

Kalibrační centrum průtokoměrů

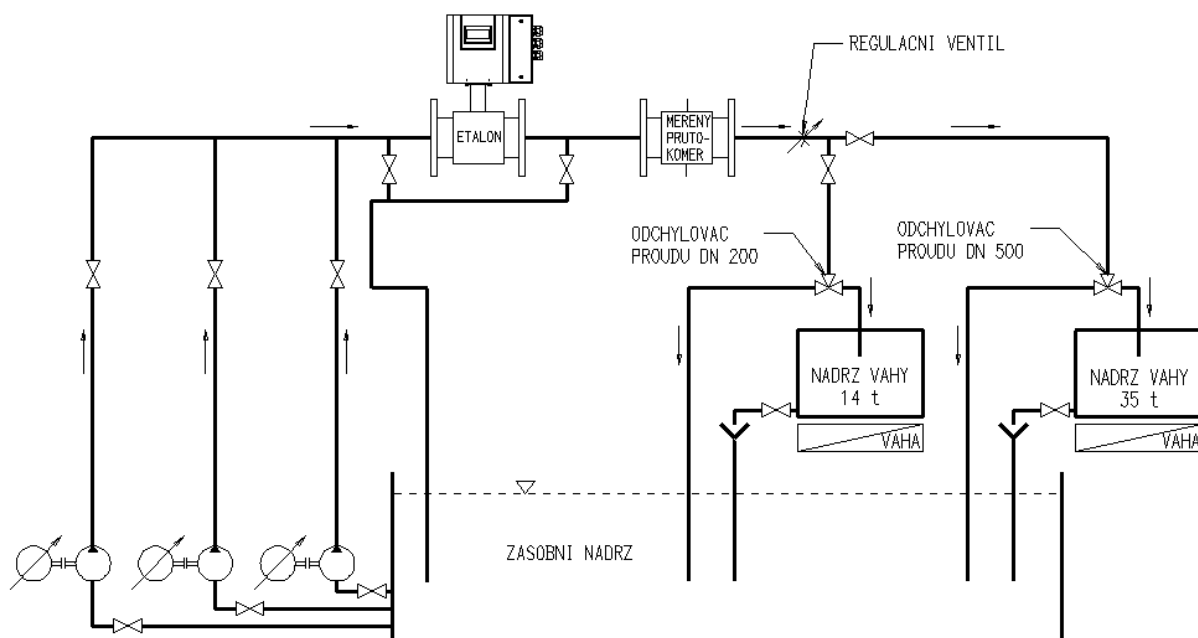
Václav Slaný
BS design Bystřice nad Pernštejnem

Úvod

Výrobce průtokoměrů firma SEIKO Flowcontrol s.r.o. v Blatnici pod Sv. Antonínkem provádí nastavování parametrů a konečnou kalibraci vyrobených průtokoměrů v kalibračním centru firmy VENTURI Calibration Services s.r.o., které je finální součástí výrobního procesu. Rozsah světlostí vyráběných průtokoměrů je od DN 40 až po DN 1200. Pracují na principu snímání diferenčního tlaku ve zcela zaplněném kruhovém potrubí. Kalibraci zajišťuje centrum na kalibrační lince, která splňuje požadavky ČSN EN ISO 5167 [5]. Podle této normy jsou to požadavky na kalibraci clony, dýzy a Venturiho trubice.

Kalibrace průtokoměrů je prováděna statickou metodou (letmým startem) podle ČSN EN 24185 [4]. Kalibrační linka je sestavena podle schématu na obrázku 1C citované normy. Při kalibraci probíhá čerpání kapaliny (v tomto případě teplé pitné vody) ze zásobní nádrže přes zvolené etalonové měřidlo, kalibrované měřidlo, regulační ventil průtoku a odchylovač proudu zpět do zásobní nádrže. Linka má svou etalonovou část a váhovou část s nádržemi na digitálním váhovém zařízení a odchylovače proudu. Pro pokrytí rozsahu požadovaných průtoků vody podle jednotlivých světlostí průtokoměrů lze přepojit kalibrační linku vždy na větší nebo menší váhovou část (viz schéma na *obr. 1*). Činnost kalibrační linky je řízena z PLC.

Ke kalibrační lince je příslušný odchylovač proudu DN 500 s nádrží pro 35 m³ (t) vody a po přepojení odchylovač proudu DN 200 s nádrží pro 14 m³ (t) vody.



