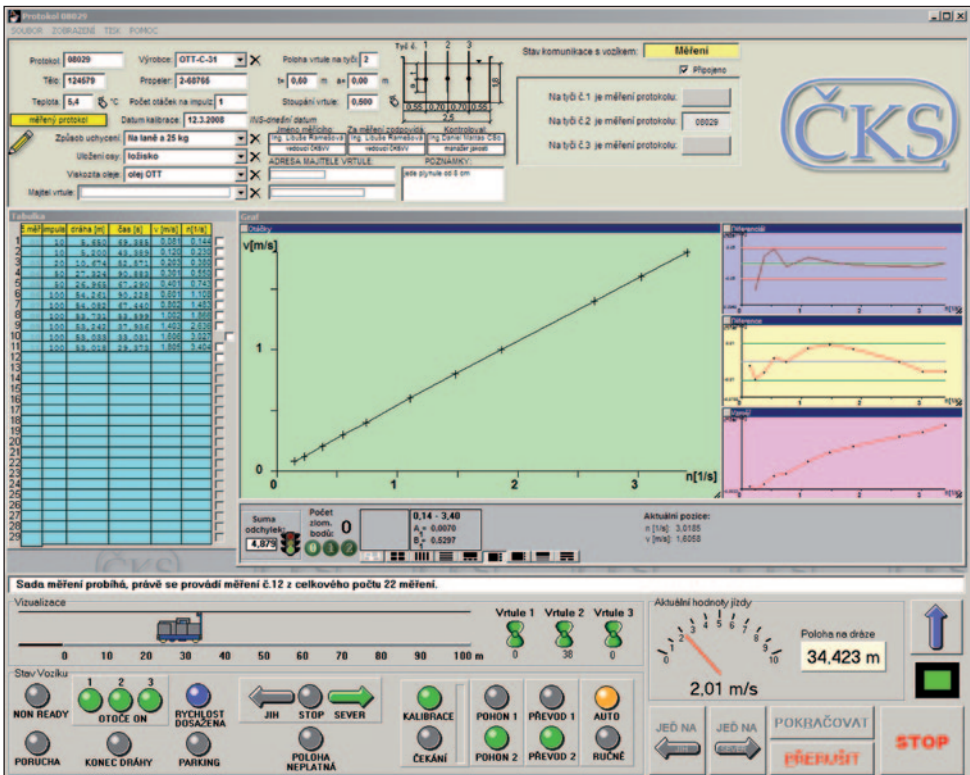


Měřítka a trolej

bezobslužného, plně automatického provozu. Při kalibraci vrtulí na lanovém závěsu je z provozních důvodů nutná přítomnost obsluhy na vozíku, který lze v tomto případě ovládat i z konzoly. Řízení vozíku zajišťuje průmyslový počítač třídy PC, řízení pohybu je založeno na speciálním softwaru, který dodala firma DICONT, a. s., spolu s vozíkem.

Při dosažení rovnoměrného pohybu vozíku dává řídicí jednotka povel ke sběru dat; první impuls od každé vrtule spouští příslušné čítače dráhy, času a impulsů. Po dosažení předem nastaveného počtu impulsů vodoměrné vrtule se načítání vypne. Čas je odvozen od krystalu počítače, dráha je určena na základě počtu impulsů vzniklých průchodem optoelektronické soustavy kolem pravítka s výřezy, pravidelně rozmístěnými ve vzájemné vzdálenosti 0,10m. Uvnitř těchto segmentů je poloha vozíku interpolována s rozlišením 1 mm na základě optoelektronického snímání úhlového dělení hřídelí pohonných elektromotorů. Měření času a dráhy jsou metrologicky navázána. Získaná data jsou z řídicí jednotky vozíku on-line přenášena do centrálního řídicího počítače ve velínu a následně on-line zpracovávána vyhodnocovacím softwarem.

Kalibrační vozík lze využít nejen pro kalibrace hydrometrických vrtulí, ale i pro pokusy s vlečením těles v klidné vodě, např. pro stanovení hydrodynamických odporů lodí apod.



Obrazovka centrálního počítače při kalibraci

Hardware

Centrální řídicí počítač i řídicí počítač vozíku jsou třídy PC. Jejich vzájemné propojení je uskutečněno pomocí WiFi LAN.

Software

Software pro řízení provozu, sběr a zpracování dat je zákaznický na platformě MS Windows. Je rozdělen na dvě části – jedna obsluhuje provoz vozíku podle předem nastavených parametrů a řídí sběr dat; byla zpracována v rámci dodávky vozíku firmou DICONT, a. s. Druhá zabezpečuje zpracování kalibračních dat až do formy kalibračního listu a jejich archivaci – tuto část zpracovala podle našich požadavků firma Hardware Software. Obě části spolupracují. Kromě uložení dat v počítači jsou veškerá kalibrační data periodicky zálohována na odolné médium (dnes CD-ROM) a archivována.

Výstup z programu je rozdělen do tří oken – horní okno obsahuje veškerá identifikační data vrtule a kalibrace. Může být částečně překryto druhým oknem, které lze přepínat pro zadávání kalibračních dat (identifikace vrtule a jejího majitele, rychlosti, čekací doby mezi jednotlivými jízdami atd.) nebo sledování a zpracování výsledků. Dolní okno udává stav kalibračního procesu, parametry pohybu (rychlost a polohu) vozíku apod.

Metoda kalibrace vodoměrných vrtulí

Představme si standardní šroubovicový propeler vrtule. Stoupání šroubovice buď k [m]. Bude-li se voda pohybovat rychlostí v [ms^{-1}], urazí každá molekula za 1 sekundu právě dráhu v [m] a propeler se tedy otočí n krát, kde $n = v/k$. Při známých otáčkách vrtule za vteřinu n [s^{-1}] pak tedy bude rychlost proudění

$$v = kn$$

To by však platilo pouze v případě ideální vrtule (nemající žádné mechanické odpory) v ideální kapalině (nemající vnitřní tření, a tudíž nezpůsobující žádné hydraulické odpory). Ve skutečnosti jak mechanické, tak hydraulické odpory činnost vrtule ovlivňují a výše uvedený vztah neplatí. Skutečná závislost mezi specifickými otáčkami vrtule a rychlostí proudění se musí stanovit experimentálně kalibrační vrtule.

Kalibrace hydrometrických vrtulí i dalších měřidel, která lze podle této normy kalibrovat, se provádějí zásadně v souladu s ČSN ISO 3455 „Měření průtoků kapalin v otevřených korytech – Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích“.

Předmětem kalibrace je experimentální stanovení vztahu mezi rychlostí kapaliny a frekvencí otáčení otočného prvku (propeleru) vrtule. Podle předpisu této normy je hydrometrická vrtule tažena řadou konstantních rychlostí v klidné (stojící) vodě v přímé nádrži prizmatického průřezu. Geometrické uspořádání upevnění vrtule je při kalibraci vyžadováno stejné, jako bude použito při měření. Přitom se stanovuje rychlost vozíku v [ms^{-1}] a frekvence otáček vrtule n [s^{-1}] na základě

měření vzdálenosti L [m] projeté vlečným vozíkem, počtu otáček vrtule N [-] a příslušného času t [s] na základě vztahů

$$v = \frac{L}{t}, n = \frac{N}{t}$$

Vzájemný vztah mezi rychlostí vlečného vozíku a specifickými otáčkami (frekvencí otáčení) vrtule se pak vyjádří kalibrační rovnicí. Uvedený postup nebere v úvahu případné rozdíly mezi chováním vrtule pohybující se v klidné vodě a chováním vrtule v turbulentním proudu.

Měření dráhy je založeno na snímání počtu impulzů od měřítka dráhy. To je realizováno jako kovový pás s výřezy o rozteči 0,010 m, snímání je optoelektronické, uvnitř segmentů je dráha interpolována s rozlišením 1 mm na základě optoelektronického snímání úhlového dělení hřídelí pohonných elektromotorů. Toto uspořádání dovoluje při typické vzdálenosti 50 m, projeté vozíkem při kalibraci, dosáhnout rozlišovací schopnosti a nejistoty určení dráhy výrazně lepší než 0,1 %. Pro zajištění metrologické návaznosti je měřítko pravidelně ověřováno s pomocí kalibrovaného pásma délky 100 m. Měření času se provádí softwarovým čítačem kmitočtu odvozeným z krystalového generátoru počítače in-line. I měření času podléhá metrologické návaznosti a oscilátor je pravidelně kalibrován.

Standardní počet kalibračních bodů (počet jízd) je 16–20 (tedy ještě větší, než vyžaduje ČSN ISO 3455), přičemž vzdálenost mezi body se poněkud zvětšuje se zvyšující se rychlostí. Protože při každé kalibrační jízdě se rozvíří voda v kalibračním žlabu (a to tím více, čím vyšší je rychlost; záleží i na upevnění vrtule – vrtule se závažím na laně rozvíří vodu více než vrtule na tyči), jsou pro jednotlivé typy vrtulí a jejich upevnění stanoveny uklidňovací doby mezi jízdami, sloužící k uklidnění vody v kalibračním žlabu.

Při vlastní kalibraci se prostřednictvím uživatelského rozhraní řídicího počítače předem nastaví počet kalibračních bodů a pro každý bod požadovaný počet otáček vrtule, požadovaná rychlost vozíku a uklidňovací doba mezi jednotlivými jízdami. Po spuštění programu se vozík rozjede a po dosažení nastavené rychlosti a jejím ustálení zahájí řídicí počítač sběr dat. První příchozí signál od vrtule zapíná měření projeté vzdálenosti a času; přitom se načítají signály od vrtule a jakmile je dosažen jejich nastavený počet, měření dráhy a času se ukončí a data jsou bezdrátově předána řídicímu počítači ve velínu. Současně začne měření uklidňovací doby. Po jejím dosažení se opět spustí pohony vozíku a celý cyklus se opakuje pro všechny zadané kalibrační body. Obsluha má přitom možnost jak přímo přes řídicí počítač, tak popřípadě i přes konzolu na vozíku v případě potřeby celý cyklus zastavit, resp. zopakovat měření pro libovolný kalibrační bod či body.

Po realizaci všech určených vlečných rychlostí jsou data zpracována počítačem a je vyhodnocena kalibrační rovnice. Kalibrační rovnice má v ČSN ISO 3455 předepsaný tvar po částech lineární závislosti²

$$v = \alpha_i + \beta_i n$$

kde v [ms^{-1}] je rychlost vrtule ve vodě, která se určí z ujeté dráhy a času, n [s^{-1}] je frekvence otáček vrtule, určená z nastaveného celkového počtu otáček a času, a α_i ,

² Tvar kalibrační rovnice vychází z práce L. A. Otta z roku 1925.

a β_i jsou kalibrační konstanty vrtule platné ve specifikovaném rozmezí specifických otáček n . Počet dílčích lineárních úseků kalibrační závislosti je $i \leq 3$.

Konstanty kalibrační rovnice jsou určeny regresí metodou nejmenších čtverců; software určuje i pozici lomových bodů, ale pracovník provádějící vyhodnocení má možnost jejich polohu v případě potřeby optimalizovat. K tomu slouží pomocný graf, do nějž se vynášejí rozdíly

$$\Delta v = \alpha + \beta n - kn$$

kde k [m] je stoupání propeleru vrtule. Z tohoto grafu lze značně spolehlivěji určit lomové body i případné body odlehle než z běžného kalibračního grafu $v = f(n)$. Z tohoto důvodu je též pro tento účel doporučen normou; jiný význam tento pomocný graf nemá.

Pokud se při vyhodnocování (a totéž je možné již v průběhu kalibrace) projeví odlehle body, je možné je vyřadit a kalibraci v tomto bodě (při dané rychlosti) popřípadě zopakovat.

V případě kalibrace měřidel, které jsou vybaveny vlastní vyhodnocovací jednotkou (elektromagnetická měřidla, měřidla Flow Probe a další), je procedura obdobná, avšak místo automatizovaného sběru impulzů vrtule provádí obsluha záznam hodnot vykazovaných měřidlem do formuláře. Z měřených hodnot projeté dráhy a času potřebného k projetí této dráhy je pak off-line vyhodnocena rychlost vozíku v [ms^{-1}] a stejně jako při kalibraci klasických vrtulí jsou regresí metodou nejmenších čtverců určeny konstanty kalibrační rovnice.

Elektronický „Protokol o kalibraci“ obsahuje kromě vlastních kalibračních dat ještě řadu dalších údajů sloužících k jednoznačné identifikaci hydrometrické vrtule (výrobce, typ, výrobní číslo těla vrtule, typ propeleru a jeho výrobní číslo) a jejího majitele, způsob upevnění vrtule při kalibraci a její polohu v příčném profilu kalibračního žlabu, datum kalibrace a teplotu vody v kalibračním žlabu. Nedílnou součástí protokolu je též jeho jedinečné číslo. To se skládá z dvojčíslí udávajícího rok kalibrace (94 odpovídá r. 1994, 07 odpovídá r. 2007) a trojčíslí udávajícího pořadové číslo kalibrace v daném roce. V případě, že kalibrace byla z nějakého důvodu opakována (větší počet odlehlych bodů, porucha zařízení apod.), se za číslo uvádí ještě písmeno (postupně a, b, ...). Číslo kalibračního listu tedy může být např. 06092a, tj. 92. kalibrace v roce 2006, poprvé opakovaná. Všechny tyto údaje se vyplňují ještě před zahájením vlastní kalibrační procedury při zadávání kalibračního protokolu do řídicího počítače ve velínu.

Po zpracování kalibrační závislosti jsou vytištěny přílohy kalibračního listu v interní formě a předány ke kontrole manažeru jakosti ČKSVV. Teprve po jeho schválení je vydán kalibrační list se všemi náležitostmi pro zákazníka.

Kalibrační list

Koncovým výstupem kalibrační procedury je kalibrační list. Jeho podoba se během času měnila – ukázky starších kalibračních listů uvádíme na následujících obrázcích. Kalibrační list však vždy obsahoval jednoznačnou identifikaci vrtule (výrobce a popř. typ vrtule, výrobní číslo těla vrtule, typ a popřípadě výrobní číslo propeleru),

K. k. Hydrographisches Zentralbureau.

N. 174/2. ex 1910.

Zertifikat

über die

an der hydrometrischen Prüfungsanstalt des k. k. hydrographischen Zentralbureaus vorgenommene Prüfung des von der k. k. hydrographischen Landesabteilung in Troppau

zur Tarierung eingesandten hydrometrischen Torpedoflügels Nr. 380, gr. M. der Firma Otto A. Janzer in Wien.
glatter Vorvertrieb: A

Mit diesem Messapparate wurden 18 Fahrten mit Geschwindigkeiten von 0,16 bis 369 Meter pro Sekunde unternommen und dabei die in stehend graphisch aufgetragenen Werte erhalten. Nach denselben ergeben sich für die Formel $v = a + \beta \cdot n$

wenn v die Geschwindigkeit pro Sekunde in Metern und n die in derselben Zeiteinheit erhobene Anzahl der Flügelumdrehungen bedeutet, die nachstehenden Koeffizienten für $M = 4,30$: $\alpha = 0,058$, $\beta = 0,328$

für $M = 4,30$: $\alpha = -0,084$, $\beta = 0,361$

Wien, am 3. September 1910 des k. k. hydrographischen Zentralbureaus.

Zur genaueren Kenntnissnahme
sind die hier beigefügten

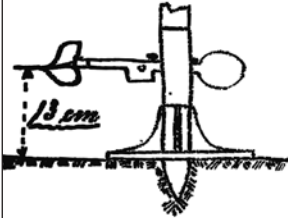
J. V.
Immerawsky

K. k. Hydrographisches Centralbureau:

Nr. 316. v. v. 1910

Stangenflügel N^o 165

ab 6. April 1910



Zertifikat

über die

an der hydrometrischen Prüfungsanstalt des k. k. hydrogra-
phischen Centralbureaus vorgenommene Prüfung des von
der k. k. Hydrographischen Landesabteilung für Chile in
Tropasac
zur Tarierung eingesandten hydrometrischen Stangenflügels
N^o 165 der Firma E. Kraft und Schw. in Wien

Mit diesem Messapparate wurden 17 Fahrten mit
Geschwindigkeiten von 0,08 bis 3,13 Meter pro Sekunde unter-
nommen und dabei die in stehend graphisch aufgetragenen
Werte erhalten. Nach denselben ergeben sich für die Formel
 $v = a + \beta \cdot n$

wenn v die Geschwindigkeit pro Sekunde in Metern und
 n die in derselben Zeiteinheit erhobene Anzahl der Flu-
gelumdrehungen bedeutet, die nachstehenden Koeffizienten

für: $n = 7,81: \alpha = 0,045, \beta = 0,207$

für: $n = 7,81: \alpha = 0,119, \beta = 0,228$

Wien, am 6. April 1910

Der Vorstand
des k. k. hydrographischen
Centralbureaus.

Spidck

K. k. hydrographische Landesabteil:	
in. Tropasac.	
Prüf. am	7. 14. 1910
Z	176
Big	<input checked="" type="checkbox"/>

Hydrom.
Apparate
in. Tropasac

z. 550 ex 1927.



Zertifikat

über die an der hydrometrischen Prüfungsanstalt des hydrographischen Zentralbureaus vorgenommene Prüfung des

Stangenflügels

N^o 1444

Mit diesem Meßapparate wurden *20* Fahrten mit Geschwindigkeiten von *0.10* bis *3.42* Meter pro Sekunde unternommen und dabei die in stehend graphisch aufgetragenen Werte erhalten. Nach denselben ergeben sich für die Formel $v = \alpha + \beta \cdot n$, wenn v die Geschwindigkeit pro Sekunde in Meter und n die in derselben Zeiteinheit erhobene Anzahl der Flügelumdrehungen bedeutet, die nachstehenden Koeffizienten

$$n \geq 6.48: \alpha = -0.04734, \beta = 0.22869$$

$$n \leq 6.48: \alpha = 0.01489, \beta = 0.21968$$

Wien, am *31. Mai 1927.*

Der Vorstand:

Münz

Die
HYDROMETRISCHE PRÜFUNGSANSTALT
 der
TECHNISCHEN HOCHSCHULE
 in
MÜNCHEN

hat den von den Feinmechanischen Werkstätten von Georg Killi in München zur Koeffizientenbestimmung eingesandten hydrometrischen Flügel Nr. 196 von Killi mit 2tl. Schaufel und elektrischem Zählwerk mit 37 Zähnen bei Geschwindigkeiten von 0,1 bis 2,8 m in der Sekunde geprüft und die umstehend graphisch aufgetragenen Werte erhalten.

