



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**CITLIVOSTNÍ ANALÝZA METODY TLAK-ČAS NA
NEPŘESNOSTI MĚŘENÍ**

SENSITIVITY ANALYSIS OF PRESSURE-TIME METHOD ON MEASUREMENT
UNCERTAINTY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Červinková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Bc. Kateřina Červinková**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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

Citlivostní analýza metody tlak-čas na nepřesnosti měření

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metoda tlak-čas je jedna ze dvou metod měření průtoku na velkých vodních dílech použitelných dle IEC 60041. Metoda je založena na časové integraci měřené tlakové diference. V jednom průřezu jsou obvykle umístěny 4 tlakové odběry, ze kterých počítáme střední hodnotu pro každý časový okamžik. V diplomové práci bude proveden rozbor tlakových polí v jednom průřezu a vliv na vyhodnocený průtok pokud budeme stanovovat střední hodnotu s různou vahou jednotlivých snímačů.

Cíle diplomové práce:

Provést literární rešerši.

Provést vyhodnocení průtoku na již změřených datech.

Stanovit citlivost vyhodnoceného průtoku na váhy jednotlivých tlakových snímačů.

Stanovit citlivost vyhodnoceného průtoku na numerické zatlumení měřených tlaků.

Seznam doporučené literatury:

IEC standard 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, third edition, 1991.

ADAMKOWSKI, A., KRZEMIANOWSKI, Z., JANICKI, W.: Flow rate measurement using the pressure-time method in a hydropower plant curved penstock, IGHEM 2006, Milano.

RAMDAL, J.: Efficiency measurements in low head hydro power plants, PhD thesis NTNU, Trondheim 2011.

HRUBÝ, E.: Metoda tlak-čas pro stanovení průtoku na velkých vodních dílech. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 72 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 11. 11. 2018



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Metoda tlak-čas je jedna ze dvou metod měření průtoku na velkých vodních dílech použitelných dle normy IEC 60041. Tato metoda je založena na časové integraci měřené tlakové diference při vodním rázu v uzavřeném potrubí. Cílem této diplomové práce je provést literární rešerši této metody a touto metodou vyhodnotit průtok na již změřených datech. Dále se práce zabývá stanovením citlivosti vyhodnoceného průtoku na váhy jednotlivých tlakových snímačů a na numerické zatlumení měřených tlaků. První část je provedena pomocí *MS Excel* tak, že průtok je vyhodnocován vždy jen s jedním tlakovým snímačem a následně porovnáván s původním průtokem. Je tedy zkoumáno, jaký vliv na vyhodnocený průtok má vynechání snímačů. V druhé části stanovení citlivosti vyhodnoceného průtoku jsou v programu *Matlab* prováděny různé zásahy do naměřeného tlakového signálu (vyhlazení signálu, šum, časové zpoždění, odstranění frekvenčního pásma) a simulovány tak různé vlivy okolí či poruchy snímačů. S upraveným tlakovým signálem je následně znovu vyhodnocen průtok a porovnáván s původním průtokem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Gibsonova metoda, metoda tlak-čas, vyhodnocené průtoku, nejistota typu A, Fourierova transformace, klouzavý průměr, šum, časové zpoždění signálu

ABSTRACT

The pressure-time method is one of two methods of measuring the flow rate on large hydraulic structures applicable to IEC 60041, which is based on the temporal integration of the measured pressure difference and the formation of a water hammer in a closed pipe. The aim of this master thesis is to perform a literature review of this method and to evaluate the flow rate of the measured data. Furthermore, the thesis deals with determination of the sensitivity of the evaluated flow rate to the weights of individual pressure sensors and to numerical modifying of the measured pressures. The first part is made using MS Excel. The flow rate is always evaluates with only one pressure sensor and it is compared with the original flow rate. There is research, how absence of the sensor has an impact on the evaluated flow rate. In the second part of the determination of the sensitivity of the evaluated flow rate, various encroachment (signal smoothing, noise, time delay, frequency band removal) are performed of measured pressure signal in Matlab. Various surrounding influences or sensors failures are simulated.

KEYWORDS

Gibson method, pressure-time method, flow rate evaluation, measurement uncertainly type A, Fourier transform, moving average, noise, time delay of signal

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERVINKOVÁ, K. Citlivostní analýza metody tlak-čas na nepřesnosti měření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 84 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Habána, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Kateřina Červinková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za věcné konzultace, cenné rady, připomínky a hlavně ochotu při zpracovávání této diplomové práce. Také děkuji své rodině za podporu a hlavně trpělivost během celého studia a svým spolužákům za skvělý kolektiv.