Obr. 1 - Schéma kalibrační linky DN 40 – DN 1200 (zjednodušeno)

Poznámka:

- označení světlostí v názvu kalibrační linky značí rozsah světlostí průtokoměrů, které se na dané lince měří
- označení světlostí v názvu odchylovače proudu značí světlost přívodního potrubí

Provedení kalibrační linky

Úvodní částí kalibrační linky je čerpací stanice se zásobní nádrží pitné vody. Její objem je cca 117 m³. Voda v ni je ohřívána třemi tělesy elektrického ohřevu o tepelném výkonu 300 kW. Jedním z těchto těles je udržována na požadované teplotě 40 až 80 °C. Elektromotory čerpadel pracují s výkonem 2x 315 kW a 1x 30 kW. Společné potrubí od čerpadel o světlosti DN 500 se na konci rozděluje a přechází do části tří paralelně spojených etalonových měřidel. Jsou jimi indukční průtokoměry o světlosti DN 500, DN 200 a DN 80. V protisměru uvedeného potrubí pokračuje linka uklidňovačem proudění a měřicí částí, kde se upínají mezi příruby DN 500 PN 10 kalibrované průtokoměry s uklidňovacím potrubím příslušných délek v maximální délce 41 m (82D). Od teleskopického upínacího členu pokračuje potrubí vzhůru k regulačním ventilům a odchylovačům proudu. Ty jsou umístěny na plošinách nad nádržemi s objemy 35 a 14 m³. Každá z nádrží je umístěna na třech tenzometrických váhových členech. V přesně stanovených místech jsou umístěny snímače tlaku a teploty protékající kapaliny, které jsou napojeny do řídicí jednotky PLC. Odvzdušňovací ventily, na vhodných místech, zbavují v počátku přípravy kalibrace protékající kapalinu vzduchových bublin. Potrubí BY-PASu je na dvou místech napojené na společné potrubí od čerpadel před a za etalonovou částí linky a zavedeno do zásobní nádrže.

Hydraulický výkon kalibrační linky

Čerpací stanice kalibračního centra je osazena dvěma čerpadly s hydraulickým výkonem jmenovitého průtoku $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{hod}$ při jmenovitém tlaku 5,75 bar. Třetí čerpadlo má jmenovitý průtok $Q = 110 \text{ m}^3/\text{hod}$ při jmenovitém tlaku 5,6 bar. Při paralelním zapojení všech čerpadel lze dosáhnout až $Q_{\text{MAX}} = 3310 \text{ m}^3/\text{hod}$ při jmenovitém tlaku 5,6 bar nebo $Q_{\text{MAX}} = 4110 \text{ m}^3/\text{hod}$ při minimálním tlaku 4,2 bar. Regulací otáček čerpadel pomocí frekvenčních měničů u elektromotorů všech čerpadel lze snižovat výkon čerpadel a tím jejich výstupní průtok a výstupní tlak. Dalším regulačním prvkem průtoku při zachování výstupního tlaku z čerpadel je regulační ventil a regulátor průtoku, umístěný v tělese každého odchylovače proudu. „Naladit“ požadovaný průtok při kalibraci průtokoměru je zásadním požadavkem na zařízení kalibrační linky. Limitujícím prvkem při větších průtocích, které se blíží Q_{MAX} , je odpor průtoku kapaliny kalibrační linkou. Tento odpor je součtem odporů průtoku samotným potrubím, regulačním ventilem, odchylovačem proudu a kalibrovaným průtokoměrem. Každý z typů kalibrovaných průtokoměrů má odlišný hydraulický charakter, který se projevuje tlakovou ztrátou, způsobenou daným průtokem nominálního množství kapaliny a její teplotou. Tento jev je výpočtově ověřitelný a je potvrzen praktickým provozem kalibrační linky. Následující příklad (pro porovnání tlakových ztrát zmiňovaných měřidel tj. clona, dýza, Venturiho trubice) má zadané shodné hodnoty světlostí a poměru světlosti k otvoru v měřidle, dále shodný průtok a teplotu protékající vody. Vypočtené a v grafu zobrazené tlakové ztráty kalibrační linky dokládají rozdíly tlakové ztráty jednotlivých měřidel. Tlaková ztráta potrubí je počítána průtokem etalonovým průtokoměrem DN 500 a odchylovačem proudu DN 500. Dále je počítáno s paralelním provozem obou velkých čerpadel.

Je zadáno:

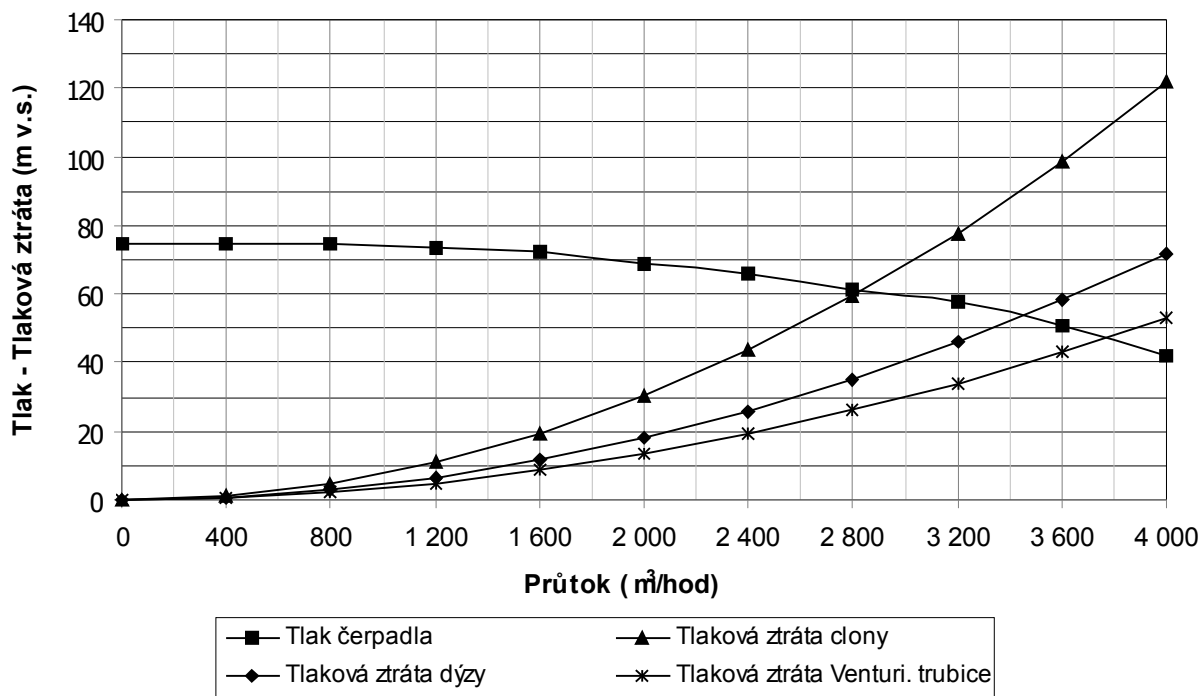
$Q_{\text{MAX}} = 4000 \text{ m}^3/\text{hod}$ při minimálním tlaku 42 m v.s. (vodního sloupce tj. cca 4,2 bar)
Měřidla DN 300: přívodní trubka $D=300 \text{ mm}$, vnitřní otvor $d=195 \text{ mm}$; $\beta = 0,65 (d/D)$
Teplota vody 60°C.

Grafický výsledek výpočtu:

Křivka „Tlak čerpadla“ zobrazuje výstupní tlak vody z čerpadel v závislosti na čerpaném množství vody z obou čerpadel. Vytvořil ji výrobce čerpadel.

Křivky „Tlakových ztrát“ jednotlivých měřidel zobrazují tlakovou ztrátu celé kalibrační linky se zařazeným měřidlem. Jsou vytvořeny výpočtem.

Pomyslné svislice průsečíků křivky „Tlak čerpadla“ a „Tlakových ztrát“ jednotlivých měřidel ukazují na spodní stupnici maximální průtok vody kalibrační linkou při kalibraci zařazeného měřidla. Tyto hodnoty současné zařízení nepřekročí.



Obr. 2 Tlaková ztráta kalibrační linky při zadaném měřidle a průtoku

Pro clonu bude: přibližně $Q_{MAX} = 2800 \text{ m}^3/\text{hod}$

$$Re = 6,634 \cdot 10^6$$

Pro dýzu bude: přibližně $Q_{MAX} = 3400 \text{ m}^3/\text{hod}$

$$Re = 8,056 \cdot 10^6$$

Pro Venturiho trubici bude: přibližně $Q_{MAX} = 3700 \text{ m}^3/\text{hod}$

$$Re = 8,767 \cdot 10^6$$

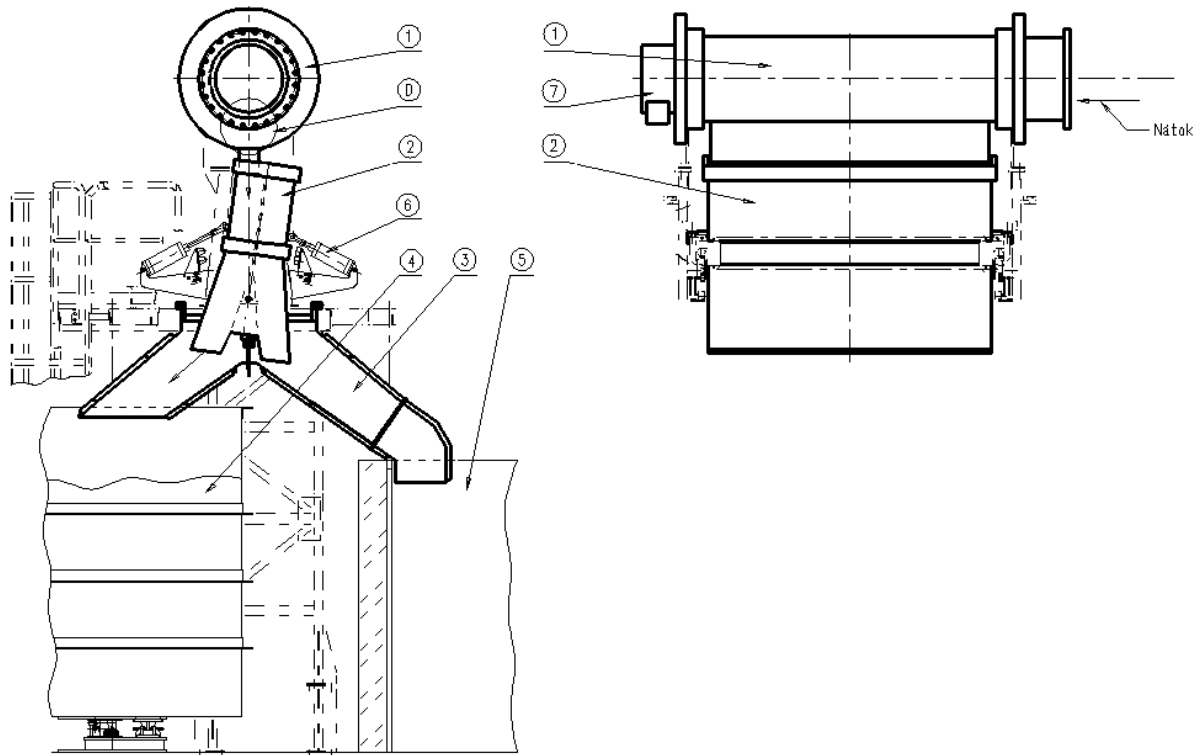
Shrnutí: Co je pod křivkou „Tlak čerpadla“ je provozně realizovatelné.