*Damit ergeben sich für die Beziehung $v = k \cdot n + \alpha$ für $n > 1,5$
 $v = k' \cdot n^2 + k'' \cdot n + \alpha$ für $n < 1,5$
 wo v die Geschwindigkeit in Metern in der Sekunde und n die Anzahl der Flügelumdrehungen in der Sekunde bedeuten, die folgenden Koeffizienten:*

$$k = 0,1650; \alpha = 0,030 \text{ für } n > 1,5$$

$$k = 0,0160; k' = 0,0247; \alpha = 0,100 \text{ für } n < 1,5$$

München, den 27. November 1930

Der Vorstand Kaban



Der Ingenieur Hölzer

Čís. 62.

Ú ř e d n í o s v ě d ě n í .

pro vodoměrnou vrtuli středního typu Ganser č. 1444, která byla v květnu 1937 přezkoušena.

S vrtulí bylo vykonáno 15 jízd od 0.1307 do 4.211 m/s. Výsledky měření jsou graficky vyneseny a vyrovnány přímkou, která má v osách souřadnic n a v rovnici:

$$v = \alpha + \beta n,$$

kde v je rychlost v metrech za vteřinu a n počet otoček za vteřinu při téže rychlosti.

Součinitelé mají od $n = 0.535$ do $n = 11.442$ hodnoty:

$$\alpha = 0.0104$$

$$\beta = 0.2155$$

a od $n = 11.442$ do $n = 18.878$ hodnoty

$$\alpha = - 0.1613$$

$$\beta = 0.2305.$$

V Praze dne 28 května 1937.



J. Smetany

O S V E D C E N I O K A L I B R A C I

číslo: 94080

Vodomerňa vrtule (vyrobce a typ): OTT-C-31
- výrobní číslo tela: 19556
- výrobní číslo propeleru: 1-70948

Způsob upevnění: na laně a 25 kg

Pocet otacek na impuls: 1

Datum kalibrace: 8. 6. 1994
Platnost osvědčení do: 8. 6. 1996
(při vyčerpání 100 provozních hodin od data kalibrace
pozbyva osvědčení platnost)

Teplota vody: 15.0 °C

Vysledky kalibrace:

Namerene body byly vyrovnany metodou nejmensich ctvercu do rovnice:

$$v = \alpha + \beta n$$

- kde v je rychlost v m/s.
 n je počet otacek za sekundu,
 α, β jsou nize uvedene konstanty

- pro $0.15 \leq n \leq 16.39$: $\alpha = 0.0210$, $\beta = 0.2544$

Upozorneni:

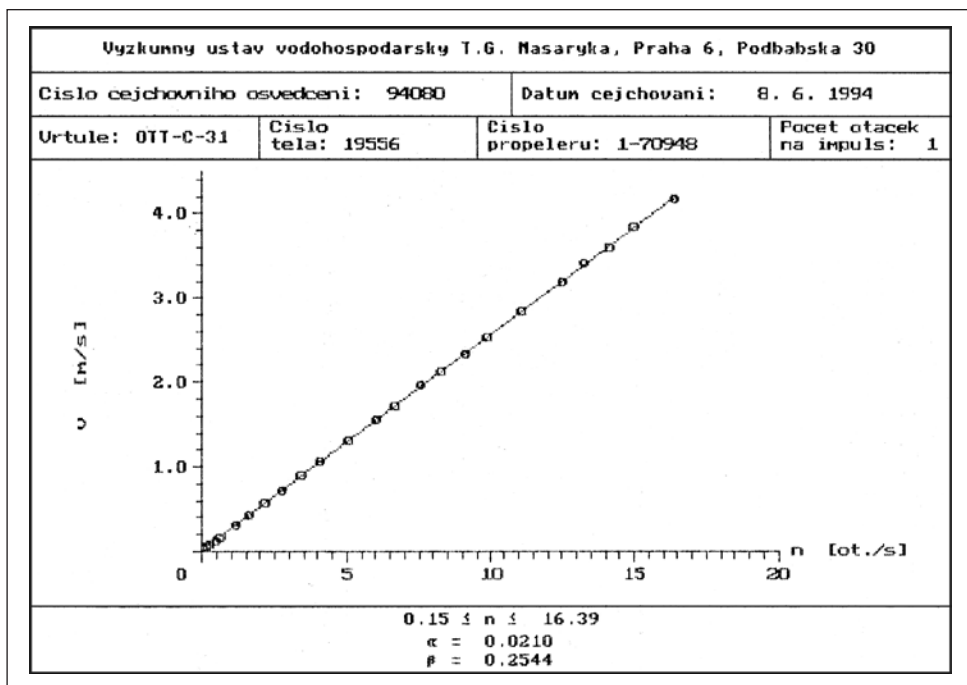
Kalibracni stanice neruci za vysledky pri pouziti mimo rozsah kalibrace.

V Praze dne 2. 8. 1994

Kumárná
Odpovedny pracovník
kalibracni stanice



V. A. Dvořák
Reditel ustavu



Příloha kalibračního listu VÚV z r. 1994

rozmezí rychlostí, za nichž byla vrtule kalibrována, a konstanty kalibrační rovnice vrtule. Asi od poloviny 60. let minulého století byl součástí kalibračního osvědčení vydávaného VÚV i graf závislosti $v = f(n)$ a tabulka obsahující tutéž závislost v numerické formě.

V současné době má kalibrační list titulní stranu a tři přílohy. Přílohy vycházejí z požadavků ČSN ISO 3455, která stanoví, jaké údaje mají být v kalibračním listu uvedeny. Jednotlivé stránky kalibračního listu jsou uvedeny na obrázcích na stranách 38 až 41.

Nejistota kalibrací

Jedním ze základních problémů v procesu kalibrace je správné určení výsledné nejistoty. Povinnost vyjádřit výslednou nejistotu je dána řadou dokumentů. EN 45 001 v článku 5.4.3 požaduje, aby zkušební protokoly zahrnovaly „údaj o nejistotě měření (kde je to potřebné)“, a současně stanovuje, že „kvantitativní výsledky musí být uváděny s vypočtenou nebo odhadnutou nejistotou“. Podobně ISO/IEC Guide 25 v čl. 13.2 požaduje „údaj o odhadnuté nejistotě kalibrace nebo výsledku zkoušky“ a v čl. 10.2 uvádí: „Laboratoř musí používat odpovídající metodu pro všechny kalibrace a zkoušky ... (včetně ... odhadu nejistoty měření)“. Návod k určení hodnoty nejistoty uvádí ISO v publikaci Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Na rozdíl od zkoušení (kterého se týká výše uvedená publikace) je návod pro kalibrace dán

Výrobce: OTT	Číslo těla: 19 556	94 080
Typ: C- 31- 00	Číslo propelleru: 1- 70 948	
Majitel: ČHMÚ HRADEC KRÁLOVÉ	Ulož. osy: LOŽANSKO	T = 15°C
	Upevnění: LANO + 25kg	Počet otáček: 1

v [m.s ⁻¹]	Poř. číslo	Čas [s]	Dráha [m]	v [m.s ⁻¹]
0,05	1	67 97	3 80	
0,08	2	73 14	6 30	
0,10	3	116 44	14 10	
0,20	4	130 01	27 00	
0,30	5	174 39	54 50	
0,40	6	122 41	52 35	
0,50	7	92 67	53 25	
0,70	8	72 74	51 90	
0,90	9	59 09	52 85	
1,10	10	49 01	52 30	
1,30	11	39 54	51 55	
1,50	12	33 37	51 80	
1,70	13	30 07	51 35	
1,90	14	26 40	51 60	
2,10	15	24 23	51 30	
2,30	16	21 93	51 25	
2,50	17	20 25	51 45	
2,80	18	18 08	51 20	
3,10	19	16 04	51 10	
3,30	20	15 12	51 45	
3,50	21	14 16	50 45	
	22			
	23			
	24			

OTT malý C 2 č. propelleru 2, 6 předvolba 50, 100, 200
VVUH č. propelleru 2 V předvolba 50, 100, 200

předvolba	obr.	n [s ⁻¹]
10		
20		
50		
100		
200		
200		

α	=	0,0210	β	=	0,2544
α_2	=		β_2	=	
α_3	=		β_3	=	

Cejchováno: 86-1994
Spočteno: RANEŠOVÁ
Poznámka:

Originál zápisu kalibračního protokolu z roku 1994

Kalibrační list byl vydán ČKSVV, akreditovanou ke kalibraci vodoměrných vrtulí a měřidel. Osvědčení o akreditaci kalibrační laboratoře číslo 2278 vydal Český institut pro akreditaci, o.p.s.

Kalibrační list číslo 10061

Kalibrováno podle normy ČSN ISO 3455

Výrobce vrtule: OTT-C-31

Číslo těla: 39662

Číslo propelleru: 4-38585

Majitel vrtule: Výzkumný ústav vodohospodářský TGM
Podbabská 30
160 62 Praha 6

Datum kalibrace: 28.6.2010

Způsob uchycení: Na tyči

Teplota vody: 16,8 °C

Nejistota měření: ± 0,8 %

Úroveň spolehlivosti: 95 %

POZNÁMKY:

VÝSLEDEK KALIBRACE:

$$v = a + bn$$

kde: v.....rychlost v metrech za sekundu

n.....počet otáček propelleru za sekundu

a,b.....konstanty

$$0,47 \leq n \leq 24,04$$

$$v = 0,0208 + 0,1326n$$

PROHLÁŠENÍ:

1. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02.
2. Měřidla použitá při kalibraci jsou metrologicky navázána na pracovní etalon ev. č. 9694/1/1, kalibrační list č. 29810/2009. Měřidlo má metrologickou návaznost na národní etalon.
3. Kalibrační laboratoř prohlašuje, že výsledky kalibrace se týkají pouze předmětu kalibrace.

V Praze dne 7. 12. 2010

Jméno odpovědného pracovníka:

Ing. Libuše Ramešová

vedoucí ČKSVV

Podpis: 



Kalibrační list nesmí být bez písemného schválení ČKSVV Praha rozmnožován jinak než celý. Nedinou součástí kalibračního listu je příloha dle ČSN ISO 3455

Příloha kalibračního listu

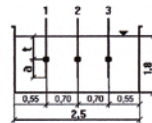
Číslo protokolu: 10061

INFORMACE O VRTULI:

Výrobce vrtule: **OTT-C-31**
 Číslo těla: **39662**
 Číslo propelleru: **4-38585**
 Počet otáček na impuls: **1**
 Stoupání: **0,125 m**
 Viskozita oleje: **olej OTT**

INFORMACE O KALIBRACI:

Způsob uchycení: **Na tyči**
 Teplota vody: **16,8 °C**
 Datum kalibrace: **28.6.2010**
 Poloha vrtule: **2**
 $t = 0,40 \text{ m}$
 $a = 0,02 \text{ m}$



VÝSLEDEK KALIBRACE:

Naměřené hodnoty byly vyrovnány metodou nejmenších čtverců.
 V měřeném rozsahu lze výsledek vyjádřit kalibrační rovnicí ve tvaru:

$$v = a + bn$$

kde: v.....rychlost v metrech za sekundu
 n.....počet otáček propelleru za sekundu
 a,b.....konstanty

$$0,47 \leq n \leq 24,04 \quad v = 0,0208 + 0,1326n$$


Kalibrační stanice neručí za výsledky, pokud:

- » je vrtule použita mimo rozsah kalibrace;
- » došlo k poškození vrtule nebo jejímu nárazu o dno či jiný předmět;
- » byla vyměněna některá součást vrtule (osa, ložisko,);
- » není čitelné označení typu a čísla vrtule;
- » byl použit jiný olej než při kalibraci;
- » vrtule byla v provozu déle než 100 hodin, nebo je-li osvědčení o kalibraci starší dvou let.

V Praze dne 7. 12. 2010

Jméno odpovědného pracovníka:

Ing. Libuše Ramešová
 vedoucí ČKSJV

Podpis: 

Číslo protokolu: **10061**

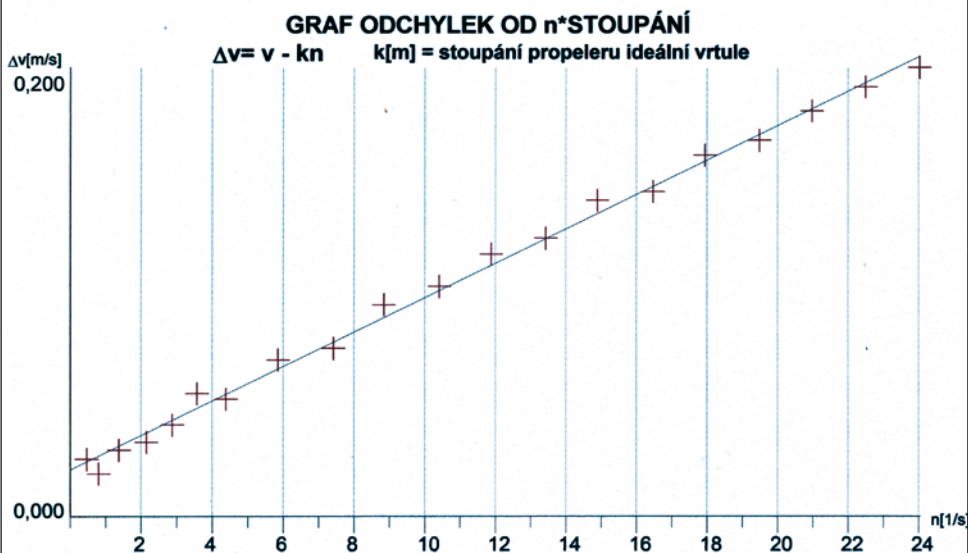
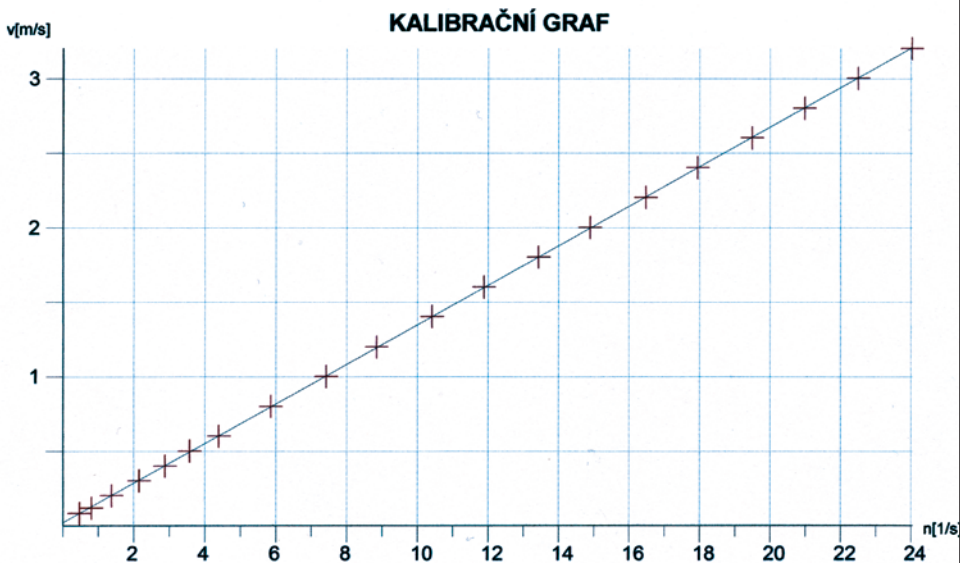
Datum kalibrace: **28.6.2010**

Výrobce vrtule: **OTT-C-31**

Číslo těla: **39662**

Počet otáček na impulz: **1**

Číslo propelleru: **4-38585**



Druhý list přílohy současného kalibračního listu

Číslo protokolu: **10061**
 Výrobce vrtule: **OTT-C-31**
 Počet otáček na impuls: **1**

Datum kalibrace: **28.6.2010**
 Číslo těla: **39662**
 Číslo propeleru: **4-38585**

TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT

Předvolba impulsů	dráha [m]	čas [s]	v [m/s]	n [1/s]
20	3,593	42,873	0,084	0,466
20	2,975	24,850	0,120	0,805
100	14,647	72,666	0,202	1,376
100	14,036	46,455	0,302	2,153
200	27,826	69,464	0,401	2,879
380	53,312	106,363	0,501	3,573
380	52,009	86,487	0,601	4,394
380	52,018	64,879	0,802	5,857
380	51,326	51,198	1,003	7,422
380	51,544	42,947	1,200	8,848
380	51,232	36,476	1,405	10,418
380	51,229	31,967	1,603	11,887
380	51,000	28,281	1,803	13,437
380	51,085	25,508	2,003	14,897
380	50,833	23,063	2,204	16,477
380	50,903	21,174	2,404	17,947
380	50,762	19,495	2,604	19,492
380	50,766	18,109	2,803	20,984
380	50,725	16,884	3,004	22,507
380	50,657	15,809	3,204	24,037

Třetí list přílohy současného kalibračního listu

dokumentem EAL-R2 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations. Z tohoto dokumentu vychází i tuzemský dokument ČIA č. EA 04/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích, který je s výše uvedenou publikací ve shodě.

Vzhledem k tomu, že výsledná nejistota se skládá z řady nejistot dílčích, je otázka jejich stanovení záležitostí prvořadého významu.