OBSAH

| | |
|--|----|
| Úvod | 15 |
| 1 Metoda tlak-čas | 16 |
| 1.1 Odvození | 16 |
| 1.2 Všeobecné požadavky | 18 |
| 1.3 Nejistota měření | 20 |
| 1.4 Varianty metody tlak-čas | 20 |
| 1.4.1 Metoda diferenčního diagramu | 20 |
| 1.4.2 Metoda samostatných diagramů | 21 |
| 1.5 Další metody pro měření průtoku na velkých vodních dílech | 22 |
| 1.5.1 Metoda Winter-Kennedy (indexová metoda) | 22 |
| 1.5.2 Metoda rychlostního pole (hydrometrické vrtule) | 23 |
| 1.6 Výhody metody tlak-čas | 24 |
| 2 Snímače tlaku | 25 |
| 2.1 Kapacitní snímače tlaku | 25 |
| 2.2 Tenzometrické snímače tlaku | 26 |
| 2.3 Piezoelektrické snímače tlaku | 27 |
| 3 Vyhodnocení průtoku | 29 |
| 3.1 VE Lipno | 29 |
| 3.2 PVE Dalešice | 30 |
| 3.3 Určení tlakové difference | 30 |
| 3.4 Určení ztrátového součinitele | 32 |
| 3.5 Určení průtoku | 32 |
| 3.5.1 Funkce <i>Řešitel</i> v <i>MS Excel</i> | 34 |
| 3.5.2 Funkce <i>CONCATENATE</i> v <i>MS Excel</i> | 34 |
| 3.5.3 Vyhodnocené průtoky | 35 |
| 4 Stanovení citlivosti vyhodnoceného průtoku na váhy jednotlivých tlakových snímačů .. | 38 |
| 4.1 Váhy jednotlivých snímačů | 38 |
| 4.2 Odchytky jednotlivých tlakových snímačů | 39 |
| 5 Nejistoty měření | 42 |
| 5.1 Nejistota typu B | 42 |
| 5.2 Nejistota typu A | 42 |
| 5.3 Statistika a výpočet nejistoty typu A | 43 |

| | | |
|-----|---|----|
| 6 | Stanovení citlivosti vyhodnoceného průtoku na numerické zatlumení měřených tlaků .. | 46 |
| 6.1 | Vyhodnocení průtoku v programu <i>Matlab</i> | 47 |
| 6.2 | Fourierova transformace | 48 |
| 6.3 | Vyhazení signálu pomocí klouzavého průměru | 52 |
| 6.4 | Vliv náhodného okolního šumu | 57 |
| 6.5 | Zpoždění tlakového signálu | 66 |
| 6.6 | Odstranění části frekvenčního pásma | 69 |
| | Závěr | 77 |
| | Použité informační zdroje | 80 |
| | Seznam použitých zkratk a symbolů | 82 |
| | Seznam elektronických příloh | 84 |

ÚVOD

Hlavním cílem této diplomové práce je stanovit citlivostní analýzu metody tlak-čas na nepřesnosti měření. Metoda tlak-čas, neboli Gibsonova metoda, je jedna ze dvou metod měření průtoku na velkých vodních dílech použitelných v souladu s normou IEC 60041. Je založena na časové integraci měřené tlakové diference při vodním rázu v potrubí v důsledku pomalého zavírání rozvaděče. Po délce potrubí jsou umístěny 2 měřicí průřezy (horní a dolní), přičemž v každém průřezu jsou rovnoměrně rozmístěny obvykle 4 tlakové snímače. Podmínkou pro měření touto metodou je dostatečně dlouhý přivaděč. Druhou metodou je měření pomocí hydrometrických vrtulí, kdy se měří průtok v několika místech průřezu.

První část práce je věnována samotné metodě tlak-čas, jejímu principu, odvození, všeobecným požadavkům, které musí být při měření splněny, a jejím variantám, které zmiňuje norma ČSN EN 60041. Dále je uveden přehled používaných tlakových snímačů.

Polovina experimentální části se zabývá vyhodnocením průtoku na již změřených datech, stanovením citlivosti vyhodnoceného průtoku na váhy jednotlivých tlakových snímačů a určením nejistoty typu A vyhodnocených průtoků. Průtok je stanoven z měření na VE Lipno I a na PVE Dalešice. Stanovení průtoku metodou tlak-čas je podrobně vysvětleno na konkrétních datech z měření na Lipně. V tomto případě byly v každém průřezu měření na vnitřní stěně přivaděče umístěny 4 tlakové snímače, ze kterých se určovala střední hodnota tlaku. Tyto snímače se instalují při odstávce vodní elektrárny. Vzhledem k tomu, že přivaděč bývá ve většině případů umístěn pod zemským povrchem, je k těmto snímačům obtížný přístup. To znamená značnou komplikaci v případě, že dojde k poškození či výpadku jednoho nebo více snímačů a jejich výměna nebo oprava je z uvedeného důvodu často nemožná. V takovém případě se při vyhodnocování průtoku daný snímač vynechá. Z tohoto důvodu bylo stanoveno, jaký vliv na vyhodnocení průtoku má vynechání jednotlivých tlakových snímačů.