Odchylovače proudu

Odchylovače, použité v této kalibrační lince, byly používány v laboratoři průtoku v městě Delft v Holandsku. Po nezbytné repasi a malé rekonstrukci jsou využívány zde. Vstup kapaliny do každého odchylovače proudu je potrubím v horizontální ose z boku konstrukce odchylovače. Tato část je zakončena čelní stěnou v otočné vložce a vyústění proudu kapaliny je nasměrované z vložky o 90° vertikálně dolů. Vložka má ve své válcové stěně v podélné ose řady otvorů různých průměrů-vždy jeden průměr ve dvou či třech řadách. Natočením pomocí elektromotoru se šnekovou převodovkou a snímačem její polohy se vložka zvolenými otvory nastaví nad řadu otvorů ve spodní části pevného pláště a tím se reguluje průtok vody odchylovačem. Konstrukce odchylovače je znázorněna na obrázcích 3.a a 3.b. Pod otvory v plášti je komora s vnitřní přepážkou, která ji dělí na dvě stejné části a překlápí se kolem osy pod přepážkou komory. Tak je polohou komory zajištěn nátok do zásobní či vážící nádrže. Ostrá hrana přepážky a rychlé překlápění komory pneumatickými válci je zárukou rychlé změny polohy komory a minimálního vlivu na parametry měření a

jeho přesnost. Předpokládá se průtok většího množství vody a proto je překlápění komory řešeno dvěma dvojicemi pneumatických válců s blokovým zapojením, které je schematicky znázorněné na obrázku 4. Stejně tak indukční snímače polohy jsou nezbytnou výbavou pro přesné řízení činnosti odchylovače systémem PLC kalibrační linky.

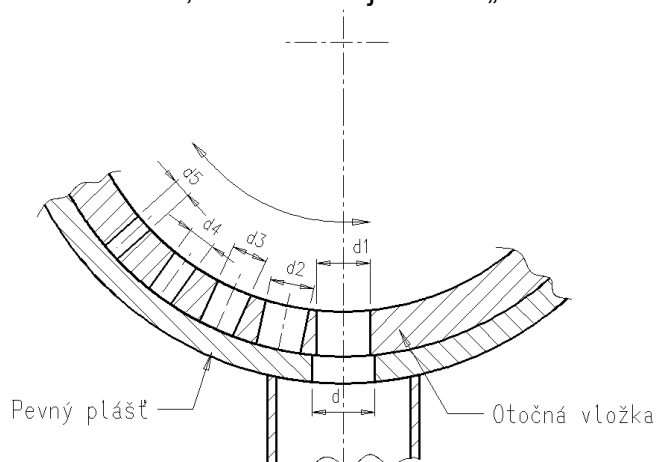
Obrázek 3.a znázorňuje celkové uspořádání odchylovače v návaznosti na vážicí nádrž a zásobní nádrž. Je na něm zachycen okamžik napouštění vody do vážicí nádrže.



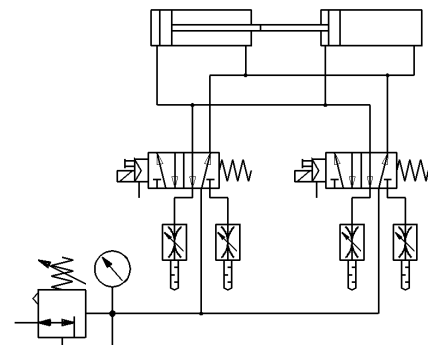
Obr. 3.a

- | | |
|---|---------------------------------|
| (1) Pevný plášť s otočnou vložkou | (2) Komora s vnitřní přepážkou |
| (3) Žlab do zásobní a vážicí nádrže | (4) Vážicí nádrž |
| (5) Zásobní nádrž | (6) Pneumatické ovládání komory |
| (7) Šneková převodovka s elektromotorem a snímačem polohy natočení vložky | |

Obrázek 3.b znázorňuje princip uspořádání otvorů v otočné vložce a pevném plášti. Jsou v místě, které ukazuje detail „D“ na obrázku 3.a.