V případě kalibrace hydrometrických vrtulí je situace ještě o něco složitější, protože při kalibraci se mohou kromě běžných nejistot vlastního měřicího zařízení projevovat i vlivy hydrodynamické, zejména tzv. Epperův efekt, a pravděpodobně i vliv teploty a další vlivy, o nichž je podrobněji pojednáno dále. Kromě toho existuje

i nejistota příslušná danému měřidlu, která se projevuje rozptylem hodnot kalibračních konstant při opakovaných kalibracích a která může být do jisté míry způsobena i provozním opotřebením některých částí vrtule a/nebo její nedostatečnou či chybnou údržbou. Tato nejistota se při kalibraci neuvažuje, je však nutné ji zohlednit při výpočtu průtoku metodou rychlostního pole (též metoda rychlost-plocha) podle ČSN ISO 748.

Chyby měření a nejistota měření

Chyby měření

Každé měření je již z principu zatíženo chybami, které způsobují, že se výsledek měření více či méně liší od hodnoty správné. Chyby se obvykle dělí na chyby hrubé, systematické a náhodné.

Hrubé chyby bývají způsobeny omylem pracovníka provádějícího měření (např. chybný odečet přístroje, nesprávně vedený záznam, chybný odběr vzorku, chybná navážka apod.), závadou (selháním) měřicího zařízení aj. Zpravidla se projevují značně vychýlenými hodnotami a nebývá obtížné je identifikovat.

Systematické chyby vychylují výsledek měření zpravidla vždy na jednu stranu, absolutní hodnota a znaménko se při nezměněných podmínkách měření nemění, bývají funkcí parametru, charakterizujícího podmínky měření, popřípadě času.

Mohou být absolutní, konstantní, kdy chyba je nezávislá na velikosti měřené veličiny a výsledek je vychýlen vždy o tutéž hodnotu, nebo proporcionální (multiplikační), kdy je velikost chyby úměrná velikosti měřené veličiny. Příčin systematických chyb je celá řada. Může to být např. chyba metody, která vzniká z nedokonalosti nebo neúplnosti použitého způsobu měření, chyba měřicího zařízení způsobená chybnou kalibrací dotyčného přístroje nebo jeho chybnou funkcí, popř. i chybou etalonu použitého ke kalibraci. Patří sem i tzv. chyby osobní (např. způsob odečítání stupnice přístroje, interpolace mezi dílky stupnice, zaokrouhlování hodnoty při odečtu atp.). Systematické chyby lze v zásadě vždy identifikovat a zamezit jim, i když to často bývá obtížné.

Náhodné chyby vznikají kombinací řady neznámých, vzájemně nezávislých vlivů. Měření ovlivňují vždy a nelze jim zabránit. Bývají malé a působí na obě strany od správné hodnoty. Jsou podrobeny statistickým zákonům a postupy matematické statistiky se též užívají k jejich eliminaci.

Systematické a náhodné chyby pak ovlivňují přesnost a správnost měření. Přitom vysoká přesnost měření (tedy malý rozptyl určených hodnot), které můžeme dosáhnout eliminací náhodných chyb vhodnými statistickými postupy, ještě neznamená, že měření je správné, tedy že námi určená hodnota odpovídá hodnotě skutečné. Správnost měření můžeme dosáhnout pouze eliminací systematických chyb; to bývá často obtížné a v zásadě jediná možnost jak správnost měření ověřit je, pokud je to možné, použití několika různých metod měření.

Chyby souvisejí též s opakovatelností a reprodukovatelností metody. Opakovatelnost představuje přesnost vyjádřenou za přesně specifikovaných podmínek; je vlastností metody. Reprodukovatelnost je pak těsnost shody mezi výsledky měření téhož parametru na stejném vzorku, kdy jsou jednotlivá měření prováděna za různých podmínek, přičemž ne všechny podmínky musejí být nutně různé.

Z hlediska matematické statistiky lze k náhodným chybám přistoupit následovně:

Mějme určitou veličinu, jejíž skutečná velikost je a . Provedeme-li N měření této veličiny a označíme výsledky jednotlivých měření y_1, y_2, \dots, y_N můžeme psát

$$y_i = a + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

kde e_i značí chybu měření y_i . Za předpokladu, že měření nejsou ovlivněna systematickou chybou, jsou hodnoty e_i náhodnými chybami, tj. náhodnými veličinami.

Protože předpokládáme, že náhodné chyby jsou výsledkem působení velkého množství navzájem nezávislých vlivů, potom podle limitní věty počtu pravděpodobnosti má takovýto součet velkého počtu nezávislých náhodných veličin rozdělení blízké rozdělení normálnímu, a náhodné chyby tedy podléhají Gaussovu zákonu chyb.

Podle tohoto zákona jsou chyby e_1, e_2, \dots, e_N nezávislé náhodné veličiny a každá má normální rozdělení $N(0, \sigma^2)$, jehož hustota pravděpodobnosti je

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad x \in (-\infty; \infty) \quad (2)$$

kde rozptyl σ^2 je neznámým parametrem rozdělení. Položíme-li

$$h = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \quad (3)$$

můžeme rovnici hustoty pravděpodobnosti psát ve tvaru

$$p(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} \quad (4)$$

kde parametr h nazýváme mírou přesnosti.

Pravděpodobnost, že chyba bude ležet v intervalu $\langle -d; d \rangle$ je rovna

$$\int_{-d}^d p(x) dx = \frac{2h}{\sqrt{\pi}} \int_0^d e^{-h^2 x^2} dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{hd} e^{-u^2} du = \Theta(h, d) \quad (5)$$

Hodnoty funkce $\Theta(h, d)$ lze nalézt v tabulkách.

Z Gaussova zákona chyb vyplývá, že nejlepším nestranným odhadem zjišťované hodnoty a je aritmetický průměr hodnot měřených

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6)$$

Přesnost měření určujeme na základě odhadu směrodatné chyby (střední kvadratické chyby) jednotlivého měření

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - a)^2}{N - 1}} \quad (7)$$

přičemž odhad směrodatné chyby výsledné hodnoty (průměru) je

$$s_a = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

a výsledek vyrovnaní se pak zpravidla uvádí jako $a \pm s_a$.

Mějme lineární funkci náhodných veličin $y_1, y_2, \dots, \dots, y_N$:

$$u = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i y_i \quad (9)$$

kde $k_0, k_1, k_2, \dots, k_N$ jsou konstanty. Její střední hodnota je pak

$$E(u) = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i a_i \quad (10)$$

kde a_i značí střední hodnotu veličiny y_i . Směrodatná chyba funkce u je pak dána vztahem

$$\sigma_u = \sqrt{\sum_{i=1}^N k_i^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N k_i k_j \sigma_{ij}} \quad (11)$$

kde σ_i značí směrodatnou chybu veličiny y_i a σ_{ij} kovarianci veličin y_i, y_j . Pokud jsou všechny veličiny y_1, y_2, \dots, y_N vzájemně nezávislé, platí pro všechny kovariance $\sigma_{ij} = 0$, takže vztah (11) se zjednoduší ve tvar

$$\sigma_u = \sqrt{\sum_{i=1}^N k_i^2 \sigma_i^2} \quad (11a)$$

Obdobně mějme nelineární funkci těchto náhodných veličin:

$$u = f(y_1, y_2, \dots, y_N) \quad (12)$$

Potom pro střední hodnotu této nelineární funkce platí přibližný vztah

$$E(u) \approx f(a_1, a_2, \dots, a_N) \quad (13)$$

a pro její směrodatnou odchylku přibližný vztah

$$\sigma_u \approx \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 \sigma_i^2} \quad (14)$$

V těchto vzorcích jsou a_i střední hodnoty veličin y_i , σ_i jejich směrodatné chyby a

$$f_i = \frac{\delta f(y_1, y_2, \dots, y_N)}{\delta y_i} \Big|_{[y_1, y_2, \dots, y_N]} = [a_1, a_2, \dots, a_N] \quad (15)$$

Výše uvedený vzorec (11), resp. (11 a), nebo (14), který udává, jak chyby nezávislých náhodných veličin y_1, y_2, \dots, y_N vyjádřené směrodatnými chybami $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ ovlivňují veličinu $u = f(y_1, y_2, \dots, y_N)$, se nazývá zákonem šíření chyb.

Nejistota měření

Vzhledem k tomu, že chyby měření často neznáme, popřípadě je ani nejsme schopni určit přesně, používá se v současné době spíše než chyba termín nejistota měření. Nejistotu měření definuje dokument EA 04/02 v čl. 2.2 jako „parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, jež by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině“.

Nejistota se může týkat jak výsledku měření, tak i hodnot odečítaných na přístrojích, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na kterých výsledek závisí.

V této kapitole dále používáme značení běžně užívané při vyjadřování nejistot (viz např. EA 04/02), které se od standardního matematického značení poněkud odlišuje.

Měřené veličiny jsou ty blíže určené veličiny, které jsou předmětem měření. Při kalibracích se obvykle pracuje pouze s jednou měřenou veličinou, resp. jednou výstupní veličinou Y závislou na určitém počtu vstupních veličin X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) podle funkční závislosti

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (16)$$

kde funkce f reprezentuje postup měření a metodu stanovení a popisuje, jak jsou hodnoty výstupní veličiny Y stanovovány z hodnot vstupních veličin X_i (čl. 2.3).

Množinu vstupních veličin X_i lze rozdělit do dvou kategorií podle způsobu, jakým byla stanovena jejich hodnota a nejistota s touto hodnotou spojená:

1. Veličiny, u nichž byl odhad hodnoty a s ním spojená nejistota stanoven přímo na základě provedení měření. Tyto hodnoty mohou být stanoveny např. na základě jednoho měření, opakovaného pozorování nebo odborného úsudku na základě zkušenosti. Dále mohou zahrnovat jak korekce na odečítání přístroje, tak korekce na ovlivňující veličiny (teplota prostředí, atmosférický tlak atp.).
2. Veličiny, u nichž byl pro dané měření odhad hodnoty a s ním spojená nejistota převzata z externích zdrojů – typickými případy jsou např. veličiny vztahující se ke kalibrovaným měřicím etalonům, certifikovaným referenčním materiálům nebo referenčním údajům převzatým z literatury.

Odhad hodnoty měřené veličiny Y , tj. odhad hodnoty výstupní veličiny, označený dále jako y , se stanoví podle vztahu (16) po dosazení odhadů x_i na místě vstupních veličin X_i ,

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (17)$$

Zároveň se předpokládá, že odhady vstupních veličin jsou nejlepšími odhady, které byly korigovány o všechny vlivy významné pro model měření. Pokud tomu tak není, musí se do modelu zavést nezbytné korekce jako samostatné vstupní veličiny.

Pro vyjádření míry rozptýlení hodnot náhodné veličiny se používá rozptyl nebo směrodatná odchylka. Standardní nejistotou měření $u(y)$ vztahující se k odhadu hodnoty výsledné veličiny y je směrodatná odchylka měřené veličiny Y . Tato hodnota se stanoví z odhadů x_i vstupních veličin X_i a jim příslušných nejistot $u(x_i)$.

V některých případech může být vhodné vyjadřovat nejistotu jako relativní nejistotu měření, což je standardní nejistota odhadu příslušné veličiny dělená absolutní hodnotou tohoto odhadu. Vzhledem ke způsobu stanovení je relativní nejistota bezrozměrnou. Tento způsob vyjádření nelze použít, je-li hodnota odhadu dané veličiny rovna (či velmi blízká) nule.

Stanovení nejistoty měření pro odhad vstupních hodnot

Podle způsobu, kterým lze nejistoty stanovit, se rozdělují do dvou základních skupin, na tzv. nejistoty typu A a nejistoty typu B.

Stanovení nejistoty typu A je založeno na jejím určení statistickou analýzou série pozorování. Stanovení nejistoty typu B se provádí jiným způsobem než statistickým vyhodnocením; zpravidla se vychází z nějaké jiné odborné znalosti.

Stanovení nejistoty typu A

Nejistoty typu A se vážou převážně k náhodným chybám, jejichž příčiny jsou neznámé. Charakteristickou vlastností nejistot typu A je to, že jejich hodnoty s rostoucím počtem pozorování (opakovaných měření) klesají.

Postup pro stanovení nejistoty typu A lze použít v případě, že za stejných podmínek bylo provedeno několik nezávislých pozorování vstupní veličiny X . Pokud je měření provedeno s dostatečným rozlišením, je pozorovatelné rozptýlení získaných hodnot x_i .

Nejistota měření se pak stanoví následujícím postupem:

Určíme aritmetický průměr a odhadneme výběrovou směrodatnou chybu – vzorec (7) a z ní určíme odhad směrodatné odchylky průměru – vztah (8). Standardní nejistota $u(x)$ je pak rovna směrodatné odchylce průměru

$$u(x) = s_x \quad (18)$$

Pokud je počet opakovaných měření malý, ca $N < 10$, musí být zvážena spolehlivost takto získané nejistoty typu A. Pokud nemůže být počet pozorování zvýšen, je žádoucí zvážit použití dalších možností.

Stanovení nejistoty typu B

Nejistoty typu B se vážou na známé, identifikované a kvantifikované zdroje. Hodnoty nejistot typu B nezávisí na počtu měření.

Postup pro stanovení nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty vztahující se k odhadu x_i vstupní veličiny X_i jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování. Příslušná standardní nejistota $u(x_i)$ je určena odborným úsudkem na základě všech dostupných informací o možné variabilitě veličiny X_i . Nejistoty této kategorie lze odvodit na základě:

- údajů z dříve provedených měření,
- zkušeností s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a zařízení nebo jejich obecných znalostí,
- údajů výrobce,
- údajů uváděných v kalibračních listech nebo jiných certifikátech,
- nejistot referenčních materiálů získaných z příruček.

Při určování nejistot typu B je nutné důkladné pochopení problematiky na základě obecných znalostí a zkušenosti. Velmi důležité je použít všech relevantních informací. Postup při jejich určení lze shrnout do následujících bodů:

1. Sestavíme seznam všech relevantních veličin, které mají nebo mohou mít vliv na hodnotu výsledku a v rámci experimentu přicházejí v úvahu.
2. Seznam kriticky zhodnotíme a vyloučíme ty veličiny, jejichž vliv je řádově menší než ostatních.
3. Pro každou veličinu si ujasníme funkční vztah, přes který se přenáší hodnota vstupní veličiny na veličinu výstupní.
4. Pro každou vstupní veličinu stanovíme její standardní nejistotu; pokud jsou některé veličiny navzájem korelované, odhadneme hodnotu korelačního koeficientu.
5. Níže popsaným postupem vypočteme výslednou nejistotu typu B.

Přitom podstatné není ani tak uvést všechny veličiny, jako zejména nevynechat žádnou, která má velký vliv.

Při určování nejistot typu B je nutné rozlišovat následující případy:

1. Pokud je pro veličinu X_i známa pouze jedna hodnota, například jedna změřená hodnota, výsledná hodnota z předchozích měření, referenční hodnota z literatury a tak podobně, použije se tato hodnota pro odhad x_i . Standardní nejistota $u(x_i)$ náležející této hodnotě musí být převzata ze stejného zdroje; není-li to možné, musí být spočtena z důvěryhodných údajů. Pokud nejsou k dispozici, musí být využito odborného odhadu na základě zkušenosti.
2. Pokud lze na základě teorie nebo zkušenosti pro veličinu X_i předpokládat určité rozdělení očekávané pravděpodobnosti, je třeba použít za x_i příslušnou očekávanou hodnotu a za příslušnou nejistotu $u(x_i)$ směrodatnou odchylku tohoto rozdělení.

3. Pokud lze pro hodnoty veličiny X_i odhadnout pouze dolní a horní mez a_- , a_+ , je třeba pro popis její variability použít rovnoměrného rozdělení. To pak podle bodu 2) vede ke vztahu pro odhad očekávané hodnoty

$$x_i = \frac{1}{2}(a_- + a_+) \quad (19)$$

a ke vztahu pro směrodatnou odchylku, resp. standardní nejistotu

$$u(x_i) = \frac{1}{2\sqrt{3}}(a_- + a_+) \quad (20)$$

Použití rovnoměrného rozdělení představuje přiměřené statistické vyjádření nedostatečné znalosti vstupní veličiny X_i , nemáme-li jiné informace než limity její variability. Pokud však víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu intervalu je vyšší než v okrajích, může být vhodnější použít rozdělení trojúhelníkové nebo normální. Naopak pokud je výskyt hodnot v krajích intervalu pravděpodobnější než v jeho středu, může být vhodnější použít U-rozdělení.

Výpočet standardní nejistoty odhadu výstupní veličiny

Výpočet je založen na zákonu šíření chyb – viz výše uvedené vztahy (11), (11a) a zejména (14).

Nekorelované vstupní veličiny

Pro nekorelované vstupní veličiny je standardní nejistota odhadu y výstupní veličiny dána vztahem

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (21)$$

kde $u_i(y)$ je příspěvek ke standardní nejistotě odhadu y výstupní veličiny vyplývající ze standardní nejistoty odhadu x_i vstupní veličiny. Příspěvek určíme jako

$$u_i(y) = c_i \cdot u_i(x_i) \quad (22)$$

kde c_i je tzv. koeficient citlivosti, čili hodnota parciální derivace funkce f podle vstupní veličiny X_i pro odhad její hodnoty x_i

$$c_i = \frac{\delta f}{\delta x_i} = \frac{\delta f}{\delta X_i} \Bigg|_{X_1 = x_1, \dots, X_N = x_N} \quad (23)$$

(srovnej se vztahy (14) a (15)).

Tento koeficient citlivosti popisuje, nakolik je odhad výstupní hodnoty y ovlivňován změnami odhadu x_i vstupní veličiny X_i . Hodnota koeficientu citlivosti může být stanovena analyticky z rovnice funkce f podle vzorce (23) nebo numerickými metodami.

Přestože standardní nejistota je vždy nezáporná, příspěvek $u_i(y)$ může nabývat i záporných hodnot v závislosti na znaménku koeficientu citlivosti c_i . To je třeba zohlednit v případě korelovaných vstupních veličin (viz níže).