Druhá polovina experimentální části je věnována stanovení citlivosti vyhodnoceného průtoku na numerické zatlumení měřených tlaků. Při měření mohou být tlakové snímače nepříznivě ovlivněny například okolním šumem, velkou časovou konstantou, časovým zpožděním mezi horním a dolním průřezem měření, vlivem cizích frekvencí nebo dlouhým impulsním potrubím ke snímači. Tato část práce je tedy rozdělena do několika podkapitol, přičemž v každé podkapitole je simulován určitý zásah do měřeného tlakového signálu či jeho úprava a následně je zkoumán vliv na vyhodnocený průtok. Tlakový signál byl použit stejný jako v předchozím případě pro vysvětlení stanovení průtoku metodou tlak-čas. Nejprve je naměřený tlakový signál vyhlazen pomocí klouzavého průměru. Jako druhý příklad je provedeno zašumění přičtením náhodných hodnot tlaků z určitého intervalu hodnot k původnímu naměřenému tlakovému signálu. V dalším případě bylo simulováno časové zpoždění mezi horním a dolním průřezem měření. V posledním případě se nechá část frekvencí spolu s rušivými složkami z tlakového signálu odstranit. V každém případě je s upraveným tlakovým signálem znovu vyhodnocen průtok a následně porovnán s původním.

1 METODA TLAK-ČAS [1] [6] [8]

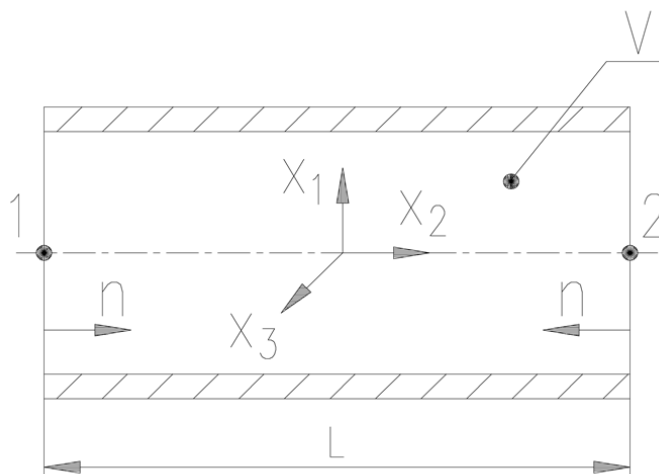
Metoda tlak-čas (často nazývaná Gibsonova metoda) byla představena na počátku 20. let 19. stol. Normanem R. Gibsonem. Je založena na Newtonově zákoně a odvozených zákonech hydromechaniky, které udávají vztah mezi silou vyvolanou změnou rozdílu tlaku mezi dvěma průřezy a zrychlením nebo zpomalením vodní hmoty mezi nimi způsobenými pohybem uzávěru¹ bez uvažování tření a za předpokladu nestlačitelné kapaliny.

Přestože tato metoda platí teoreticky jak pro turbínový a čerpadlový chod, tak pro uzavírání nebo otevírání uzávěru, používá se prakticky pouze v případě uzavírání průtoku při turbínovém provozu. Rovněž není vhodná pro použití na Kaplanových turbínách z důvodu absence dlouhého přivaděče.

Měření Gibsonovou metodou je nepřímý způsob jak ekonomicky zjistit průtok uzavřeným potrubím. Po délce potrubí se pečlivě vyberou 2 průřezy a vybaví se tlakovými vývody. V těchto průřezích se měří tlak při postupném zavírání uzávěru plynulým pohybem. Vychází tedy z vodního rázu v uzavřeném potrubí vlivem sníženého průtoku armaturou. Počáteční průtok je potom vypočítán z výsledného diagramu tlak-čas.

1.1 ODVOZENÍ [2]

Je uvažována přímá trubka s konstantním průřezem (viz Obr. 1).



Obr. 1 Trubka [2]

Základní odvození výpočtu průtoku Q vychází z rovnice rovnováhy makroskopické částice zapsané ve tvaru (nejobecnější rovnice pohybu makroskopické částice libovolné látky v libovolném prostředí):

¹ Uzávěr se zde používá pro jakékoliv uzavírací zařízení (rozdávěcí lopatky, jehly, ventily, atd.).

$$\rho \frac{dv_i}{dt} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \cdot g_i, \quad (1)$$

kde σ_{ij} tvoří složky tenzoru napětí (nevratný a vratný tenzor napětí).

$$\sigma_{ij} = \Pi_{ij} - \delta_{ij}p, \quad (2)$$

Π_{ij} je nevratný tenzor napětí (účinek viskózních sil) složený z dynamické a objemové viskozity. Platí:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3)$$

Potom se rovnice rovnováhy makroskopické částice může zapsat ve tvaru:

$$\rho \frac{dv_i}{dt} - \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \rho \cdot g_i \quad (4)$$

Po integraci přes objem trubky a uvažování $i=2$ (osa trubky) dostaneme:

$$\int_V \rho \frac{dv_2}{dt} dV - \int_V \frac{\partial \Pi_{2j}}{\partial x_j} dV + \int_V \frac{\partial p}{\partial x_2} dV = \int_V \rho \cdot g_2 dV \quad (5)$$

Rovnici se zintegruje a využije rovnost $V = L \cdot S$:

$$\rho \frac{d\bar{v}_2}{dt} S \cdot L - \int_V \frac{\partial \Pi_{2j}}{\partial x_j} dV + \Delta p \cdot S = \rho \cdot g_2 \cdot S \cdot L \quad (6)$$

\bar{v}_2 je střední hodnota rychlosti na objemu V , $\Delta p = p_2 - p_1$ je tlakový rozdíl.