Obr. 3.b



Obr. 4

Přesnost měření

Popsané zařízení kalibračního centra je provozováno podle ČSN EN 24185 [4] a samo je zkoušeno podle ČSN ISO 9368-1 [3]. Jeho prostorové uspořádání umožňuje upínat kalibrované průtokoměry i s extrémně dlouhým uklidňovacím potrubím podle požadavku ČSN EN ISO 5167 [5]. Už konstrukční práce na popsaném zařízení se řídily normativními příkazy citovaných norem i informativními doporučeními. Tvůrci norem, zvláště [4], pravděpodobně s mnohými zkušenostmi, v nich zakotvili mnohé fyzikální veličiny průtoku a činnosti odchylovače proudu už s hodnotami, které by bylo možno považovat za mezní. Praxe ukázala, že jejich dodržení napomůže spolehlivé funkci zkonstruovaného zřízení, ale jejich překročení ještě nevylučuje řádnou funkci jak zařízení, tak věrohodné výsledky měření. Důkazem jsou provozní hodnoty porovnané s matematickým modelem výpočtu nejistoty při měření průtoku. V něm je obsažena jako jedno z hlavních hledisek činnost odchylovače proudu a zdůvodnění jeho velikosti podle zásad v [4] v závislosti na průtoku vody odchylovačem. Zařízení otočné vložky podle popsaného odchylovače proudu řídí přetlak kapaliny v tělese odchylovače nad štěrbinou, jak se zmiňuje [4], ale v žádném případě proud kapaliny nezužuje. Navíc z tělesa otočné vložky musí být před měřením odveden vzduch instalovaným odvzdušňovacím ventilem, aby průtok kapaliny z odchylovače probíhal v celé délce nad hranou přepážky v komoře. Mimo zmíněného odvzdušnění je umístěn na potrubí těsně u jeho ústí do odchylovače manometr pro sledování tlaku kapaliny v odchylovači. K činnosti odchylovače proudu patří řízení rychlosti jeho překlápění (pootáčení) a řízení doby nátoku vody do vážicí nádrže. Nepropustnost vody mimo potrubí a komory odchylovače je samozřejmostí.

K přesnému měření je třeba proudění kapaliny v potrubí bez tlakových výkyvů. Používá se k tomu potrubí BY-PASu. V přípravné fázi měření se BY-PASem za etalony promývá a temperuje společné potrubí s etalony. V průběhu samotného měření je BY-PAS s napojením před etalony občas využíván k odvádění části kapaliny do zásobní nádrže, což napomáhá přesné regulaci sníženého průtoku pro měření minimálních průtoků kalibrovanými měřidly.

K zaručené přesnosti měření patří pravidelné zkoušení kalibračního zařízení podle [3] a tomu náležející pravidelná kalibrace vah pod všemi nádržemi, kterou provádí servis dodavatele vah HBM a úřední ověření vah prováděné ČMI. Etalonové závaží pro kalibraci váhy pod nádrží „35 m³“ a „14 m³“ se pokládá na speciálně připravenou (stálou) konstrukci na vrchním okraji nádrže. V žádném případě není závaží vkládáno do nádrže a omýváno vodou.

Pro přesnost odečítání měřených hodnot je používána nádrž 35 m³ k vážení nateklé vody maximálně do 30 t a nádrž 14 m³ k vážení nateklé vody maximálně do 9 t.

Výpočet průtoku odchylovačem proudu

Pro matematické zobrazení průtoku vody odchylovačem proudu při kalibraci je třeba vyjádřit rovnicemi mechaniky tekutin [1] všechny děje, které zmiňuje [4]. Ty je nutné podle veličin v obrázku 3.b vypočítat. Je to vždy rychlost proudění vody otvory v otočné vložce odchylovače a tlaková ztráta vody při proudění zmíněnými otvory. Další částí výpočtu je převedení zvoleného množství vody pro kalibraci za daný interval měření na hmotnostní průtok vody tj. hmotnost vody, která protékla potrubím celého kalibračního zařízení a odchylovačem proudu do nádrže váhy.

Veličiny, použité ve výpočtu:

Q	m ³ /s	zvolené množství vody pro kalibraci
v ₁	m/s	rychlost vody v otvorech v otočné vložce

p_1	Pa	ztráta tlaku vody při průtoku otvory v otočné vložce
$d_{1,2,3...}$	m	průměr otvoru v otočné vložce
n		počet otvorů v otočné vložce při současném průtoku
t_1	sec	čas pohybu odchylovače směr zásobní nádrž-nádrž váhy
t_2	sec	čas pohybu odchylovače směr nádrž váhy-zásobní nádrž
Q_{celk}	m^3/t_{min}	celkové množství vody pro kalibraci
t_{min}	sec	doba měření
m_{celk}	kg/t_{min}	celková hmotnost vody pro kalibraci
m	kg	zvážená hmotnost vody v nádrži po kalibraci
μ		průtokový součinitel (0,94)
ρ	kg/m^3	hustota (měrná hmotnost) vody
ε		opravný člen

Metodika výpočtu

Zcela na úvod je třeba znát, které řady otvorů otočné vložky jsou nastaveny v ose výstupu kapaliny z odchylovače tj. průměr otvorů v otočné vložce, kterými kapalina vytéká a také jejich počet.