V případě lineární funkce f (definované jako součet násobků vstupních veličin)

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i \quad (24)$$

budou koeficienty citlivosti c_i rovny multiplikačním konstantám p_i a vztah (21) přechází na tvar (srovnej s rov. (11a))

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(x_i)} \quad (25)$$

V případě funkce f definované jako součin/podíl vstupních veličin,

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (26)$$

budou koeficienty citlivosti rovny

$$c_i = \frac{p_i y}{X_i} \quad (27)$$

Pokud použijeme relativní standardní nejistoty $w(y)$ a $w(x_i)$

$$w(y) = \frac{u(y)}{|y|}, \quad w(x_i) = \frac{u(x_i)}{|x_i|} \quad (28)$$

Ize ze vztahu (21) odvodit výraz analogický vztahu (25)

$$w(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i)} \quad (29)$$

Korelované vstupní veličiny

Jestliže jsou dvě vstupní veličiny X_i a X_k na sobě určitým způsobem závislé (korelované), je třeba jako jeden z příspěvků k celkové nejistotě uvažovat i jejich kovariance.

Schopnost vzít v úvahu vliv korelací závisí na znalostech průběhu měření a odhadu vzájemné závislosti vstupních veličin. Vždy je třeba respektovat fakt, že zanedbání vzájemných závislostí mezi vstupními veličinami může vést k nesprávnému stanovení standardní nejistoty výsledků měření.

Kovariance odpovídající odhadům dvou vstupních veličin X_i a X_k může být považována za nulovou, pokud:

- obě tyto vstupní veličiny jsou nezávislé, např. protože byly opakovaně, nikoliv však současně určovány v různých nezávislých experimentech, nebo protože představují výsledné hodnoty nezávisle prováděných vyhodnocení,
- jedna z těchto vstupních veličin může být považována za konstantu,
- analýza neposkytne informace ukazující přítomnost korelace mezi oběma vstupními veličinami X_i a X_k .

V některých případech se lze korelací vyvarovat vhodným výběrem funkce f modelující postup měření.

Pokud však dvě vstupní veličiny X_i a X_k korelované jsou, uvažujeme jako další příspěvek k celkové nejistotě výstupní veličiny jejich kovarianci

$$u(x_i, x_k) = u(x_i) u(x_k) r(x_i, x_k) \quad (30)$$

kde $r(x_i, x_k)$ je korelační koeficient, $|r(x_i, x_k)| \leq 1$, $i \neq k$, a vztah pro určení celkové nejistoty tedy nabývá místo tvaru (21) tvaru

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N u_i(y) u_k(y) r(x_i, x_k)} \quad (31)$$

(srovnej s (11)), resp. tvaru

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N c_i c_k u(x_i, x_k)} \quad (32)$$

Rozšířená nejistota měření

Standardní nejistota měření, vypočtená podle výše uvedených vztahů, odpovídá směrodatné chybě užívané v teorii chyb, čili de facto směrodatné odchylce užívané v matematické statistice. Vzhledem k tomu, že rozdělení odhadu y výstupní veličiny předpokládáme normální (Gaussovské), znamená to, že v intervalu $y \pm u(y)$ leží 68,26 % všech jejích možných hodnot.

Oproti tomu EAL požaduje, aby výsledná nejistota odpovídala pravděpodobnosti pokrytí 95 %. To však znamená, že standardní nejistotu musíme vynásobit koeficientem (tzv. standardním koeficientem rozšíření) $k = 2$ (hodnota $k = 2$ opět vyplývá z vlastností normálního rozdělení; interval $y \pm 2 \cdot u(y)$ pokrývá 95,44 % všech možných hodnot). Takto získaná nejistota měření se pak nazývá rozšířenou nejistotou měření.

Udávané hodnoty nejistot se zásadně zaokrouhlují na dvě platné číslice, upřednostňuje se zaokrouhlení směrem nahoru.

Předpoklad normálního rozdělení nemůže být v některých případech snadno potvrzen. Pokud však několik ($N \geq 3$) složek nejistoty odvozených z nezávislých veličin, které mají rozdělení s běžným průběhem (tj. např. normální nebo rovnoměrné), srovnatelně přispívá ke standardní nejistotě odhadu y výstupní veličiny, jsou splněny podmínky centrální limitní věty, a tudíž lze předpokládat, že rozdělení hodnot y je normální.

Návaznost

S nejistotami je těsně svázána návaznost. Návaznost ke společnému referenčnímu stavu je nezbytná pro porovnávání výsledků měření ať již navzájem, nebo s nějakým limitem.

Návaznost se definuje jako „vlastnost výsledku nebo hodnoty etalonu, kterou může být určen vztah k uvedeným referencím, zpravidla národním nebo mezinárodním etalonům, přes neporušený řetězec porovnávání, jejichž nejistoty jsou uvedeny“.

Referenčním stavem může být hmotné měřidlo, měřicí přístroj, referenční materiál nebo měřicí systém. Měřicí systém je definován jako „úplný soubor měřicích přístrojů a dalších zařízení, schopných provádět specifická měření“.

U všech výsledků měření je možné a potřebné zajistit návaznost k základním veličinám a jednotkám SI. To je zejména důležité u kalibrací, kde se navázání provádí k vhodným etalonům.

Nejistoty měřicího systému ČKSVV

Nejistota kalibrace je v zásadě dána nejistotou měření vstupních veličin. Při kalibraci vrtulí se v každém kalibračním bodě určují tři nezávislé veličiny, a to čas t [s], dráha L [m], projetá v tomto čase vozíkem, a počet otáček (impulzů spínače vrtule) vrtule N [-] opět v čase t . Přitom pro starší typy vrtulí může být počet otáček celým násobkem počtu impulzů od spínacího zařízení vrtule.

Z těchto vstupních veličin se pak výpočtem určí příslušná rychlost pohybu vozíku v $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ a specifické otáčky (frekvence otáčení) n $[\text{s}^{-1}]$ jako

$$v = \frac{L}{t}, \quad n = \frac{N}{t}$$

V případě kalibrace vodoměrných vrtulí se pro výpočet jednotlivých empirických bodů vztahu mezi rychlostí vody a otáčkami vrtule používá vždy výsledků jediného měření, a nelze tedy použít statistických postupů. Podle dokumentu EA 04/02 se tak jedná o stanovení nejistoty typu B.

Měření času a jeho nejistota

Měření času probíhajícího intervalu kalibračního měření se provádí SW čítačem kmitočtu, odvozeným z krystalového generátoru příslušného počítače in-line. Vzhledem k tomu, že se jedná o změření časového intervalu řádově 10 sekund s přesností 0,1 % a ne o absolutní čas, je přesnost křemíkového krystalu v generátoru (se základní frekvencí 60 MHz a její odchylkou lepší než 10^{-4}) vyhovující s velmi vysokou rezervou. Metrologická návaznost je zajištěna pravidelnou kalibrací oscilátoru periferní jednotky čítače/časovače .

a) Nejistota daná nepřesností časové základny

S ohledem na princip měření lze chybu časové základny považovat za zanedbatelnou.

b) Nejistota daná časovým zpožděním v hardware

Zpoždění mezi příjmem prvního impulzu od vodoměrné vrtule a spuštěním čítačového vstupu času a mezi posledním impulzem a zastavením čítačového vstupu

času jsou dána dobami potřebnými v PC k programovému ošetření těchto vazeb. Jejich hodnoty jsou přibližně stejné a jsou odhadnuty řádově na jednotky ms. Vliv těchto zpoždění na chybu měření můžeme zanedbat, protože:

- zpoždění začátku a konce měření působí chyby opačného smyslu, které se navzájem odečítají,
- obdobná zpoždění působí současně při spuštění a zastavení SW čítače dráhy. Při výpočtu výsledné veličiny vlečné rychlosti v se tyto podobné chyby vzdálenosti a času z důvodu zpoždění ruší vzhledem ke svému vzájemnému inverznímu vztahu.

Pro stanovení nejistoty uvažujme možnou chybu s normálním rozdělením s očekávanou hodnotou $x = 0,0$ s a standardní nejistotou $u = \pm 0,002$ s.

Měření počtu otáček a jeho nejistota

Měření impulzů vyslaných vodoměrnou vrtulí se provádí pomocí čítačového vstupu počítače. Rozlišovací frekvence čítače je cca o pět řádů vyšší, než jsou reálné frekvence impulzů z vrtulí, a tím je z principu zaručeno spolehlivé načtení všech impulzů vygenerovaných vodoměrnou vrtulí.

Počet impulzů se volí, a není tedy zatížen žádnou chybou. První a poslední impulz současně slouží jako řídicí impulzy pro čítače ostatních měření, a tudíž se u nich neuvažuje ani nejistota daná časovým zpožděním.

Měření dráhy a jeho nejistota

Měření vzdálenosti projeté kalibračním vozíkem se děje pomocí optoelektrického snímání délkových značek – výřezů v kovovém pravitku umístěném rovnoběžně podél celé dráhy pohybu kalibračního vozíku. Optické snímání jednotlivých délkových značek se převádí na elektrické impulzy načítané čítačovým vstupem počítače. Ten má rozlišovací frekvenci 10 MHz, tj. cca o pět řádů vyšší, než jsou reálné frekvence impulzů ze snímače, a zaručuje tedy z principu spolehlivé načtení všech impulzů.

Značky na kovovém pravitku jsou rozloženy v pravidelné rozteči $l_i = 0,10$ m, kterou je určena absolutní míra rozlišovací schopnosti vzdálenosti. Při předpokládané minimální měřicí dráze 50 m je potom relativní rozlišovací schopnost vzdálenosti 0,2 %.

Vztah pro zjištění celkové projeté vzdálenosti je:

$$L = D \cdot l_i$$

kde l_i je jednotková míra vzdálenosti [m],

D je celkový počet značek vzdálenosti načtený během jedné jízdy vozíku.

Kromě toho je vzdálenost mezi značkami interpolována na základě optoelektronického snímání úhlového dělení hřídelí pohonných elektromotorů, takže celkové rozlišení vzdálenosti je výrazně lepší. Dále jej uvažujeme hodnotou 0,1 %.

a) Nejistota daná nepřesností vlastního měrného pravítka vzdálenosti

Zde lze odlišit jednak nepřesnost danou nepřesností vzájemné vzdálenosti délkových značek a případnou systematicky narůstající chybu pravítka.

Pro nepřesnost vzájemné vzdálenosti délkových značek lze předpokládat normální rozdělení s průměrem $x = 0,0$ m a standardní nejistotu $u = \pm 0,001$ m.

Případnou systematickou chybu pravítka lze korigovat zavedením opravného přepočtu při vyhodnocování, a lze ji tedy považovat za nulovou.

b) Nejistota daná rozptylem okamžiku sejmutí délkové značky od okamžiku spuštění

Absolutní možná chyba je z principu měření $\pm 0,05$ m a chyba má, jak opět vyplývá z principu měření, rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. Očekávaná hodnota chyby je tedy $x = 0,0$ m a standardní nejistota

$$u = \sqrt{\frac{1}{12} (0,05 - (-0,05))^2} = \pm 0,029 \text{ m}$$

c) Nejistota daná časovým zpožděním v hardware

Zpoždění mezi příjmem prvního impulsu od vodoměrné vrtule a spuštěním čítačového vstupu dráhy a mezi posledním impulzem a zastavením čítačového vstupu dráhy jsou dána dobami potřebnými v PC k programovému ošetření těchto vazeb. Jejich hodnoty jsou přibližně stejné a jsou odhadnuty řádově na jednotky ms. Vliv těchto zpoždění na chybu měření můžeme zanedbat, protože:

- zpoždění začátku a konce měření působí chyby opačného smyslu, které se navzájem odečítají,
- obdobná zpoždění působí současně při spuštění a zastavení SW čítače času. Při výpočtu výsledné veličiny vlečné rychlosti v se tyto podobné chyby vzdálenosti a času z důvodu zpoždění ruší vzhledem ke svému vzájemnému inverznímu vztahu.

Chyba v určení vzdálenosti způsobená touto nejistotou je závislá na rychlosti. Pro maximální rychlost vozíku $v = 7 \text{ ms}^{-1}$ a velmi konzervativně odhadnuté zpoždění hodnotou 0,005 s bude maximální chyba dráhy 0,035 m. Při nulovém rozdílu zpoždění bude chyba vzdálenosti též nulová. Její standardní nejistotu pak můžeme stanovit hodnotou $u = \pm 0,01$ m, přičemž pro všechny nižší rychlosti bude nejistota přiměřeně nižší.

Celková standardní nejistota v určení vzdálenosti pak bude

$$u = \sqrt{0,001^2 + 0,029^2 + 0,010^2} = \pm 0,031 \text{ m}$$

Stanovení nejistoty odhadu výstupních veličin

Výstupními veličinami jsou rychlost vozíku v a jednotkové otáčky n . Pro tyto veličiny platí následující vztahy se vstupními veličinami

$$v = \frac{L}{t}, \quad n = \frac{N}{t}$$

Podle EA 04/02 se určí celková relativní nejistota u_{BMC} jako

$$u_{BMC,r} = \sqrt{u_{vr}^2 + u_{fr}^2 + 2R u_{vr} u_{fr}}$$

kde u_{vr} je relativní nejistota rychlosti $u_{vr} = u_v / v$, u_{fr} je relativní nejistota frekvence $u_{fr} = u_f / n$ a R je součinitel korelace. Vzhledem k tomu, že v našem případě se tentýž čas t používá pro výpočet jak rychlosti v , tak frekvence n , jsou obě veličiny plně korelované, a tudíž musíme uvažovat hodnotu $R = 1$.

V našem případě však musíme do nejistot ještě započítat nejistotu vyplývající z vyrovnání měřených hodnot kalibrační rovnicí. Typická amplituda odchylek měřených bodů od kalibrační přímky, proložené metodou nejmenších čtverců, je $\pm 0,01 \text{ ms}^{-1}$ bez ohledu na stoupání propeleru. U těchto odchylek lze, vzhledem k nedostatku dalších znalostí, předpokládat rovnoměrné rozdělení.

Standardní nejistota kalibrační křivky tedy bude

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} = 0,0058 \text{ ms}^{-1}$$

a výsledná relativní nejistota tudíž bude

$$u_r = \sqrt{u_{vr}^2 + u_{fr}^2 + 2R u_{vr} u_{fr} + u_{kr}^2}$$

kde u_{kr} je relativní nejistota kalibrační křivky.

Protože výše uvedené relativní nejistoty v zásadě odpovídají směrodatné odchylce měření a předpisy vyžadují uvádět nejistotu s pravděpodobností pokrytí 95 %, je za předpokladu normálního rozdělení třeba výslednou relativní nejistotu přenásobit tzv. koeficientem rozšíření $k = 2$, takže výsledná rozšířená relativní nejistota je

$$U = 2u_r$$

Podle zmíněného dokumentu EA 04/02 se nejistoty jednotlivých výstupních hodnot (zde tedy rychlosti v a frekvence n) určí jako součet tzv. příspěvků k nejistotě,

daných jako součin nejistoty příslušné vstupní veličiny a jejího koeficientu citlivosti, což je podle téhož dokumentu derivace výstupní hodnoty podle vstupní veličiny (zde dráha L a čas t).

Protože

$$dv = \frac{L}{t} dL - \frac{L}{t^2} dt, \quad dn = -\frac{N}{t^2} dt$$

jsou koeficienty citlivosti příslušné jednotlivým veličinám následující:

Při výpočtu rychlosti L $1 / t$

t L / t^2

Při výpočtu jednotkových otáček t $-N / t^2$

Výpočet nejistot výsledných veličin

Pro stanovení nejistot výstupních veličin je třeba vzít v úvahu, že počet otáček pro danou dráhu je závislý na stoupání propeleru hydrometrické vrtule. V ideálním případě pro projetou dráhu platí $L = kN$, kde k je stoupání šroubovice propeleru vrtule [m]. Ve skutečnosti je dráha vzhledem k mechanickým odporům v konstrukci vrtule a tzv. hydrodynamickému skluzu vždy delší, než by odpovídalo výše uvedenému vztahu. Stoupání propeleru vrtule dále zpravidla určuje praktickou horní hranici rychlosti, pro níž lze vrtuli ještě použít s ohledem na běžně používané čítače otáček (impulzů). Při praktickém použití se obvykle bere maximální jednotkový počet otáček v rozmezí $n = 10\text{--}30 \text{ s}^{-1}$; pokud je tato hranice překročena, obvykle se použije jiný propeler. Typická stoupání propelerů jsou 0,05; 0,10; 0,125; 0,25; 0,50 a 1,00 m (viz např. katalog německé firmy OTT Messtechnik Kempen).

Za předpokladu standardní vzdálenosti použité při kalibraci vrtule $l = 50 \text{ m}$ pak budou (teoretické) počty otáček vrtulí N pro jednotlivá stoupání propelerů k , maximální (teoretické) rychlosti v při uvažování maximálního jednotkového počtu otáček $n = 30 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ a minimální (teoretické) časy t nutné k projetí dráhy 50 m podle následující tabulky:

k [m]	0,05	0,1	0,125	0,25	0,5	1
N [-]	1000	500	400	200	100	70
v_{\max} [m.s ⁻¹]	1,5	3	3,75	7*	7*	7*
t_{\min} [s]	33,33	16,67	13,33	7,14	7,14	7,14

*maximální rychlost vlečného vozíku

Z tvaru koeficientů citlivosti vyplývá, že největší číselné hodnoty budou dosahovat pro nejkratší časy, tedy největší rychlosti, ve všech ostatních případech budou menší, a tudíž budou méně ovlivňovat nejistoty.

Například u propeleru se stoupáním 0,1 m bude výpočet nejistot následující:

Veličina X_i	Odhad x_i	Nejistota (x_i)	Koeficient citlivosti c_i	Příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
dráha [m]	50	$\pm 0,031$	0,0600	$\pm 0,0018$
čas [s]	16,67	$\pm 0,002$	0,1800	$\pm 0,0004$
rychlost [ms^{-1}]	3			$\pm 0,0019$

Veličina X_i	Odhad x_i	Nejistota (x_i)	Koeficient citlivosti c_i	Příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
otáčky [-]	500	$\pm 0,000$	0,0600	$\pm 0,0000$
čas [s]	16,67	$\pm 0,002$	1,8000	$\pm 0,0036$
jednotkové otáčky [s^{-1}]	30			$\pm 0,0036$

V následující tabulce udáváme přehled výpočtu nejistot pro jednotlivá typická stoupání propelerů.