Výraz pro třecí ztráty je možné vyjádřit ve tvaru (2. člen v rovnici 6):

$$- \int_V \frac{\partial \Pi_{2j}}{\partial x_j} dV = S \cdot R \cdot Q^2 = S \cdot R \cdot Q \cdot |Q| \quad (7)$$

Po dosazení dostaneme: ($v \cdot S = Q$)

$$\rho \cdot L \cdot \frac{dQ}{dt} + S \cdot R \cdot Q \cdot |Q| + \Delta p \cdot S = \rho \cdot g_2 \cdot S \cdot L \quad (8)$$

Z rovnice (8) vyjádříme $\frac{dQ}{dt}$:

$$\frac{dQ}{dt} = - \frac{S}{\rho \cdot L} \cdot R \cdot Q \cdot |Q| + g_2 \cdot S - \frac{\Delta p \cdot S}{\rho \cdot L} = - \frac{S}{\rho \cdot L} (R \cdot Q \cdot |Q| + \Delta p - \rho \cdot g_2 \cdot L) \quad (9)$$

Odporový součinitel R se počítá z ustáleného průtoku před začátkem zavírání uzávěru, kdy je $\frac{dQ}{dt} = 0$ (vychází se z rovnice 9).

$$R = -\frac{\Delta p - \rho \cdot g_2 \cdot L}{Q \cdot |Q|} \quad (10)$$

Výpočet probíhá tak, že se nejprve zvolí počáteční průtok. Poté se provede výpočet ve zvolených časových mezích $\frac{dQ}{dt}$ a požaduje se průtok v mezích integrace roven nule. Pokud tomu tak není, upraví se zvolený počáteční průtok a výpočet se opakuje.

Protože při odvození byla uvažována přímá trubka s konstantním průřezem, Penstock faktor se zde vyskytuje ve tvaru:

$$P_f = \frac{L}{S} \quad (11)$$

Při uvažování nerovnoměrného potrubí by měl Penstock faktor tvar:

$$P_f = \int_L \frac{1}{S} dL \quad (12)$$

Nebo zjednodušeně (potrubí rozdělíme na n přibližně konstantních částí):

$$P_f = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i} \quad (13)$$

Jiný způsob odvození z rovnice energetické bilance a určení horní meze integrace jsou uvedeny v závěrečné práci Ing. Erika Hrubého, viz [8].

1.2 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY [1] [6] [7]

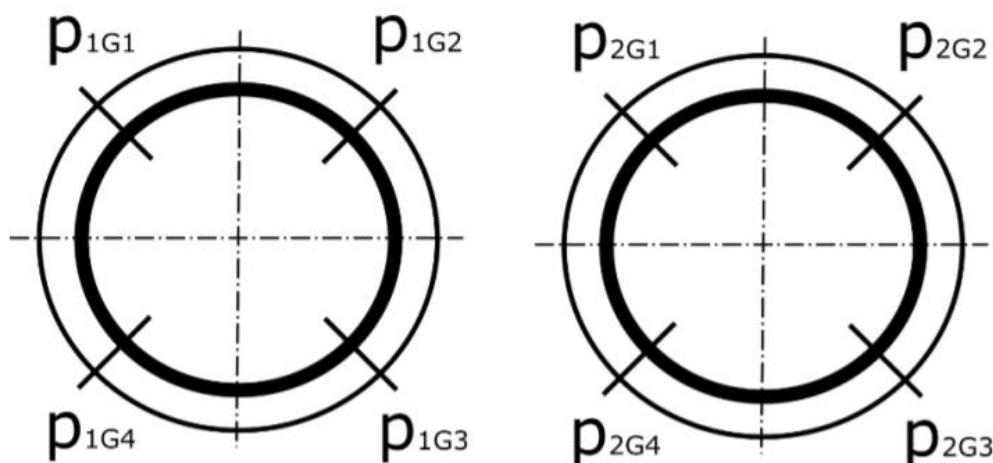
Norma ČSN 60041 uvádí všeobecné požadavky, které musí být při použití metody tlak-čas dodrženy. Patří mezi ně podmínky platnosti, předpis o umístění odběrů tlaků, spojovacím potrubí a kontrole měření tlaků.

Mezi všeobecné podmínky platnosti, které musí být při použití této metody splněny, patří například:

- mezi dvěma průřezy měření tlaku se nesmí vyskytovat volná hladina,
- průsak vody přes zavřený uzávěr nesmí být při zkušebních podmínkách větší než 5 % měřeného průtoku turbínou a musí se měřit s přesností do 0,2 % průtoku,
- v měřené oblasti musí být přivaděč přímý a mít konstantní průřez a musí být bez významné nepravidelnosti. Vzdálenost mezi dvěma průřezy měření nesmí být menší než 10 m.

V návrhu normy IEC 62006 z roku 2007 se však uvádí, že potrubí může mít i proměnný průřez. Systematické a nahodilé nejistoty jsou ale pro konstantní úsek potrubí výrazně nižší než u proměnných úseků a může být tedy pro měření použita kratší délka potrubí. U nepravidelných přivaděčů musí být měření prováděno na mnohem delším úseku, aby se dosáhlo dostačujících výsledků. Je zde také mnohem komplikovanější určení Penstock faktoru způsobené změnami průřezu potrubí a různými ohyby.