$$v_1 = Q / (n * (\pi * (d_{1,2,3...})^2 / 4)) \quad (1)$$

$$p_1 = (Q^2 * \rho) / (\mu * 2 * (n * (\pi * d_{1,2,3...}^2 / 4))^2) * 10000 \quad (2)$$

Hodnotu veličiny „ ρ “ je třeba dosazovat z tabulky v příloze B [4] podle teploty vody, protékající odchylovačem proudu při kalibraci, nebo ji vypočítat, či získat z jiných hodnověrných zdrojů.

$$Q_{celk.} = Q * t_{min} \quad (3)$$

$$m_{celk} = Q_{celk.} * \rho * (1 + \varepsilon) \quad (4)$$

Je-li kalibrace váhového zařízení prováděna etalonovým závažím, smáčeným při kalibraci v nádrži, platí: $\varepsilon = 1,06 * 10^{-3}$.

V případě, kdy je kalibrace váhového zařízení prováděna etalonovým závažím při kalibraci mimo kapaliny v nádrži, platí: $\varepsilon = 1,21 * 10^{-3}$.

Výpočet nejistoty kalibrační linky

Matematicky popsané děje průtoku odchylovačem proudu v závislosti na časech překlápění (pootáčení) odchylovače a čase měření jsou přehledně popsány v [2]. Výpočet nejistot těchto dějů při měření průtoku je popsán a vysvětlen v [3] a [4]. Doporučuji proto jejich pečlivé prostudování. Opisování rovnic a výkladových statí, které přísluší k výpočtu nejistot, z norem do tohoto článku je tak bezpředmětné. Co v uvedených normách chybí, je porovnání proteklého a zváženého množství kapaliny. Jde o výpočet systematické nejistoty se systematickou chybou, způsobenou rozdílem hmotnosti proteklého a zváženého množství kapaliny (vody). Systematická chyba:

$$(e_s)_m = m_{celk} - m \quad (5)$$

Z toho vychází veličina systematické nejistoty rozdílu hmotnosti proteklého a zváženého množství kapaliny (vody) podle [4]

$$[(e_s)_m / m_{\text{celk}}]^2 \quad (6)$$

Tento člen je přiřazen do kombinace všech nejistot a výpočet systematické nejistoty „E_s“ je proveden metodou odmocniny součtů čtverců [4].

Normy nepočítají se srovnáním hodnot obou veličin („m_{celk}“ vypočtené z naměřených hodnot etalonového průtokoměru a „m“ z váhy), protože nepočítají ani s použitím etalonového průtokoměru při kalibraci měřidla. Praxe při použití měřicí metody podle obrázku 1C [4] ukazuje, že shodných hodnot nelze dosáhnout. Norma [3] a [4] předpokládá proudění stejného množství čerpané vody po celou dobu měření. Při čerpání vody ze zásobní nádrže do kterékoliv z nádrží pro měření, klesá hladina vody v zásobní nádrži a to je příčinou postupně se snižujícího výkonu čerpadel a tím i množství čerpané vody po čas měření. Požadované množství vody pro kalibraci zadaného průtokoměru je zhruba realizováno seřízením otáček elektromotoru odstředivého čerpadla pomocí frekvenčního měniče a regulací průtoku odchylovačem proudu. Regulační ventil průtoku, který zastává i funkci stabilizátoru průtoku, provádí doregulaci na přesnou hodnotu požadovaného množství vody. Podrobně popsané a matematicky podložené je to v [6]. Do nádrže váhy nateče průměrné množství vody, které etalon okamžitým měřením ukáže na začátku a konci doby měření. Je to dáno již zmíněným snižováním hladiny vody v zásobní nádrži a hysterezí zařízení, podléhajících seřízením (frekvenční měnič, odchylovač proudu a regulační ventil). Pro zadání výpočtu je třeba znát technické parametry každé váhy. Jedná se o přesnost váhy tj. nejmenší hodnotu, kterou je váha schopna zobrazit a toleranci váhy (získanou její kalibrací). U časoměrného zařízení je třeba znát toleranci měření času.

Tab. 1: Tabulka hodnot použitých vah pod nádržemi s odchylovači proudu.

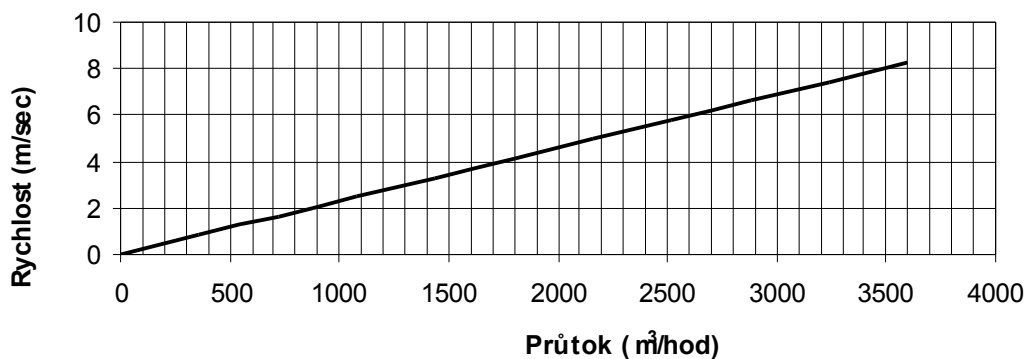
(Hodnoty vah jsou uvedeny v kg, tolerance času a čas pohybu odchylovače v sekundách)