Přehled nejistot pro typická stoupání propelerů

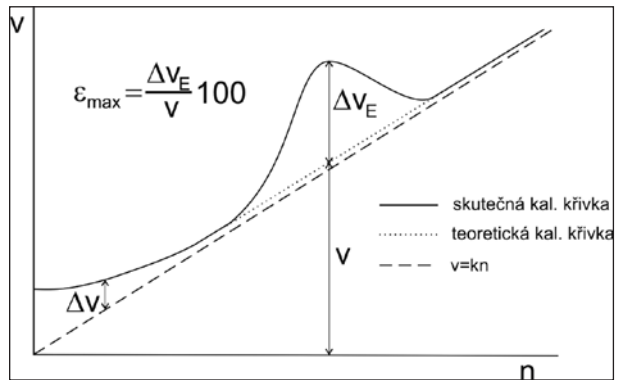
Stoupání propeleru [m]	0,05	0,1	0,125	0,25	0,5	1,00
max. rychlost [ms^{-1}]	1,5	3	3,75	7	7	7
standardní nejistota rychlosti [ms^{-1}]	0,0009	0,0019	0,0024	0,0047	0,0047	0,0047
rel. nejistota rychlosti u_{vr} [%]	0,060	0,063	0,064	0,067	0,067	0,067
frekvence impulzů [s^{-1}]	30	30	30	30	30	30
std. nejistota frekvence impulzů [s^{-1}]	0,0018	0,0036	0,0045	0,0078	0,0039	0,0020
rel. nejistota frekvence impulzů u_{fr} [%]	0,006	0,012	0,015	0,026	0,013	0,007
std. nejistota kalibrační křivky [ms^{-1}]	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
rel. nejistota kalibrační křivky u_{kr} [%]	0,387	0,193	0,155	0,083	0,083	0,083
korel. koeficient $r(v,N)$ [-]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
korelační součin $r.u_{vr}.u_{fr}$ [%]	0,0004	0,0008	0,0010	0,0017	0,0009	0,0004
celková rel. nejistota (BMC) $u_{BMC,r}$ [%]	0,063	0,070	0,073	0,083	0,074	0,071
celková rel. nejistota kalibrace $u_{c,r}$ [%]	0,392	0,206	0,171	0,117	0,111	0,109
rozšířená rel. nejistota BMC $U_{BMC}=2*u_{BMC,r}$ [%]	0,126	0,140	0,145	0,166	0,149	0,141
rozšířená rel. nejistota $U = 2*u_{c,r}$ [%]	0,784	0,411	0,342	0,235	0,223	0,218

Na kalibračním listu je uváděna maximální hodnota nejistoty kalibrace zaokrouhlená vzhůru, tedy $U = 0,8\%$.

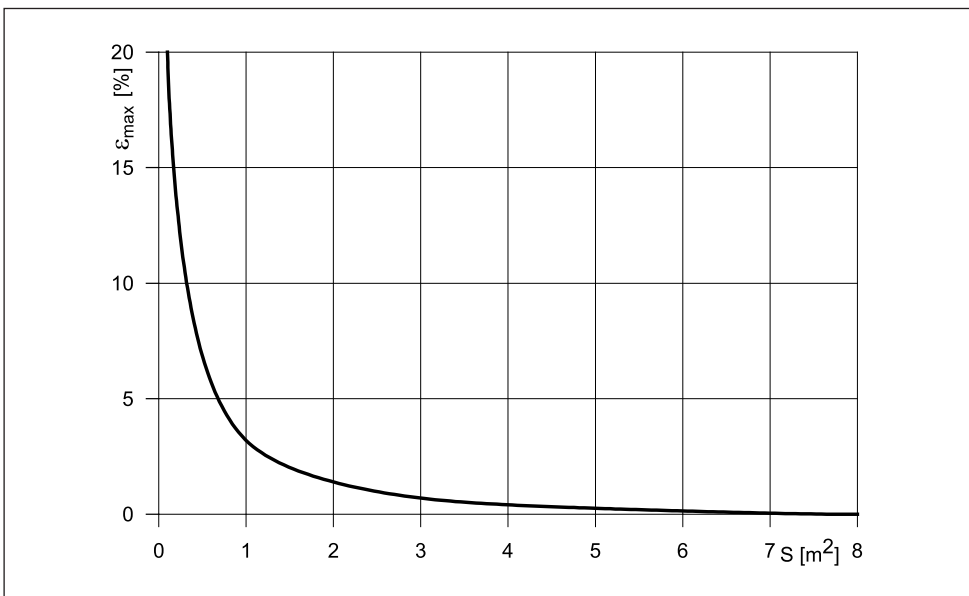
Epperův efekt

Epperův efekt (nazvaný po švýcarském inženýru Epperovi, který jej poprvé popsal) se projevuje odchylkou měřené rychlosti od teoretické kalibrační křivky v blízkosti kritické rychlosti. Epperův efekt je způsoben tím, že kalibrace se provádí v omezeném prostoru a má úzkou souvislost se vznikem gravitačních vln na hladině – vrtule se závěsem při pohybu vozíku vytváří vlnu, což způsobuje zvětšení plochy průřezu, a podle rovnice spojitosti tudíž musí dojít ke zmenšení relativní rychlosti. Toto snížení rychlosti je závislé hlavně na ploše příčného průřezu žlabu. Přitom však závisí také na velikosti kalibrované vrtule i jejím upevnění. Pro malé vrtule se Epperův efekt nemusí vůbec projevit.

Odchylka rychlosti nabývá největší hodnoty při rychlosti pohybu vozíku právě rovné postupové rychlosti gravitačních vln na hladině, tedy při rychlosti $v = \sqrt{gh}$, kde h je hloubka vody.



Epperův efekt – schematické znázornění



Vliv Epperova efektu – závislost maximální relativní odchytky ϵ_{\max} na ploše průřezu S kalibračního žlabu (podle Libého a Ramešové, 2005)

Jovanovič shrnul pokusy provedené v Bělehradě, Grenoblu a Berlíně, v nichž se mimo jiné projevil i vliv typu vrtule a dalších parametrů (které se však projevují jen okrajově), a pro odhad velikosti Epperova efektu udává graf závislosti maximální relativní odchylky rychlosti ε_{max} na velikosti příčného profilu kalibračního žlabu S . Přitom Epperův efekt se pro žlaby širší než ca 1 m projevuje zhruba v rozsahu rychlostí

$$0,60 \sqrt{gh} < v < 1,3 \sqrt{gh}$$

s maximem pro $v = \sqrt{gh}$. ČSN ISO 3455 udává rozmezí vlivu Epperova efektu

$$0,5 \sqrt{gh} < v < 1,5 \sqrt{gh}$$

čili v poněkud širších mezích.

Pokud bychom uvážili rozměry našeho kalibračního žlabu – hloubka $h = 1,8$ m a šířka $b = 2,5$ m, mohl by se Epperův efekt projevit v rozsahu rychlostí pohybu kalibračního vozíku ca $2,5 < v < 5,5$ [ms^{-1}], resp. podle ČSN ISO 3455 v rozmezí $2,1 < v < 6,3$ [ms^{-1}] s maximem při rychlosti $v = 4,2 \text{ms}^{-1}$. Co se týče velikosti Epperova efektu, z grafu uvedeného v práci Libého a Ramešové (který je evidentně založen na grafu Jovanoviče) vyplývá, že při ploše průřezu našeho žlabu $S = bh = 4,5 \text{m}^2$ bude relativní odchylka menší než 0,3 % měřené rychlosti. Přitom odchylka této velikosti bude pravděpodobně maskována rozptylem jednotlivých kalibračních bodů. A musíme konstatovat, že tomu tak skutečně je a systematická odchylka způsobená Epperovým efektem se nám zatím v kalibračních datech nikdy neprojevila.

Vliv teploty

Vliv teploty se může projevovat celkem ve třech oblastech. Jmenovitě se jedná o:

- vliv teploty na mechanické části (změna vůlí apod.),
- vliv teploty na viskozitu olejové náplně vrtulí,
- vliv teploty na hydraulické odpory (změna viskozity vody s teplotou).

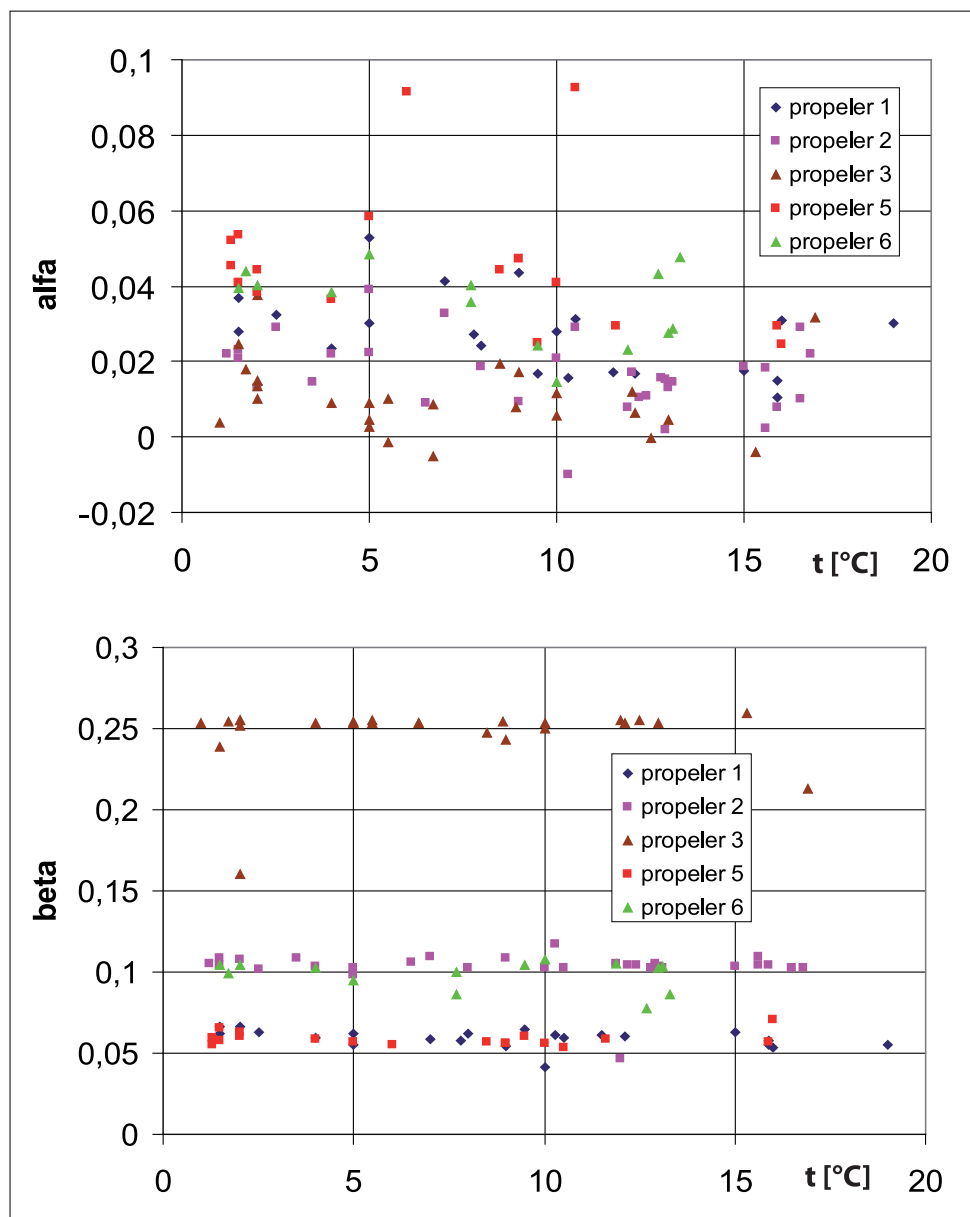
Přitom tyto vlivy od sebe nejde oddělit. Zde je dobré si uvědomit, že zatímco změna hustoty vody mezi 5 a 20 °C činí ca 0,2 %, změna kinematické viskozity vody je téměř 50 %.

Vliv teploty je stále ještě nedostatečně objasněn. Výrobci vrtulí obvykle neudávají pro svá měřidla provozní teplotní rozmezí a ani v nám známé literatuře jsme dosud nenalezli žádnou práci, která by se touto problematikou zabývala. V posledních letech však pracovníci ČKSVV zpracovali data z kalibrací s cílem pokusit se tento vliv a jeho velikost zjistit. Recentně se obdobnému problému věnovali i pracovníci Laboratoře vodohospodářského výzkumu Stavební fakulty VUT v Brně.

Pro zhodnocení jsme z obsáhlé databáze vybrali celkem šest vrtulí typu Ott C-2 a čtyři vrtule Ott C-31 v upevnění na tyči i na laně (jen 3 z nich) ve vlastnictví VÚV TGM a ČHMÚ, které jsou kalibrovány víceméně pravidelně a u nichž je navíc dobrý předpoklad patřičné údržby. Vrtule Ott C-31 byly posléze ze zpracování vyřazeny vzhledem k malému počtu kalibrací. Počet kalibrací pro každou sestavu tělo + propeler se pohyboval v rozmezí 1–17, pro každý typ propeleru v rozmezí 14–31 (propeler č. 4

jsme ze zpracování vyřadili, protože byly k dispozici údaje pouze ze čtyř kalibrací, celkem jsme zpracovali 116 kalibrací. Teploty vody při kalibraci se pohybovaly v rozmezí 1,0–19,0 °C.

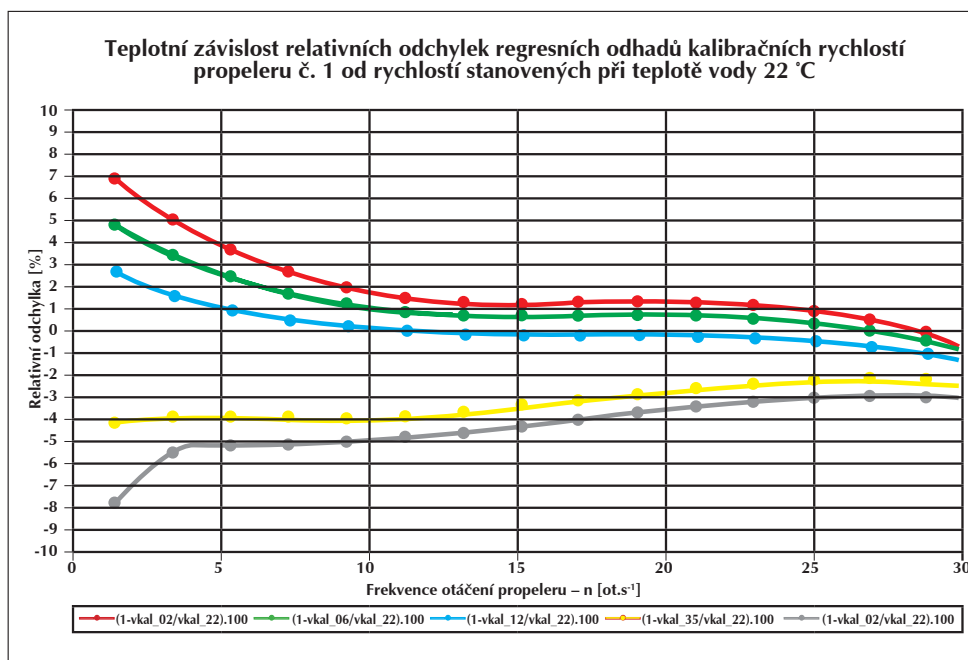
Na základě grafického zobrazení dat můžeme konstatovat, že zcela evidentně existují trendy závislosti kalibračních konstant na teplotě vody při kalibraci, a to pro



Vliv teploty vody na kalibrační konstanty vrtulí Ott C-2 (Mattas, 2005)

kalibrační konstantu α_1 ve všech případech, pro kalibrační konstantu β_1 zřejmě jen pro některé typy propelerů (typ 1 a 5). Tyto trendy jsme se pokusili vyjádřit pomocí několika empirických modelů. Ani v jediném případě jsme však nebyli schopni prokázat jejich statistickou významnost. Součinitele korelace byly ve všech případech značně nízké a Fischerův test součinitelů korelace neprokázal jejich významnost ani na hladině $\alpha = 0,05$. Z grafu je však též patrné, že pokud k ovlivnění výsledků kalibrací nízkou teplotou dochází, je v podstatě omezeno na teploty nižší než přibližně 5 °C. ČKSVV ale kalibrace standardně provádí jen při teplotách větších než 5 °C. Pokud zákazník požaduje provedení kalibrace a teplota vody je nižší, je na tuto skutečnost upozorněn. Kalibrace při teplotách nižších než 5 °C se jinak provádějí zásadně jen z důvodů výzkumu.

V Laboratoři vodohospodářského výzkumu Stavební fakulty VUT v Brně se Zubík a Žoužela zabývali problematikou teplotního ovlivnění výsledků měření vrtulemi. Na speciální měrné trati měřili vrtulí Ott C-2 s třemi propelery (typu 1, 5 a 6) v rozmezí teplot 2–50 °C a v rozmezí rychlostí 0,05–1,65 ms⁻¹. Výsledky měření autoři zpracovali do přehledných grafů; jeden příklad převzatý z jejich práce uvádíme na následujícím obrázku:



Teplotní závislost propeleru č. 1 (Zubík a Žoužela, 2009)

V závěru práce autoři konstatují: „Experimenty ukázaly, že v závislosti na měřené rychlosti proudu, použitým propelerem a teplotě kapaliny je možné očekávat odchylky v řádech procent, a to v závislosti na rostoucí či klesající teplotě vzhledem k teplotě referenční, jež byla uvažována hodnotou 22 °C. Budeme-li tedy vlastní měření realizovat při teplotách například 6 °C s propelerem č. 1 za rychlostí kolem

0,3 ms⁻¹, naměříme o 4,4 % vyšší rychlost! V případě měření při vyšších teplotách je třeba počítat s podobným systematickým odchýlením, ale s minusovým znaménkem. U velmi nízkých rychlostí jsou odchylky ještě větší, dosahující opět v závislosti na poklesu či nárůstu teploty a použitém propeleru až 10 %.“ I přesto, že autoři použili jedinou vrtuli, jsou jejich výsledky dosti přesvědčivé, i když podle našeho názoru by ke kvantifikaci vlivu teploty bylo zapotřebí měření s podstatně větším počtem vrtulí.