Podle normy ICE 60041 pro metodu tlak-čas platí, že měření musí být prováděno na úseku přímého potrubí délky minimálně 10 m (stejně jako u ČSN EN 60041) a hodnota vztahu mezi střední rychlostí v a délkou potrubí L mezi měřenými průřezy (vL) musí být minimálně 50. Jsou uvedeny také některé požadavky týkající se vzdálenosti měřených průřezů od ohybů potrubí. Dlouhé rovné úseky potrubí s konstantním průřezem se na vodních elektrárnách příliš často nevyskytují, přesto je snaha tuto metodu využívat díky velmi krátkým odstavkům strojů během měření touto metodou. Následkem tomu se výzkum zaměřuje na vliv zkrácení požadované délky potrubí pro měření a vliv snížení hodnoty násobku vL a dále tomu, jak ohyby mezi jednotlivými průřezy ovlivňují naměřené výsledky. Experiment na toto téma je popsán v doktorské práci Jørgena Ramdala (viz [7]).



Obr. 2 Rozmístění snímačů v průřezu přivaděče [8]

V každém průřezu musí být provedeny nejméně 4 odběry tlaku o průměru od 3 do 6 mm v rovině kolmé na osu přivaděče². Tlakové odběry v kruhových přivaděcích se musí umístit ve stejném úhlu vůči sobě a žádný odběr nesmí být blízko horní nebo dolní části průřezu měření (viz Obr. 2). Odběr tlaku se musí umístit ve vzdálenosti větší než $2D$ (D – průměr přivaděče) od větší nepravidelnosti přivaděče. Odběry tlaku v každém průřezu měření se musí připojit přes samostatné ventily na společný sběrač, který je vhodně umístěný pro napojení na měřicí přístroj pro měření tlaku v závislosti na čase. Aby se snížil tlumící účinek způsobený třením, musí být spojovací potrubí co možná nejkratší, nesmí být pružné a musí mít dostatečný průměr.

² U přivaděčů s průměrem menším než 4 m se dle normy IEC 60041 mohou použít pouze 2 odběry, ale dnes je v této oblasti již jiný postup a měří se vždy čtyřmi odběry.

1.3 NEJISTOTA MĚŘENÍ [1]

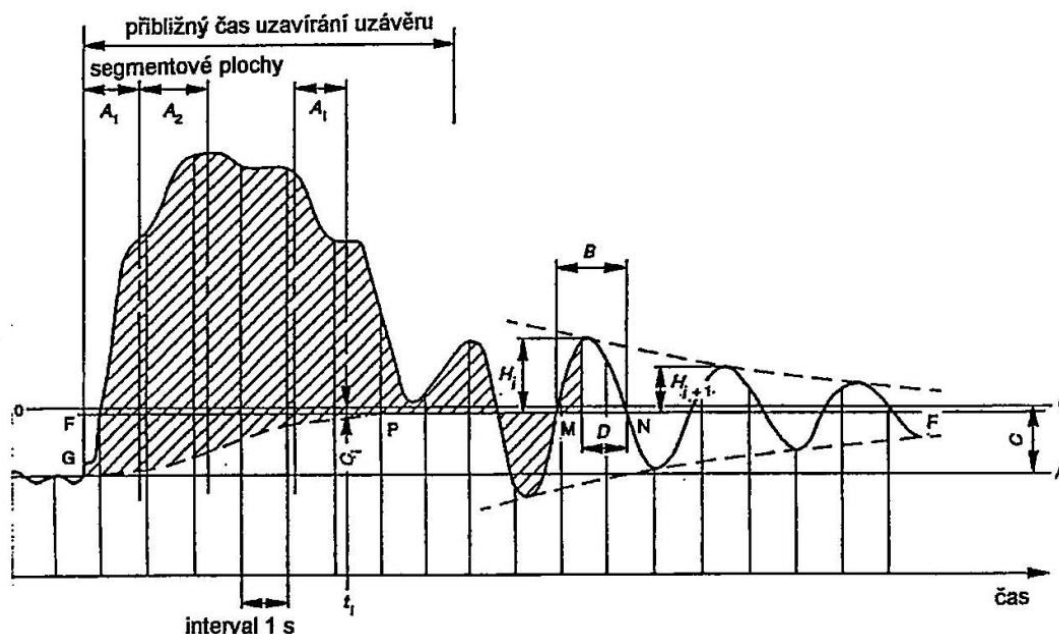
Metoda tlak-čas vyžaduje dobré speciální přístrojové vybavení a štáb vysoce kvalifikovaných odborníků pro provádění měření, vyhodnocování zkoušek a pro odhad nejistoty ve výsledcích. Při příznivých podmínkách lze očekávat celkovou nejistotu při intervalu 95 % spolehlivosti asi $\pm 1,5$ % až $\pm 2,3$ %. Obecně se metoda tlak-čas doporučuje používat v přivaděčích o průměru větším než 1 m, jinak vede k naměření větších průtoků než skutečných. Vyskytne-li se chyba u některého odběru tlaku, musí se zjistit a odstranit příčina závad. Není-li to možné, nesmí se tento odběr používat pro měření.