Nádrž (t)	30	9
Odchylovač	DN 500	DN 200
Přesnost váhy (kg)	1	0,1
Tolerance váhy (± kg)	5	2,2
Tolerance času (±sec)	0,001	0,001
Čas pohybu t ₁ (sec)	0,350	0,240
Čas pohybu t ₂ (sec)	0,350	0,240

Aplikace vybraných a upravených rovnic v předešlém textu poslouží k tvorbě výpočtového programu, jímž lze provést modelový výpočet charakteristických veličin konstrukce odchylovače proudu a výpočet nejistoty při měření průtoku vody celým řetězcem kalibračního zařízení. Úvodní zadání vždy směřují k výpočtu situace pro maximální hodnotu průtoku. K tomu se vztahují výsledky výpočtu rychlosti průtoku a tlakových ztrát v odchylovači, určení nejistoty od systematické chyby a určení nejistoty od náhodné chyby, jak určuje [4]. Vztahy hodnot minima a maxima vypočtených veličin jsou nejlépe přehledné, když jsou vyobrazeny na grafu. Patrné je to z následujících příkladů:

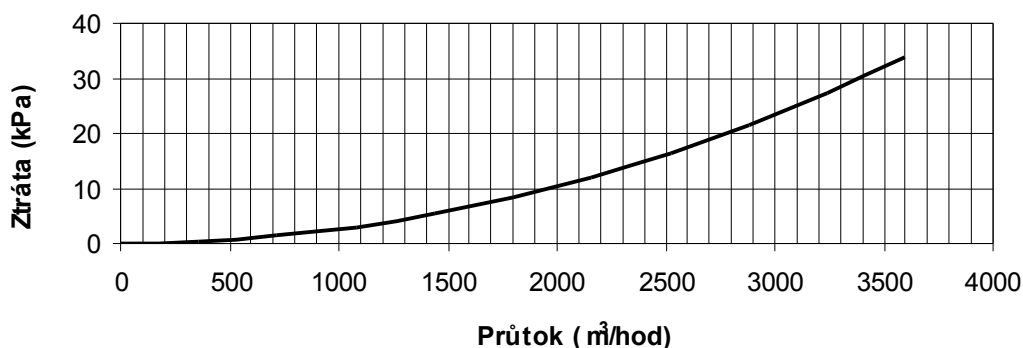
Průběh grafu rychlosti je lineární. V závislosti na zvyšujícím se množství protékající vody otvory vložky odchylovačem proudu se stejnoměrně zvyšuje její rychlost.

(Viz obr. 5)

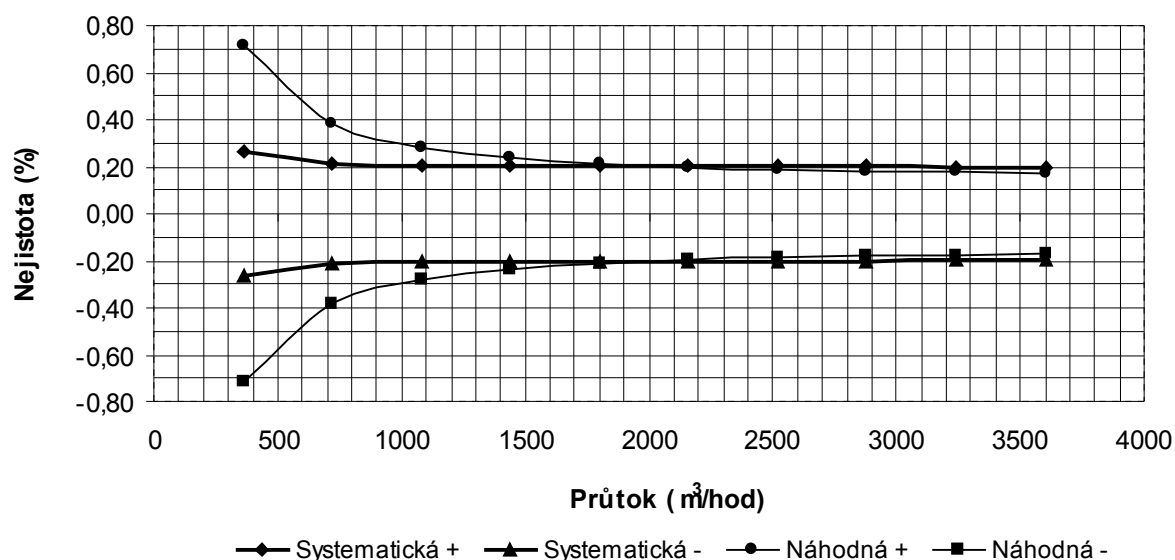


Obr. 5 Rychlost průtoku vody otvorem vložky odchylovače proudu DN 500

Průběh grafu tlakové ztráty v otvorech otočné vložky odchylovače proudu je exponenciální, protože rozhodující vliv na ztráty má dvojnásobek rychlosti průtoku vody otvory otočné vložky. (Viz Obr. 6)