Vliv uklidňovací doby mezi jednotlivými jízdami vozíku

Podle ČSN ISO 3455 má být voda v kalibrační nádrži před každou kalibrací relativně klidná. Interval mezi jednotlivými kalibračními jízdami má být volen tak, aby zbytkové rychlosti způsobené pohybem vrtule v nádrži byly zanedbatelné. Doba potřebná k uklidnění vody v kalibrační nádrži závisí na řadě faktorů – zejména na rozměrech kalibrační nádrže, použitých uklidňovacích zařízeních, na předchozí vlečné rychlosti, na typu, resp. velikosti kalibrované vodoměrné vrtule a typu jejího nosiče (upevnění na tyči, na laně se závažím – v tomto případě i na velikosti/hmotnosti závaží), na počtu současně kalibrovaných vrtulí atd.

Pro kalibrační laboratoře, které se touto problematikou blíže nezabývaly, udává ČSN ISO 3455 tabulku doporučených časových intervalů pro uklidnění vody v kalibrační nádrži (intervalů mezi jednotlivými jízdami vozíku) v závislosti na rychlosti předchozího pojezdu:

Rychlost pojezdu [ms ⁻¹]	Doba uklidnění [min]
0,5	10
2	15
5	25
8	30

Podle našich dosavadních zkušeností se uvedené doby zdají být zcela bezpečné jak při současné kalibraci více vrtulí (2–3 na tyči), tak i při kalibraci vrtulí se závažím až do hmotnosti 100 kg. Pokud je kalibrována jediná vrtule v upevnění na tyči, lze uvedené doby v podmínkách naší kalibrační laboratoře považovat podle dosavadních zkušeností za dosti nadsazené.

Vliv upevnění vrtule a její polohy ve žlabu

Jedinou nám známou prací, která se zabývá touto problematikou, je již zmíněná práce Jovanoviče, který shrnul měření vlastní i řadu měření provedených těsně po válce v evropských laboratořích.

Rozborem vlivu upevnění vrtule se zde nebudeme zabývat, protože ČSN ISO 3455 požaduje, aby vrtule byla při kalibraci upevněna stejným způsobem, jaký bude použit při měření. Tento požadavek ČKSJV striktně dodržuje. Značně odlišná je však situace v případě umístění vrtule ve žlabu při kalibraci.

Z práce Jovanoviče vyplývá, že vrtule by neměla být zanořena příliš hluboko – mohl by se projevit, zejména v případě žlabů menších rozměrů, vliv zvětšení zastavěné plochy, což by mohlo přispívat ke vlivu Epperova efektu. Stejně tak by vrtule neměla být příliš blízko k hladině. Podobně se snížením indikované rychlosti může projevit i blízkost stěny. Jovanovič uvádí, že při hloubce vody 0,9 m v kalibračním kanálu v Bělehradě byly odchylky následující:

v [ms^{-1}]	0,5	1,0	1,5	2,0	4,0	4,5
vrtule u dna kanálu [%]	0	0,7	0,67	1,2	1,2	1,73
vrtule těsně pod hladinou [%]	0	0,7	1,0	1,7	1,7	2,3

Obdobně cituje experimenty, kde byly sledovány odchylky vlivem blízkosti dna a stěny kalibračního kanálu, provedené u firmy Ott v Kemptenu, které shrnul v následující tabulce:

v [ms^{-1}]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
vrtule u dna kanálu [%]	0,0	0,4	0,5	0,8	1,2
vrtule u stěny kanálu [%]	0,3	1,1	1,7	2,0	2,1

V Jovanovičově práci však bohužel chybí řada dalších relevantních údajů, takže výše uvedené hodnoty mohou sloužit pouze jako ilustrační.

Problematikou vlivu polohy vrtule ve žlabu se svého času zabývali i pracovníci Výzkumného ústavu vodohospodářského, bohužel jak původní práce Ing. Sotorníka a jeho spolupracovníků, tak i nevyhodnocená data získaná v rámci řešení úkolu Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace hydrometrických vrtulí v letech 2001 a 2002 byla nenávratně ztracena za povodně roku 2002.

Můžeme však odůvodněně předpokládat, že polohy vrtule ve žlabu tak, jak jsou tradičně používány v ČKSVV, mají základ v experimentálních pracích Ing. Sotorníka někdy v 60. letech minulého století. Hodnoty zanoření vrtulí jednotlivých kategorií a přesahy tyčí pod vrtulí uvádíme v následující tabulce:

Vrtule a upevnění	Hloubka zanoření [m]	Přesah tyče [m]
C-2 na tyči 9 mm	0,25	0,08
C-31 na tyči 20 mm	0,40	0,02
vrtule se závažím na laně (podle velikosti závaží)	ca 0,5–0,8	–

Tato zanoření jsou obdobná zanořením, která používá při kalibraci firma Ott Messtechnik

Vrtule a upevnění	Hloubka zanoření [m]	Přesah tyče [m]
C-2 na tyči 9 mm	0,18	0,08
C-31 na tyči 20 mm	0,40	0,18
vrtule se závažím na laně	0,50	–

Vrtule se závaží jsou zavěšeny tak, aby při kalibraci byly ponořeny ca 0,5–0,8 m pod hladinou v závislosti na hmotnosti závaží. To však současně znamená, že během kalibrace je třeba postupně měnit délku závěsu, protože při větších rychlostech jsou vrtule, zejména se závažími menších hmotností, při konstantní délce závěsu vlivem hydrodynamických sil vynášeny ke hladině. Tento problém firma Ott nemá, protože vrtule se závaží nejsou při kalibraci v této firmě zavěšeny na laně, ale závaží s vrtulí je připevněno k tyči a zanořeno do hloubky 0,5 m.

Vzdálenosti vrtulí od stěn žlabu jsou v případě kalibrace jedné vrtule (ať již na tyči či na laně) 1,25 m (vždy v ose žlabu šířky 2,5 m). Při současné kalibraci dvou nebo tří vrtulí je vzdálenost krajních vrtulí od stěn žlabu 0,55 m, tedy vzájemné vzdálenosti mezi vrtulemi jsou 0,7 m.

Dosud nebylo v ČKSVV zjištěno, že by při kalibraci více než jedné vrtule docházelo k vzájemnému ovlivňování chodu vrtulí.

Vliv opotřebení vrtule a její údržby

Hydrometrické vrtule jsou již svým provedením značně robustní měřicí přístroje. Vrtule se totiž skládají z dosti mohutného kovového těla, kterým prochází kovová osa, u výrobků firmy Ott (ale i u ostatních výrobců) uložená v kuličkových ložiscích. Na osu je nasunut nebo našroubován zpravidla kovový propeler (vyrábějí se i plastové) tvaru 2–3chodé šroubovice, který je při obtékání hydrodynamickými silami otáčen; tím se otáčí i osa. Na ose je umístěno spínací zařízení (dnes převážně magnet spínající magnetický jazýčkový kontakt), které spíná elektrický obvod příslušného čítače impulzů. Poněkud odchýlně jsou řešeny pouze již nevyráběné vrtule Ott Texas – osa je pevně upnuta do těla a na ose se v kuličkových ložiscích otáčí propeler spojený s vícechodým šnekem, který otáčí šnekovým kolem spojeným s mechanickým kontaktem.

Dutina v těle hydrometrické vrtule se plní speciálním olejem, který jednak zabraňuje vniknutí vody, jednak maže ložiska. U vrtulí Ott Texas se olejem plní dutina propeleru, v níž jsou ložiska; kromě toho se zde ještě dalším typem oleje o vyšší viskozitě plní komora kontaktu.

Ke změně kalibračních charakteristik může podle našich zkušeností dojít:

- u zcela nových vrtulí zaběhnutím, kdy se podobně jako u jiných mechanických zařízení pohybem dotvářejí a dohlazují povrchy, které se po sobě pohybují; to by se mělo projevit snížením odporů vrtule;
- při výměně některé součásti (zejména osy či ložisek) se ještě navíc může uplatnit změna mechanických odporů změnou mechanických vůlí; při změně parametrů po výměně součásti lze očekávat zlepšení parametrů vrtule zaběhnutím;
- vyběháním kuličkových ložisek (v zásadě jde opět o změnu odporů změnou vůlí);
- u vrtulí Ott typu Texas ještě navíc vyběháním šneku nebo šnekového kola, popř. obou;
- při nárazu vrtule na překážku:
 - změnou tvaru propeleru,
 - poškozením (ohnutím) osy;

- korozí, zejména povrchu propeleru z lehkých slitin, při použití v chemicky upravené vodě (jde o častý případ při garančních měřeních v chladicích okruzích tepelných elektráren), čímž se změní jeho hydrodynamické odpory;
- vniknutím nečistot do průchodu osy tělem vrtule;
- vniknutím nečistot do ložisek;
- polymerizací oleje, který tvoří na ose i ložiscích lepkavou vrstvu.

Poslední tři uvedené možnosti změny kalibračních charakteristik jsou většinou způsobeny špatnou údržbou. Při řádné údržbě a správném skladování by tyto poslední možnosti neměly nastat. Vyčištěné vrtule se mají skladovat bez olejové náplně, neboť film se tvoří po delší době. Poslední možnost lze pak do značné míry omezit používáním speciálního, výrobcem doporučeného a dodávaného oleje.

Dalším známým jevem, který může ovlivňovat výsledky kalibrací i měření, ale který je zatím zcela nepopsaný, je možnost tvorby emulze olej–voda, pokud voda vnikne do olejové náplně vrtule. Tím se samozřejmě změní viskozita náplně.

V rámci úkolu Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí jsme pozornost věnovali problematice vlivu stárnutí vodoměrné vrtule na kalibrační koeficienty.

Byli jsme si plně vědomi, že základním předpokladem pro zahájení studia vlivu stárnutí vodoměrné vrtule na kalibrační koeficienty je dohledání pokud možno všech dat již dříve kalibrovaných vodoměrných vrtulí. V souvislosti s katastrofální povodní v srpnu 2002 v Praze byla totiž jak původní kartotéka, tak i naprostá většina záloh na datových médiích (zip, disketa) zničena. Prvním velice pracným úkolem byla tudíž rekonstrukce datových souborů.

Při studiu jsme se rozhodli použít dva způsoby:

- nejprve jsme vyhledali vodoměrné vrtule, které byly v průběhu let kalibrovány více než čtyřikrát (navíc to byly vlastní vodoměrné vrtule, u kterých byl předpoklad předepsaného zacházení); od každého typu vrtule jsme vybrali tři náhodné soubory, kde jsme sledovali, jak se mění jejich výsledné parametry;
- poté jsme vzali všechny dostupné soubory, které jsme roztřídili podle typu jednotlivých propelerů, setřídili jsme pro tyto případy veškerá data a opět porovnávali výsledné kalibrační koeficienty.

V obou případech jsme používali naměřená data jednak z původního kalibračního vozíku, který byl v našem ústavu v provozu od roku 1962 do roku 1995 (výrobce firma Kempf a Remmers z Hamburku), a dále data od roku 1996 do roku 2000 z kalibračního vozíku, který byl v našem ústavu v provozu od roku 1996 do katastrofální povodně v srpnu 2002 (výrobce firma DICONTE, a. s., z Prahy). Vzhledem k tomu, že kalibrace vodoměrných vrtulí se ve VÚV TGM prováděla vždy důsledně podle normy ČSN ISO 3455, nebyl důvod některá data vyřazovat.

Je pravdou, že kalibrační vozík z roku 1962 od firmy Kempf a Remmers neměl stejné technické parametry jako vozík z roku 1995 od firmy DICONTE, a. s. Nebylo jej možné řídit automaticky a data automaticky posílat do velínu. Vlastní kalibrace byla celkově pracnější, ale při systematickém porovnávání jsme již došli v minulosti

k perfektní shodě mezi výsledky kalibrace s vozíkem z roku 1962 a vozíkem z roku 1995.

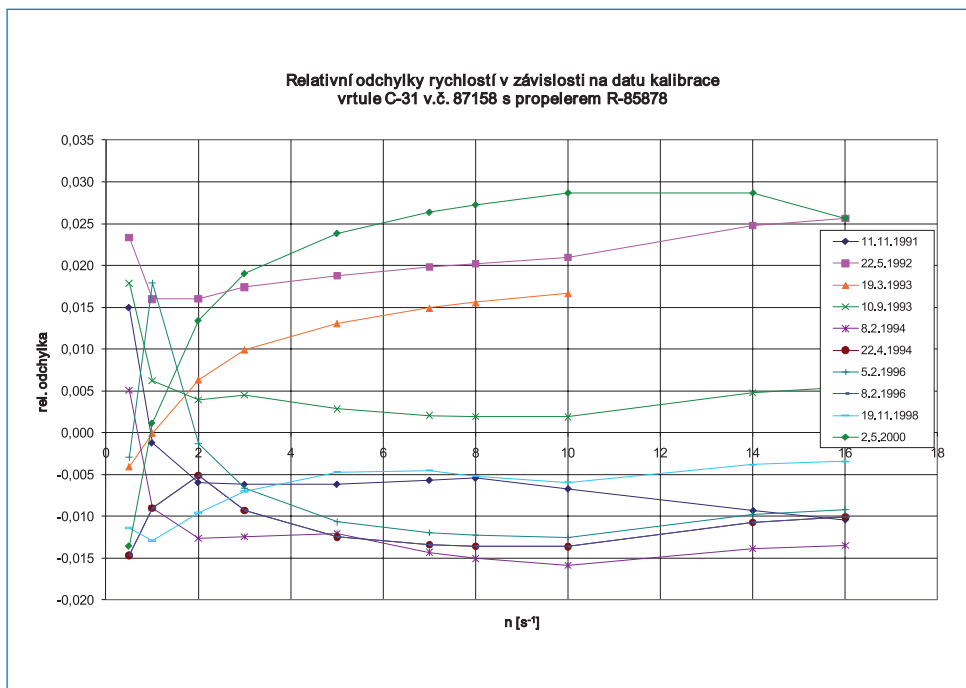
Kalibrační vozík z roku 1995 byl vybaven modernější technologií, byl schopen dosahovat rychlosti až 7 ms^{-1} , plynule se rozjíždět už při rychlosti $0,05 \text{ ms}^{-1}$ a veškerá data po měření posílat automaticky do velínu. Tento vozík splňoval požadavky pro moderní kalibraci vodoměrných vrtulí minimálně na srovnatelné evropské úrovni.

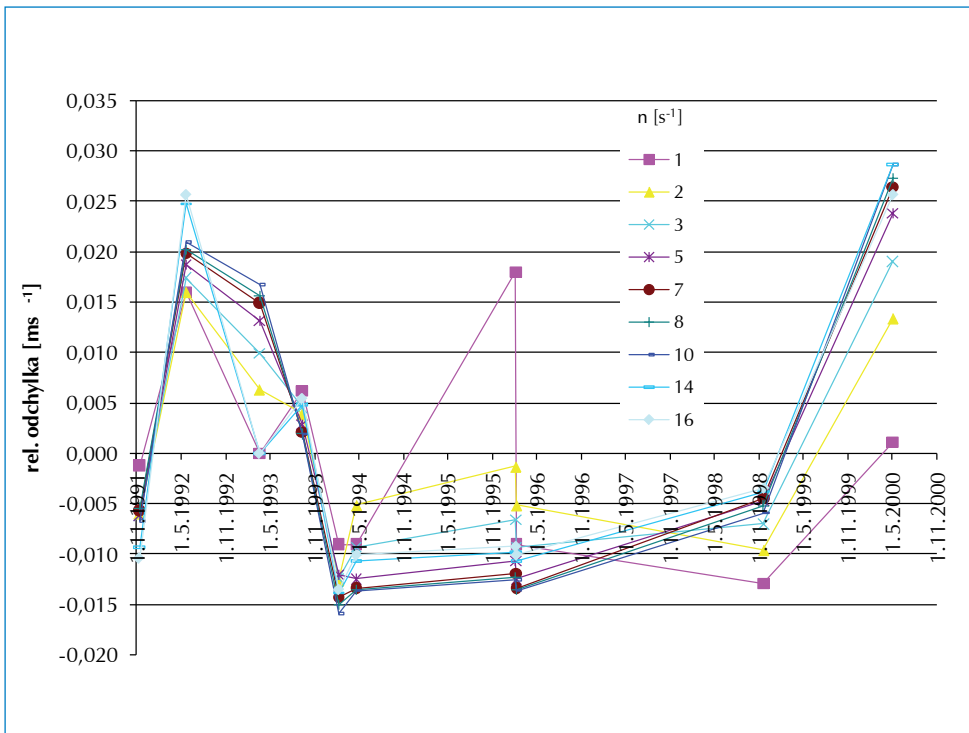
Účelem studia bylo tedy zjistit, jak se mění kalibrační koeficienty s ohledem na stáří vodoměrné vrtule. Zde je nezbytné podotknout, že vlastní časové stárnutí vodoměrné vrtule ovlivňuje i způsob, jakým je s vrtulí zacházeno během vlastního měření i po něm. Naše mnohaleté zkušenosti se zákazníky prokazují, že ne v každém případě se majitelé vodoměrných vrtulí starají o vodoměrné vrtule tak, jak je to předepsáno.

Výsledky provedeného studia byly velice příznivé, neboť se ukázalo, že kalibrační koeficienty se v zásadě příliš nemění a dochází pouze k jejich nevýrazným změnám, které jsou navíc nahodilé, takže vliv stárnutí vrtule na konstanty kalibrační rovnice se nepodařilo prokázat.