1.4 VARIANTY METODY TLAK-ČAS [1]

Tato metoda má vyvinutých několik variant, které se liší pouze přístrojovým vybavením a výpočetní technikou integrace tlaku-času a používáním jednotlivých nebo diferencních záznamů.

1.4.1 METODA DIFERENČNÍHO DIAGRAMU

U této varianty se zaznamenává změna diferencního tlaku mezi dvěma průřezy měření, která je způsobena pouze změnami tření a hybnosti. Účinky změny tření mimo tyto zkušební průřezy a ve vtoku nebo ve vyrovnávací komoře se projevují v obou průřezích měření a tím se eliminují. Diagram tlak-čas se získá postupným zavíráním uzávěrů plynulým pohybem a záznamem výsledné časové změny diferencního tlaku. Časy záznamu před začátkem pohybu uzávěru a po ukončení jeho pohybu nesmí být kratší než 20 sekund. Obr. 3 zobrazuje diagram tlak-čas získaný pomocí metody diferencního diagramu.



Obr. 3 Příklad diagramu tlak-čas (Diferenční diagram Gibsonova přístroje) [1]

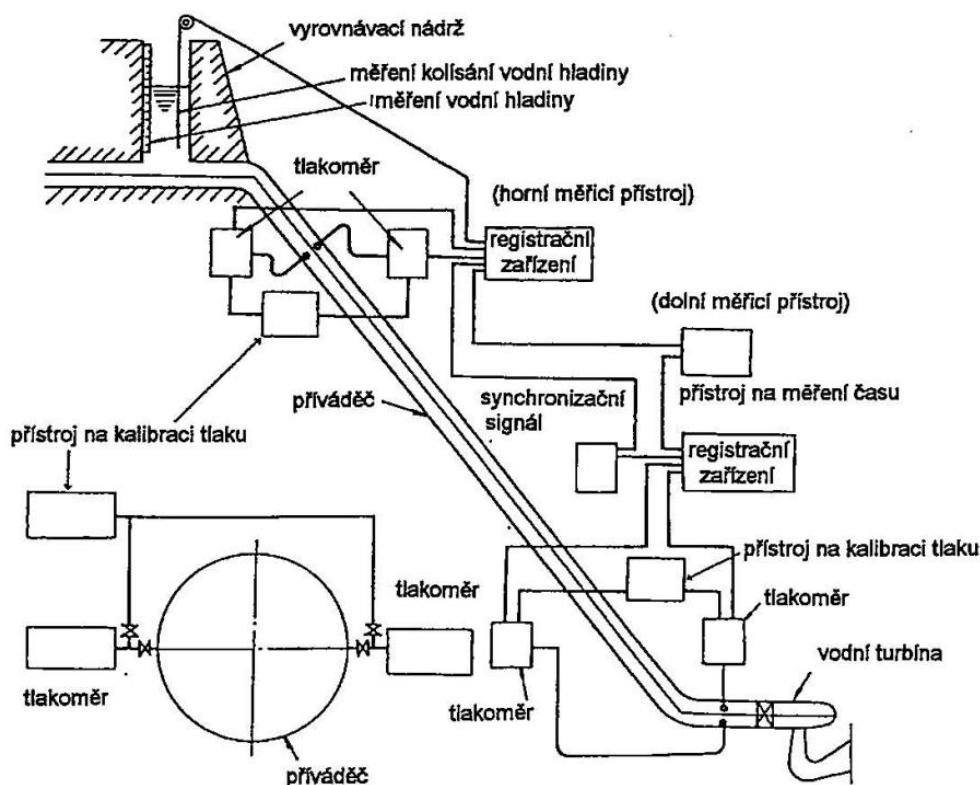
1.4.2 METODA SAMOSTATNÝCH DIAGRAMŮ

V této variantě metody tlak-čas se zaznamenávají samostatné změny tlaku ve dvou průřezech měření potrubí. Lze provést též měření pouze v jednom průřezu měření vztažené na volnou hladinu ve vtoku, ale taková metoda se může používat pouze tam, kde není napojena vyrovnávací komora a kde délka potrubí, pro kterou je výpočet součinitele potrubí obtížný (rozšířený zaoblený vtok), nepřekročí 2 % délky celého potrubí.

Platí zde speciální požadavek a to na délku potrubí mezi dvěma průřezy měření tlaku, který nesmí být menší než 50 metrů. Dále norma specifikuje velikost součinitele potrubí F .

Obr. 4 schematicky znázorňuje uspořádání měřících zařízení. Použité měřící zařízení sestává z přístroje na měření tlaku vody v každém průřezu potrubí, zařízení pro kalibraci přístrojů na měření tlaku, přístroje na měření času, zařízení pro měření vodní hladiny a jejího kolísání ve vyrovnávací komoře a registrační zařízení.

Diagramy tlak-čas se provádějí ze záznamů před uzavřením, v průběhu a po tomto uzavření (musí se zaznamenat nejméně 4 tlakové vlny po skončení zavírání).