Obr. 6 Tlaková ztráta otvorů vložky odchylovače proudu DN 500



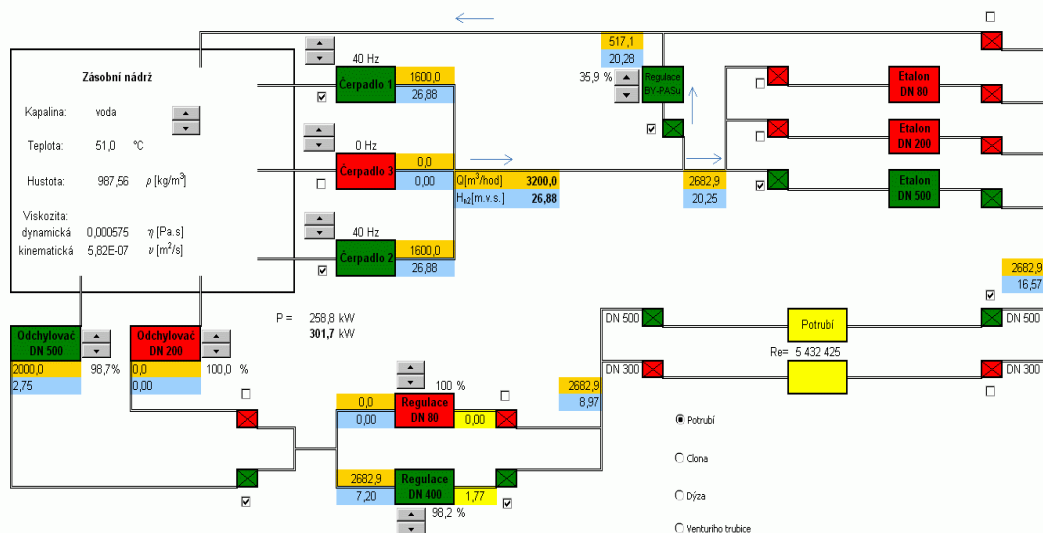
Obr. 7 Náhodná a systematická nejistota měření při činnosti odchylovače DN 500

Průběh grafu náhodné a systematické nejistoty měření je též exponenciální. Zobrazuje postup výpočtu, který je proveden metodou odmocniny součtů čtverců, jak uvádí [4]. Výsledný bod v grafu, ke kterému se vztahují zadané veličiny a výsledek výpočtu, je vpravo úplně na konci každé křivky. Křivka před tímto bodem zobrazuje

hypotetickou situaci při shodném zadání hodnot veličin měřicího zařízení s odchylovačem proudu a odlišným zadání množství protékající vody. Začátek křivky je na 10% množství zadané a protékající vody odchylovačem proudu a pokračuje nárůstem průtoku vody po 10%.

Závěr

Popisované zařízení kalibračního centra, které sestává z mnoha provozních souborů, se musí posuzovat komplexně jako jedno provozní zařízení, protože svým zaměřením vlastně „měří“ měřidla. S tímto pohledem se pracovalo na jeho projekčním zadání podle citovaných norem [3], [4], [5] a konstrukčním vyhotovení výrobní dokumentace. V textu je popsáno již postavené a zprovozněné zařízení, které v této době prochází provozními zkouškami. To přináší i potřebu některých úprav strojního zařízení a softwaru pro řídicí PLC. Text se podrobněji zabývá teoretickým rozбором funkce odchylovače proudu včetně jeho hydraulických závislostí, protože jeho konstrukce a hydraulické vlastnosti nejsou v dostupné odborné literatuře popsány. Zároveň se naskytla příležitost k porovnání hydraulických vlastností kalibrační linky při kalibraci všech tří měřidel (clony, dýzy a Venturiho trubice) shodných jmenovitých rozměrů a při shodných provozních podmínkách. K tomuto porovnání a zjištění hydraulických vlastností celé kalibrační linky projektant vytvořil modelový výpočet, ve kterém se mohou v předstihu před reálným ověřením modelovat různé situace průtoku podle provozního zadání. Schéma kalibrační linky pro tento výpočet je uvedeno na obrázku č. 8.



Obr. 8 Schéma kalibračního centra pro modelový výpočet

Literatura:

- [1] Noskivič, J. a kol. Mechanika tekutin. SNTL Praha 1987
- [2] Bílek, J. Geršl, J. Odchylovač proudu v metrologii průtoku. ČMI Brno 2007
- [3] ČSN ISO 9368-1 Měření průtoku kapalin v uzavřených profilech vážicí metodou. Postupy pro zkoušení zařízení. ČNI Praha 1994
- [4] ČSN EN 24185 Měření průtoku kapalin v uzavřených profilech. Vážicí metoda. ČNI Praha 1994
- [5] ČSN EN ISO 5167 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. ČNI Praha 2003
- [6] Slaný, V. Charakteristika čerpání kapaliny. www.bsdesign.cz