Příklad zpracování dat pro vodoměrnou vrtuli Ott C-31 v. č. 87158 s propelerem typu R v. č. 85878 uvádíme pro ilustraci na následujících obrázcích. Odchytky jsou vypočteny od průměrné rychlosti získané na základě všech kalibrací (zde celkem 10). Z obrázku je zřejmé, že nelze vysledovat jakýkoliv trend v čase, není patrná ani změna technologie v r. 1995.

Je skutečností, že při studiu vlivu stárnutí vodoměrné vrtule na kalibrační koeficienty nám nebyly k dispozici potřebné informace o opotřebením vrtule, a tak byly





Relativní odchylka rychlosti od průměru v závislosti na datu kalibrace

hodnoceny vodoměrné vrtule v různé fázi opotřebení. Vrtule byly navíc kalibrovány při různých teplotách vody, ale jak bylo ukázáno výše, tento vliv by se neměl výrazněji projevit. Při běžném zacházení s vodoměrnou vrtulí lze očekávat, že stárnutí vrtule bude spíše záviset na jejím opotřebení, resp. skutečných provozních hodinách než na čase. Problematikou stárnutí vodoměrných vrtulí je však nutné se zabývat i nadále a doplňovat získaná data z kalibrační tak, aby vyšetřované soubory byly co největší.

Nejistota měřidla

Vzhledem k tomu, že při kalibraci se uplatňuje celá řada vlivů, které nejsou do dnes zcela známy, a může se uplatňovat i vliv údržby vrtule a jejího opotřebení, jsou kalibrační konstanty pro každou vrtuli zatíženy určitou nejistotou a při opakovaných kalibracích též sestavy vrtule–propeler se budou poněkud lišit. Z toho též vyplývá, že při výpočtu celkové nejistoty průtoku je zapotřebí tuto nejistotu, vyplývající ze stochastické podstaty kalibračních konstant, zohlednit.

Zde je třeba zdůraznit, že tato stochastická nejistota kalibračních konstant nemá nic společného s nejistotou kalibrace uvedené na kalibračním listu, která se podle ČSN ISO 748 uvažuje jako systematická složka nejistoty.

ČSN ISO 748 udává tyto standardní rozšířené nejistoty v tabelární formě:

Nejistoty kalibrace [%] v závislosti na rychlosti

rychlost [ms^{-1}]	0,03	0,10	0,15	0,25	0,50	>0,50
individuální kalibrace	20	5	2,5	2	1	1
skupinová kalibrace	20	10	5	4	3	2

Tytéž hodnoty uvádí i Herschy. Boiten oproti tomu udává relativní směrodatnou odchylku 5 % pro $v = 0,2 \text{ ms}^{-1}$, snižující se na 0,5 % pro rychlost proudění $v = 2,5 \text{ ms}^{-1}$.

Pro určení typických nejistot kalibračních konstant jsme z databáze ČKSVV vybrali několik vrtulí typu Ott C-2 s nejběžněji používanými propelery (č. 1, 2, 3, 5 a 6) a několik vrtulí typu Ott C-31. Základní kritéria pro jejich výběr byla: a) vrtule byla v posledních letech kalibrována nejméně třikrát, b) u vrtule se dá předpokládat kvalitní údržba, c) k dispozici jsou data pro minimálně tři vrtule stejného typu (tzn. typ těla s typem propelleru).

Přehled počtu použitých vrtulí C-2 a jejich kalibračních rovnic udává následující tabulka:

Přehled počtů použitých vrtulí a kalibračních rovnic

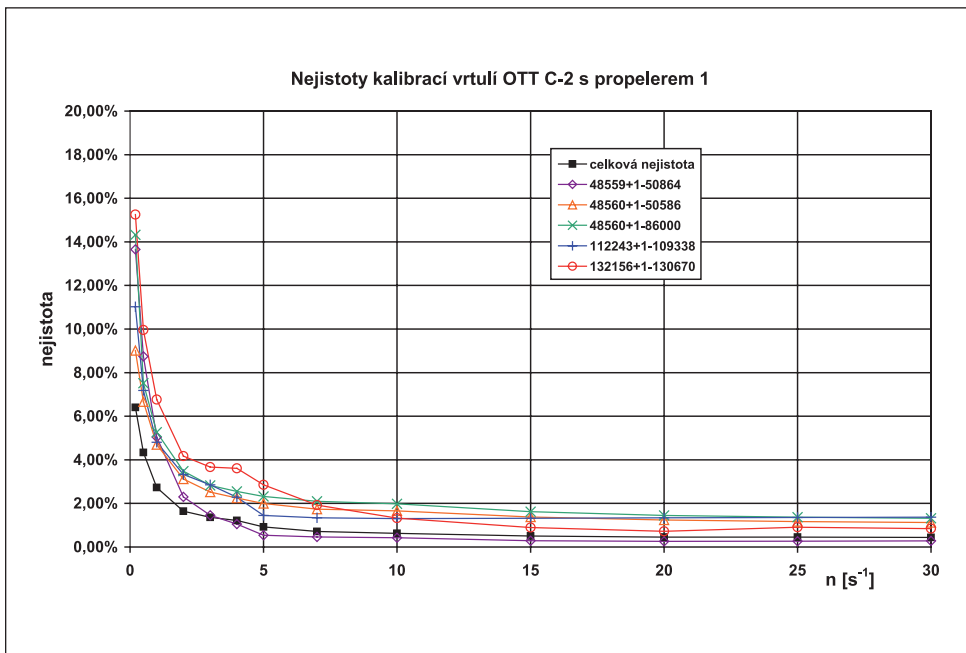
propeler	1	2	3	5	6
počet vrtulí C2	5	3	3	5	3
počet kalibračních rovnic	19	28	23	18	13

U vrtulí Ott C-31 splňovaly požadované podmínky pouze vrtule s propelerem typu 4, které byly čtyři s celkem devatenácti kalibračními rovnicemi.

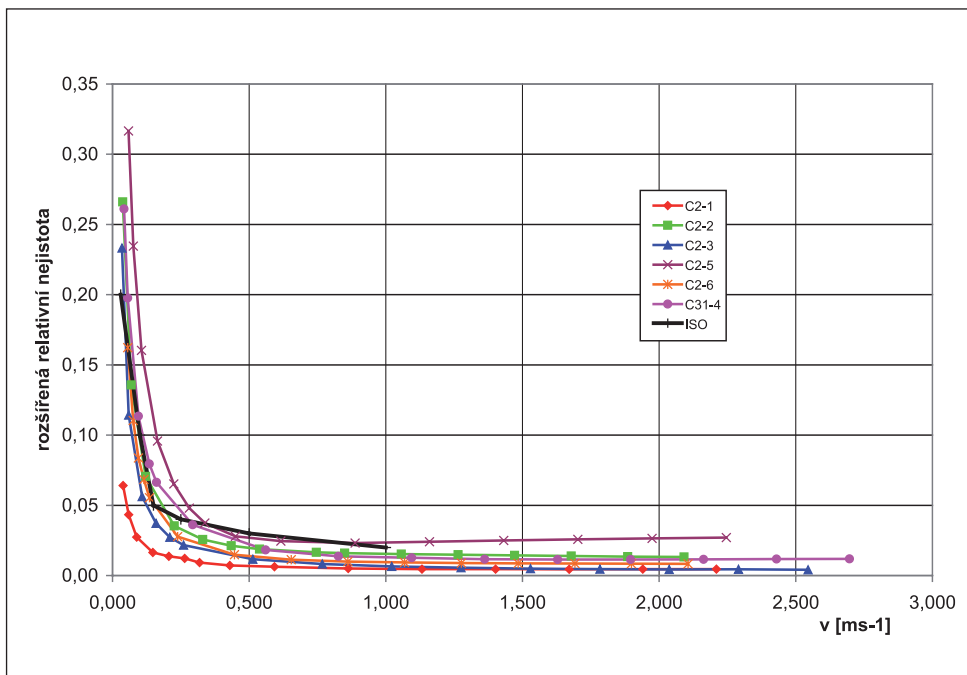
Všechny vrtule byly kalibrovány v upevnění na tyči.

Protože v zásadě nelze statisticky vyhodnotit přímo kalibrační konstanty – např. hranice jednotlivých lineárních úseků nejsou v rámci řady opakovaných kalibrací konstantní, určili jsme nejistoty na základě statistického rozboru rychlostí, vypočtených pro zvolené frekvence otáček n z více kalibračních rovnic. Z provedeného vyhodnocení (viz následující grafy) je patrné, že velikost nejistoty zřejmě do značné míry závisí na typu propelleru.

I přes značně omezený počet zpracovaných kalibračních rovnic můžeme konstatovat, že naše výsledky jsou v poměrně dobrém souladu s doporučením ČSN ISO 748.



Standardní rozšířené interkalibrační nejistoty jednotlivých vrtulí Ott C-2 s propellerem 1



Standardní rozšířená relativní interkalibrační nejistota (Ramešová a Mattas, 2009)

Výzkumné práce provedené ve VÚV v souvislosti s kalibracemi vodoměrných vrtulí

V souvislosti s kalibracemi hydrometrických vrtulí je samozřejmě jistá část pracovní kapacity věnována i výzkumu. Ten směřoval ke dvěma hlavním cílům – zlepšování a modernizaci technického vybavení kalibrační stanice a výzkumu vlivů ovlivňujících výsledky kalibrací.

Nejstarší nám známé práce mající souvislost s modernizací zařízení (za povodně roku 2002 byly bohužel zničeny veškeré výzkumné zprávy i archiv, takže řada údajů týkajících se této tematiky je založena převážně na vzpomínkách pamětníků) provedl v druhé polovině 60. let minulého století Ing. Věkoslav Sotorník, CSc., který navrhl a zhotovil první zařízení pro automatizovaný sběr dat (podrobněji se tím zabýváme v kapitole Historie na začátku publikace). V obdobném duchu pak pokračoval tragicky zesnulý Ing. Josef Zaujec, který v letech 1986–1987 nahradil původní Sotorníkovo zařízení, které již dosloužilo, novým na bázi průmyslového počítače SAPI-1. S příchodem osobních počítačů třídy PC vypracoval roku 1991 Ing. Petr Šnederfler první program pro statistické zpracování kalibračních křivek. Poměrně značné úsilí bylo věnováno přípravě rekonstrukce technického vybavení v první polovině devadesátých let minulého století, kterého se řadou ideových návrhů velmi aktivně zúčastnil tehdejší vedoucí oddělení elektroniky a měřicí techniky RNDr. Ing. Pavel Čížek, CSc.

Teorií hydrometrických vrtulí se zabýval Ing. Daniel Mattas, který v rámci závěrečné práce na mezinárodním postgraduálním kursu Hydrological Methods for Developing Water Resources Management pořádaného VITUKI (Maďarsko) pod záštitou UNESCO roku 1978 předložil práci Some Remarks to the Theory of the Helix-Propeller Current-Meter.

Značná pozornost byla a je věnována různým vlivům, které se mohou projevovat v procesu kalibrace. Práce provedené Ing. Sotorníkem a jeho spolupracovníky jsou díky povodni nenávratně ztracené – pokud pamětníky neklame paměť, byly zaměřeny zejména na vliv upevnění vrtulí a jejich polohy v profilu žlabu. V souvislosti s garančními měřeními vodních strojů, která v 50.–80. letech minulého století tvořila významnou součást činnosti VÚV, byla pozornost věnována i směrovým charakteristikám vrtulí.

Na tyto starší práce navázal úkol Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí, řešený pod vedením Ing. Josefa Libého, CSc., v letech 2001–2004. Po ukončení tohoto úkolu práce, byť již méně intenzivně, pokračovaly v letech 2005–2007 v rámci výzkumného záměru a pokračují dodnes.

Výzkum byl, kromě jiného, zaměřen na dvě hlavní otázky, a to zda se nějak projevuje vliv stárnutí hydrometrických vrtulí na hodnoty kalibračních konstant a zda se projevuje vliv teploty, při níž kalibrace probíhá, v hodnotách kalibračních konstant. Ani vliv stárnutí vrtulí na kalibrační konstanty, ani vliv teploty se nepodařilo statistickými metodami prokázat. O výsledcích prací týkajících se vlivu teploty při kalibraci je pojednáno v kapitole Nejistota kalibrací – Vliv teploty.

Zatím poslední prací bylo zhodnocení interkalibrační nejistoty, tedy nejistoty vlastního měřidla. O tomto problému bylo již pojednáno v kapitole Nejistota kalibrací – Nejistota měřidla.

Jiné výzkumné práce provedené v kalibračním žlabu

Velký kalibrační žlab byl postaven tak, aby jej bylo možné použít též jako standardní hydraulický žlab velkých rozměrů s napájením z Vltavy. Všechny vlečné vozíky byly kromě toho zkonstruovány tak, aby umožňovaly i vlečení různých těles ve vodě, např. pro stanovení hydraulických odporů lodních trupů apod. Aby bylo možné lépe sledovat jak průběh klasických hydrotechnických pokusů, tak i pokusy s vlečenými tělesy, je žlab vybaven v přední části pozorovacím sklepem s bočními okny. Původně byla okna prosklená, během let však bylo sklo nahrazeno ocelovým plechem. Až při generální opravě žlabu v letech 1994–1997 byla okna znovu zasklena. Sklo je před poškozením nárazem vlečených předmětů (zejména vrtulí kalibrovaných na laně) chráněno drátěnou mříží.

Pokud je nám známo, byl velký žlab využíván k jiným pracím než kalibrace vrtulí jen sporadicky. Výzkumné práce uložené v ústavní knihovně a archivu oboru byly zničeny za povodně roku 2002 a následující výčet, opět založený převážně na vzpomínkách pamětníků a sporadicky dochované literatuře, tudíž nemusí být úplný.

V 50. letech minulého století prováděl ve žlabu ověřování svého návrhu lapáku splavenin Ing. Dr. Pavel Novák, CSc. Návrh vycházel z lapáku Károlyiho, byl však značně modifikován a zlepšen a je znám pod názvem lapák VÚV.

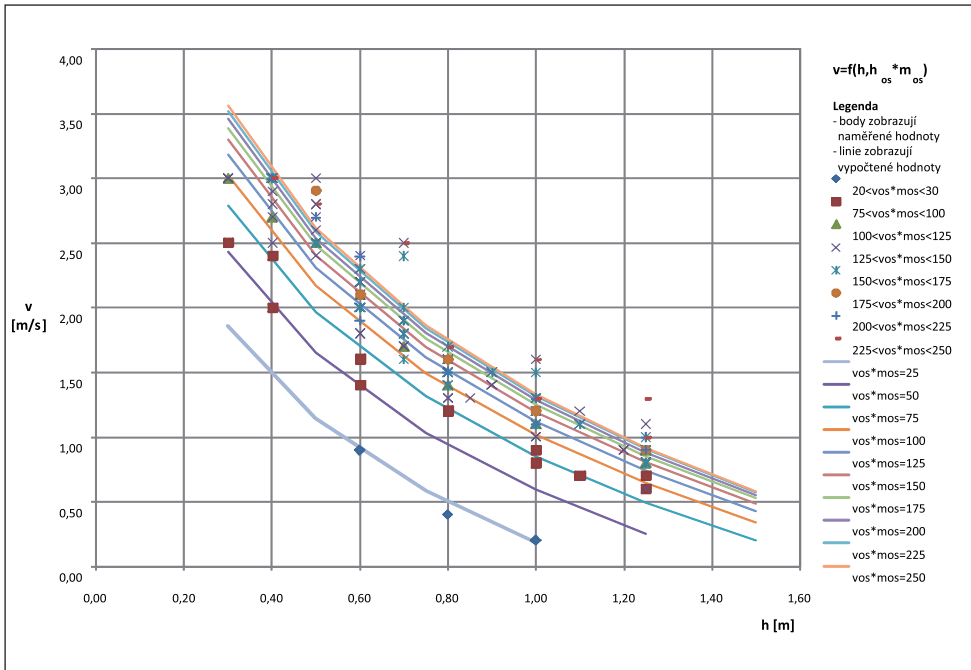
Ing. Zdeněk Thomas, CSc., využil začátkem 70. let minulého století žlab při svém výzkumu sedání mostních pilířů prozatímních mostů založených povrchově na splaveninovém (šterkovém) dně pro instalaci velkého hydraulického modelu (v měřítku 1 : 4). Voda na model byla přiváděna tak, jak se při výstavbě žlabu předpokládalo – z plavebního kanálu. Při pokusech se projevil vliv plnění plavební komory kolísáním hladiny v plavebním kanále, a tím i změnou průtoku, takže vzhledem k tehdy značně intenzivnímu lodnímu provozu se měření musela odehrávat během noci.

Koncem 70. či počátkem 80. let prováděl ve žlabu pokusy se snížením hydraulického odporu závodních (štrekařských) lodí (tehdy Ing. Jaroslav Pollert, CSc. Pro snížení odporu třením byl na loď (single a double kánoe a kajak) aplikován nátěr makromolekulárním gelem. Loď s posádkou byly při pokusech vlečeny vozíkem, odpory byly měřeny silovým snímačem při různých rychlostech. Pokusy prokázaly účinnost tohoto nátěru, který byl ale posléze mezinárodní kanoistickou federací zakázán.

Další nestandardní práce se uskutečnily až v posledních letech. Roku 2007 provedl Ústav pro hydrodynamiku ČSAV výzkum zaměřený na stanovení hydraulických odporů plováků hydroplánu. Plovák byl upevněn k několikasožkové váze, připevněné k vlečnému vozíku. Odpory se měřily za různých rychlostí pohybu vozíku.

Zatím poslední prací byl poměrně široce založený výzkum stability osob v proudící vodě, který provedl roku 2008 Ing. Martin Salaj v rámci přípravy své dizertační práce. Na vozík byla instalována speciální podesta, jejíž hloubku pod vodou bylo možno měnit. Testované osoby (dobrovolníci) se při daném ponoření podesty za pohybu vozíku postupně s rostoucími rychlostmi na podestě pohybovaly až do okamžiku, kdy při dané hloubce vody došlo ke ztrátě stability testované osoby.