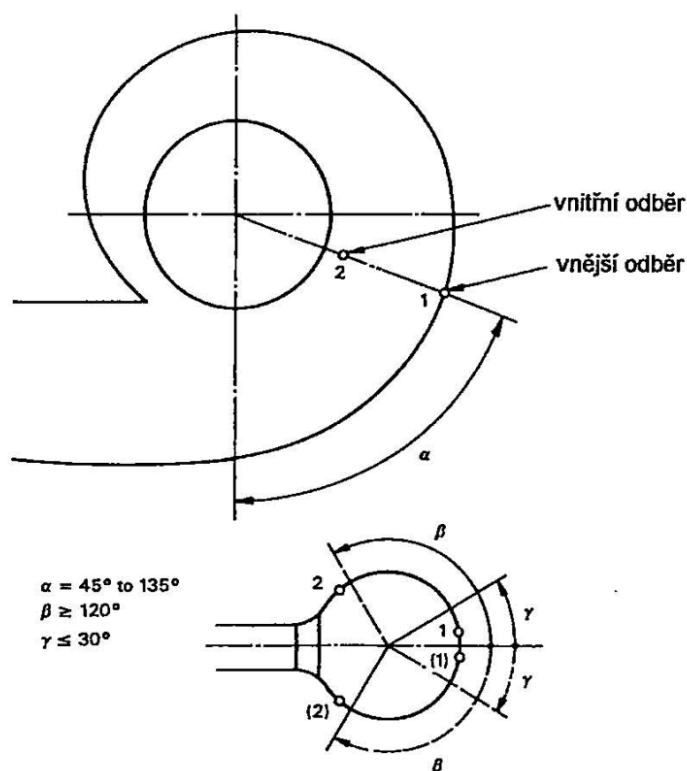
Obr. 4 Měření tlak-čas metodou samostatných diagramů – uspořádání přístrojů [1]

1.5 DALŠÍ METODY PRO MĚŘENÍ PRŮTOKU NA VELKÝCH VODNÍCH DÍLECH [1] [3] [4]

Metoda Winter-Kennedy je doplněk metody tlak-čas. Dále se pro měření průtoku na velkých vodních dílech používají hydrometrické vrtule.

1.5.1 METODA WINTER-KENNEDY (INDEXOVÁ METODA)

V roce 1933 pánové Winter a Kennedy publikovali článek s názvem "An Improved Type of Flow Meter for Hydraulic Turbines", v němž popisovali to, co dnes označujeme indexovou metodou. Metoda se dá použít pouze u turbín. Kromě pár vybraných případů, kdy je možné ji použít jako část přijímací zkoušky na díle a pro další účely popsané v normě ČSN EN 60041, má pouze informační charakter. Jedná se o relativní metodu, kterou je nutno nakalibrovat pomocí metody absolutní, tj. metodou tlak-čas nebo hydrometrickými vrtulemi (viz níže).



Obr. 5 Umístění tlakových odběrů na ocelové spirále turbíny pro měření průtoku metodou Winter-Kennedy [1]

Měření touto metodou je založeno na nejméně jednom páru tlakových snímačů v zakřivené části spirály turbíny. Tyto odběry tlaků jsou umístěny na vnitřní a vnější straně spirály a jsou ve stejném radiálním průřezu (viz Obr. 5).

Pro průtok určený metodou Winter-Kennedy se používá vztah:

$$Q = k \cdot \Delta p^n, \quad (14)$$

kde Δp je odečet na diferenčním tlakoměru zapojeném mezi odběry a mocnina n je teoreticky rovna 0,5. Odchytky v tomto exponentu mohou být 0,48 až 0,52 (způsobeny např. malými rychlostmi ve spirále) a ovlivňují tak indexovou zkoušku.

1.5.2 METODA RYCHLOSTNÍHO POLE (HYDROMETRICKÉ VRTULE)

Pro měření průtoku na velkých vodních dílech jsou v souladu s normou vhodné pouze dvě metody, a to již zmiňovaná metoda tlak-čas a metoda měření pomocí vodoměrných vrtulí (hydrometrické vrtule), v normě ČSN EN 60041 nazývaná jako metoda rychlostního pole.



Obr. 6 Měření průtoku hydrometrickými vrtulemi na VE Kamýk

Metoda rychlostního pole vyžaduje určitý počet vodoměrných vrtulí umístěných na specifikovaných místech, ve vhodném průřezu otevřeného kanálu nebo uzavřeného přivaděče. Měřicí kříž s hydrometrickými vrtulemi, jako je zobrazeno na fotografii (viz Obr. 6), se umístí do měrného profilu a na základě rychlosti otáček vrtulí se stanoví bodové

rychlosti kapaliny v místě vrtule. Rychlost se následně v celém průřezu integruje, čímž se zjistí průtok:

$$v = \alpha_i + \beta_i n, \quad (15)$$

kde α_i a β_i jsou kalibrační konstanty příslušné danému rozmezí rychlostí/frekvence a n jsou otáčky určené jako $n = \frac{N}{T}$ (N – počet otáček, T – časový interval).

$$Q = \int_S v dS \quad (16)$$

Je zde požadavek na čistotu vody, aby rozpuštěné nebo unášené látky neovlivňovaly během zkoušky přesnost odečtu vrtulí. Metodu lze použít pouze v uzavřeném potrubí nebo přívaděči, ve vtokovém objektu nebo v příváděcím či odpadním kanálu. Použije-li se otevřený kanál, musí mít přesně definovaný průřez. Měření v přírodním korytě norma ČSN EN 60041 nepřipouští. Uspořádání zkoušek, postupy a omezení závisí v určité míře na charakteristikách vybraného průřezu měření. Všeobecné požadavky na počet míst měření, typy vodoměrných vrtulí, jejich kalibrace a mnohé další jsou podrobně popsány v již výše zmiňované normě.