Testovaných osob bylo celkem 29, z toho 11 žen a 18 mužů, ve věku 6–66 let. Hmotnost jednotlivých osob se pohybovala v rozmezí 20–120 kg, jejich výška byla 1,14–1,95 m. V rámci výzkumu se uskutečnilo celkem 725 testů (pojezdů) s plošinou v hloubkách 0,30–1,25 m při rychlostech 0,2–3,0 ms⁻¹. Výsledné hodnoty rychlosti v [ms⁻¹], při níž dochází ke ztrátě stability, jsou uvedeny níže na grafu jako funkce hloubky vody h [m] a součinu hmotnosti a výšky osoby $m_{os} \cdot v_{os}$ [kgm].



Rychlost v , při níž dochází ke ztrátě stability osoby při hloubce vody (podle Salaje, 2009)



Vozík s instalovanou plošinou



Průběh pokusu – až k nevyhnutelnému pádu

Czech Calibration Station for Current Meters

The publication recaps the history and facilities of the Czech Calibration Station for Current Meters at the TGM Water Research Institute, as well as specialist issues related to its operation and benefits brought about by the Station to water management.

The history of current meters calibration begun in the Institute in 1930 when the new building of what was then the State Research Institute of Water Structures was opened. The new building incorporated a sizeable hydraulic flume 2.5 metres wide with an effective length of 152.5 metres and water depth of 1.8 metres (being one of the largest in Europe), fed from the Vltava River. The flume was fitted with guide rails carrying a towing trolley used for current meter calibration and towing of objects in steady water. The trolley could move at speeds of 0.02 to 6.0 ms^{-1} and was fitted with a chronograph recording time, trajectory and the number of current meter impulses.

In 1962, the original trolley was replaced with a new one manufactured by Kempf-Römmers, offering comparable parameters. The chronograph was also replaced in latter 1960s with an electronic apparatus developed by the Water Research Institute. The apparatus was capable of collecting data from three calibrated meters simultaneously. The time base was provided by a quartz clock with a resolution of 0.01 seconds and the distance travelled was read with an optoelectronic device from a metal band with apertures spaced at 0.05 metres.

Over time, the apparatus gradually deteriorated, in particular the electromechanical distance and impulse counters. A new device was developed and commissioned in 1987, based on an 8-bit computer SAPI-1. Automated processing of calibration equations using an IBM PC compatible computer was introduced in early 1990s. However, data was still fed manually into the computer.

A comprehensive refurbishment of the Station's technological equipment begun in 1995 and brand new equipment was installed. A towing trolley by a local company DICONT, a. s., was computer-controlled and fitted with a data collection and transfer system linked to the central desk. The data was processed on-line. The interval of available speeds was 0.02 to 7.0 ms^{-1} . As the installed equipment offered superior technical parameters, the Czech Calibration Station for Current Meters applied for accreditation and in 1997 was recognised by the national accreditation authority as the calibration laboratory No. 2278, the only laboratory calibrating the current-meters in the Czech Republic.

In 2002, the Water Research Institute was struck by a disastrous flood, which caused a total destruction of all technical equipment, structural damage of the flume as well as complete destruction of the current meter calibrations archive. DICONT, a. s., supplied the new towing trolley in an upgraded version reflecting the achieved technical advances in the field.

The chapter **Current Meters and Other Devices for Current Measurements** presents a brief history of current meters, including Woltmann meters of the traditional design commonly used across Europe as well as Price type meters. The chapter also describes in some detail the two main types of fixing of meters for measurements – on a rod and on a cable with a sinker. The latter part of the chapter contains specifications of modern devices based on different principles of operation – electromagnetic and acoustic meters.

The chapter **Facilities of the Czech Calibration Station for Current Meters** lists in detail the existing facilities and equipment of the calibration station: the towing tank, towing trolley and the available hardware and software.

The chapter **Current Meter Calibration Method** describes the applied method of current meter calibration based on the standard ISO 3455 and the application of the standard in the local conditions.

The chapter **Calibration Sheet** lists examples of several historical calibration sheets and a comparison with the current design of the sheet.

The chapter **Calibration Uncertainty** forms the core of the whole publication. The opening two parts of the chapter contain a summary of the theoretical basis of uncertainty determination and description of practical applications of the theory in activities of the calibration station.

Subsequent sections of the chapter specify various aspects that may influence both the measurements and calibration results. These include in particular the Epper's effect, the influence of temperature, the effects of time required for water surface to stabilise between separate trolley rides, the effects of the current meter attachment and its position within the flume, as well as the effects of the current meter wear and maintenance. The last section of the chapter deals with the uncertainty of calibration constants for particular current meters. The results of analyses performed on data collected in the laboratory correspond very well with values specified in ISO 748.

The chapter **Research Projects Investigated in the Water Research Institute in Relation to Current Meter Calibrations** gives a brief overview of projects designed both to improve and modernise the equipment used and to recognise and quantify factors affecting calibration results. Some of the results obtained are presented in the Calibration Uncertainty chapter.

By way of conclusion, the publication lists other research projects carried out using the calibration flume. The calibration flume was originally designed as a standard-design hydraulic flume of considerable dimensions. The channel has been used as a purely hydraulic flume only sporadically and the works and research projects unrelated to calibration are summarised in the concluding chapter.

Further information, supplementary to the publication, is available at the calibration station website at <http://cksvv.vuv.cz/>, which is available in Czech only for the time being.

Souhrn

Publikace se zabývá historií a vybavením České kalibrační stanice vodoměrných vrtulí při Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v. v. i. Zabývá se též odbornými problémy spojenými s její činností a přínosem pro vodní hospodářství.

Historie kalibrace hydrometrických vrtulí v našem ústavu začíná roku 1930, kdy byla otevřena nová budova tehdy Státních výzkumných ústavů hydrologického a hydrotechnického. Součástí nové budovy byl i velký hydraulický žlab šířky 2,5 m a využitelné délky 152,5 m s hloubkou vody 1,8 m (jeden z největších v Evropě), napájený vodou z Vltavy. Žlab byl vybaven kolejnicemi, po nichž pojížděl elektrický vozík pro kalibrace vrtulí a pokusy s vlečením těles v klidné vodě. Vozík se mohl pohybovat rychlostí 0,02–6,0 ms⁻¹ a byl vybaven chronografem pro záznam času, dráhy a počtu signálů vrtule.

Tento původní vozík byl roku 1962 nahrazen modernějším od německé firmy Kempf-Römmers obdobných parametrů. V druhé polovině 60. let byl také nahrazen chronograf elektronickou aparaturou vyvinutou ve VÚV. Aparatura dovolovala sběr dat ze tří současně kalibrovaných vrtulí. Časovou základnu tvořily elektronické křemenné hodiny s rozlišením času 0,01 s, projetá dráha byla odvozena z dlouhého kovového pásu s otvory rozteče 0,05 m s optoelektronickým snímáním.

Během doby zařízení dosloužilo, zejména elektromechanická počítadla dráhy a impulzů vrtulí. Roku 1987 bylo vyvinuto a uvedeno do provozu nové zařízení na bázi osmibitového počítače SAPI-1. Počátkem 90. let bylo zavedeno i automatizované vyhodnocení kalibračních rovnic na bázi počítače třídy PC. Data však musela být do počítače stále vkládána ručně.

V roce 1995 se započalo s komplexní rekonstrukcí technického vybavení a roku 1996 bylo nainstalováno zcela nové zařízení. Vozík vyrobený firmou DICONT, a. s., byl řízený počítačem a měl systém pro sběr dat a jejich přenos do centrálního velínu; data se zpracovávala on-line. Rozsah rychlostí pojezdu byl 0,02–7,0 ms⁻¹. Vzhledem k tomu, že zařízení mělo špičkové technické parametry, zažádala ČKSVV o akreditaci a roku 1997 bylo pracoviště národním akreditačním orgánem akreditováno jako kalibrační laboratoř č. 2278, jediná laboratoř svého druhu v celé ČR.

Roku 2002 postihla VÚV velká povodeň, která měla za následek nejen totální zničení veškerého technického vybavení, poškození stavebních částí žlabu, ale i zničení kompletního archivu dat kalibrace vodoměrných vrtulí. Nový vlečný vozík dodala opět firma DICONT, a. s., v nové verzi odpovídající vysoké technické vyspělosti oboru.

Kapitola **Hydromerické vrtule a další přístroje pro měření rychlosti proudění** je věnována historii a vývoji hydrometrických vrtulí. Jsou zmíněny klasické vrtule Woltmannova typu užívané v Evropě i vrtule Priceova. Pozornost je věnována i dvěma základním způsobům jejich upevnění při měření – na tyči a na laně se závažím. Druhá část kapitoly zmiňuje moderní přístroje založené na jiných principech – měřidla elektromagnetická a akustická.

V kapitole **Vybavení ČKSVV** je podrobně popsáno současné vybavení kalibrační stanice – kalibrační žlab, vlečný vozík a používaný hardware i software.

Kapitola **Metoda kalibrace vodoměrných vrtulí** popisuje metodu kalibrace vodoměrných vrtulí, která vychází z ISO 3455, a aplikaci této normy v našich podmínkách.

V kapitole **Kalibrační list** jsou ukázky několika historických kalibračních listů včetně současného provedení.

Kapitola **Nejistota kalibrací** je těžištěm celé práce. V prvních dvou částech se zabývá teoretickým základem stanovení nejistot a praktickou aplikací těchto poznatků na podmínky ČKSVV.

Další části kapitoly jsou věnovány různým vlivům, které se mohou při kalibraci vodoměrných vrtulí projevit a výsledky kalibrace ovlivnit. Jde zejména o tzv. Epperův efekt, vliv teploty, vliv doby nutné pro uklidnění vodní hladiny mezi jednotlivými pojezdy kalibračního vozíku, vliv upevnění vrtule a její polohy v kalibračním žlabu a vliv opotřebení vrtule a její údržby. Poslední část této kapitoly se zabývá nejistotou kalibračních konstant dané vrtule. Výsledky rozboru dat shromážděných v naší laboratoři dobře odpovídají hodnotám uváděným v ISO 748.

Kapitola **Výzkumné práce provedené ve VÚV v souvislosti s kalibracemi vodoměrných vrtulí** uvádí stručný přehled prací zaměřených jednak na zlepšování a modernizaci zařízení, jednak na poznání a kvantifikaci vlivů ovlivňujících výsledky kalibrací. Některé výsledky těchto prací jsou prezentovány v kapitole Nejistota kalibrací.

Kalibrační žlab byl původně navržený jako standardní žlab hydraulický velkých rozměrů. Jako hydraulický žlab byl však využíván jen sporadicky – tyto práce a další výzkumné projekty nesouvisející s kalibracemi, ale provedené v kalibračním žlabu jsou stručně shrnuty v kapitole **Jiné výzkumné práce provedené v kalibračním žlabu**.

Zájemci o další údaje se mohou kromě této brožury informovat i na našich internetových stránkách <http://cksvv.vuv.cz/>.



Prezident republiky Václav Klaus při návštěvě ČKSVV v roce 2009

Literatura

Boiten, W. Hydrometry. Rotterdam : A. A. Balkema, 2000.

Caesperlein, A. Historical Development of Hydrometry. In Symposium in the Tercenary of Hydrology, Paris 9–12 sept. 1974, UNESCO, p. 54–63, dostupné z <http://www.cig.ensmp.fr/~hydro/BIB/UNESCO/3siecles006.pdf>

ČSN ISO 748 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech – Metody rychlostního pole.

ČSN ISO 2537 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem.

ČSN ISO 3455 Měření průtoků kapalin v otevřených korytech – Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích.

ČSN P ENV 13005 Pokyny pro vyjádření nejistoty měření. Praha : ČNI, 2005.

EA 04/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích. Praha : ČIA, 2002.

Frazier, AH. Water Current Meters in the Smithsonian Collection of the National Museum of History and Technology. Washington : Smithsonian Institution Press, 1974, dostupné z http://www.sil.si.edu/smithsoniancontributions/HistoryTechnology/pdf_lo/SSHT-0028.pdf

Herschey, RW. Streamflow Measurement. 2nd ed. E&FN Spon, 1995.

Hubáček, Z. Zpráva o cejchování hydrometrických vrtulí, s návrhy dalších opatření a využití výpočetní techniky. Praha : VÚV, 1966.

Jovanovič, S. Chidrometrisko krilo, teorija, tariranje i tačnost pri merenju. Beograd : Chidrotehnički institut Jaroslav Černi, 1957.

Kolupaila, S. Hidrometrija, II tomas. Kaunas : Kauno Universitetas, Statybos fakultetas, 1940.

Kříž, V. aj. Hydrometrie. Praha : SPN, 1988.

Libý, J. aj. Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí. Výroční zpráva za rok 2001. Praha : VÚV T.G.M., 2001.

- Libý, J. aj. Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí. Výroční zpráva za rok 2002. Praha : VÚV T.G.M., 2002.
- Libý, J. aj. Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí. Výroční zpráva za rok 2003. Praha : VÚV T.G.M., 2003.
- Libý, J. aj. Výzkum hydrodynamických jevů v procesu kalibrace vodoměrných vrtulí. Výroční zpráva za rok 2004. Praha : VÚV T.G.M., 2004.
- Libý, J. aj. Výstupy řešení výzkumného záměru 2005. Část týkající se České kalibrační stanice. Praha : ČKSVV – VÚV T.G.M., 2005.
- Libý, J. a Ramešová, L. Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí (akreditovaná kalibrační laboratoř) a její úsilí při postupném odstraňování nežádoucích jevů z procesu kalibrace vodoměrných vrtulí. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2005, roč. 47, č. 3, příloha *Vodního hospodářství* č. 10/2005.
- Mattas, D. Some Remarks to the Theory of the Helix-Propeller Current-Meter. International Post-Graduate Course on Hydrological Methods for Developing Water Resources Management. Budapest : UNESCO/VITUKI, 1978 (závěrečná práce).
- Mattas, D. Vliv teploty na provoz a kalibrace hydrometrických vrtulí. In Sborník odborného semináře k VZ MSM6840770002, Stavební fakulta ČVUT v Praze 2005, s. 51–57.
- Novák, P. Výzkum funkce a účinnosti přístrojů na měření splavenin. Praha : VÚV, 1959, Práce a studie, sešit 99.
- Ott, LA. Theorie und Konstantenbestimmung des hydrometrischen Flügels. Berlin, 1925.
- Ramešová, L. Velký pokusný žlab. Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí. Praha : VÚV T.G.M., 1994.
- Ramešová, L. a Libý, J. Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 1999, roč. 41, č. 2, s. 10–11, příloha *Vodního hospodářství* č. 6/1999.
- Ramešová, L. a Mattas, D. Nejistota kalibrace hydrometrických vrtulí. In Otázky vodohospodářského výzkumu a praxe. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2009, s. 98–102.
- Rantz, SE. Measurement and Computation of Streamflow. Vol. 1. Measurement of Stage and Discharge. USGS Water-Supply Paper 2175. Washington : USGS, 1982.

Salaj, M. Analýza povodňových rizik osob. Doktorská disertační práce. ČVUT v Praze, Stavební fakulta, 2009.

Smetana, J. Státní výzkumný ústav hydrotechnický T. G. Masaryka. Jeho účel, vznik a zařízení. Práce Státního výzkumného ústavu hydrotechnického T. G. Masaryka, č. 1. Praha : Státní ústav hydrologický, 1930.

Sotorník, V. Cejchování hydrometrických vrtulí. *Vodní hospodářství*, 1975, řada A, č. 8, s. 220–223.

Thibodeaux, KG. A Brief Literature Review of Open-Channel Current Meter Testing. USGS Staff-Published Research. Lincoln : University of Nebraska, 1992, dostupné z <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1133&-context=usgsstaffpub>

Thomas, Z. Sedání mostních pilířů uložených na povrchu splaveninového dna vodního toku. Praha : VÚV, 1974. Práce a studie VÚV, sešit 134.

Troskolański, AT. Hydrometry. Theory and Practice of Hydraulic Measurements. Pergamon Press, 1960.

Zubík, P. a Žoužela, M. Vliv extrémních teplot na vykazovanou rychlost kapaliny měřenou vodoměrnou vrtulí. Závěrečná zpráva úkolu. Program rozvoje metrologie 2008. Brno : VUT v Brně, Laboratoř vodohospodářského výzkumu, 2009.

Železnjakov, GV. Teorija gidrometrii. 2oe izd. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1976.

<http://www.ott-hydrometry.de/>

<http://www.seba-hydrometrie.de/>

<http://www.rickly.com/index.htm>

<http://www.globalw.com/index.asp>

<http://www.forestry-suppliers.com/index1.asp>

<http://www.valeport.co.uk/Home.aspx>

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

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

Libuše Ramešová, Daniel Mattas

ČESKÁ KALIBRAČNÍ STANICE VODOMĚRNÝCH VRTULÍ
Nežádoucí jevy v procesu kalibrace a jejich eliminace

Vydal Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka,
veřejná výzkumná instituce
Praha 2010

Redakční rada:

RNDr. Dana Baudišová, Ph.D. (předsedkyně), Ing. Václav Bečvář, CSc.,
Ing. Šárka Blažková, DrSc., Ing. Petr Bouška, Ph.D.,
RNDr. Blanka Desortová, CSc., Ing. Jana Hubáčková, CSc., RNDr. Josef Fuksa, CSc.,
Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., RNDr. Hana Mlejnková, Ph.D.,
Ing. Věra Otčenášková, Mgr. Libuše Opatřilová, Ing. Eva Pospíšilová,
Ing. Dagmar Sirotková, RNDr. Přemysl Soldán, Ph.D., Ing. Václav Šťastný,
Ing. Naďa Wannerová, Mgr. Aleš Zbořil

Odpovědný redaktor: Mgr. Josef Smrták
Grafické zpracování: PAPAVER
Tisk: VAMB Štěchovice

Náklad 500 výtisků, 4,7 AA
Vydání první

ISBN 978-80-87402-09-2