Měření vyžaduje poměrně dlouhé rovné úseky před a za měrným profilem. Nedostatkem této metody je možný vliv instalace hydrometrického kříže, který může způsobovat zavíření proudu a zúžení průřezu a tím pádem ovlivnění měření.

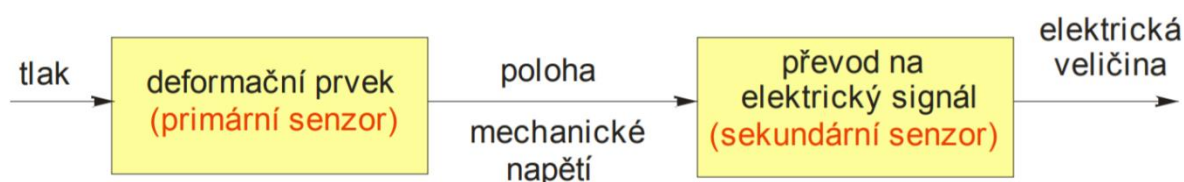
1.6 VÝHODY METODY TLAK-ČAS [2]

Gibsonova metoda má pro měření na díle řadu výhod. Například to, že příprava ke zkouškám touto metodou minimálně omezuje provoz elektrárny, nevyvolává tedy ztráty způsobené odstávkou. Jde o primární metodu, která je oproti hydrometrickým vrtulím cca o 2 řády levnější v rámci přístrojového vybavení a o 1 až 2 řády levnější v rámci kalibrace snímačů. Při dobrých podmínkách pro měření dosahuje lepší přesnosti oproti již zmiňovaným hydrometrickým vrtulím, a to až k 1 %, běžně cca 1,14 %.

2 SNÍMAČE TLAKU [8] [9] [10] [11]

Dnes se pro měření tlaku na velkých vodních dílech používají výhradně tlakoměry s elektrickým výstupem, které umožňují zpracování výsledků měření pomocí výpočetní techniky. Tlakoměry s elektrickým výstupem jsou jinak nazývány jako tlakové snímače, senzory nebo elektrické převodníky.

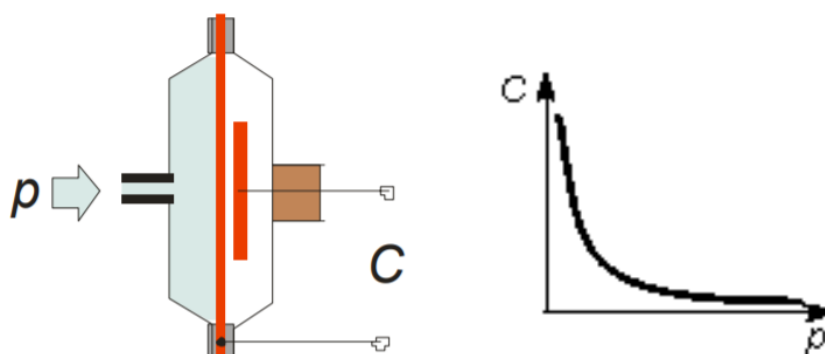
Základem tlakových snímačů je deformační tlakoměrný prvek (membrána, trubice, vlnovec atd.). Na deformační prvek (primární sensor) navazuje vhodný sensor s elektrickým výstupem (sekundární sensor), který vyhodnocuje deformaci způsobenou změnou měřeného tlaku (viz Obr. 7). Výsledkem působení síly při deformaci měřícího prvku je buď změna polohy nebo změna mechanického napětí. K převodu na elektrický signál se tedy využívají dva druhy sensorů: senzory polohy (potenciometrické, indukčnostní, kapacitní, optické) nebo senzory mechanického napětí (tenzometrické, piezoelektrické, rezonanční).



Obr. 7 Schéma elektrického převodníku tlaku [11]

2.1 KAPACITNÍ SNÍMAČE TLAKU

Princip kapacitních snímačů spočívá v tom, že jedna elektroda kondenzátoru je tvořena membránou z tenkého vodivého materiálu, jejíž poloha se mění působením tlaku. Druhá elektroda je pevná. Prostor mezi elektrodami je vyplněn dielektrikem, kterým je vzduch nebo jiný inertní plyn, popř. silikonový olej. Změna vzdálenosti elektrod kondenzátoru (změna tloušťky dielektrika) způsobí změnu kapacity. Průběh charakteristiky je nelineární (jedná se o hyperbolickou závislost). Změny kapacity, a tím i citlivost, jsou největší při malých mezerách. Často se používá diferenční kapacitní sensor, který souhlasně potlačuje vlivy působící na obě části, např. teplotní dilataci. Tyto snímače se používají zejména v oblasti nižších tlaků.



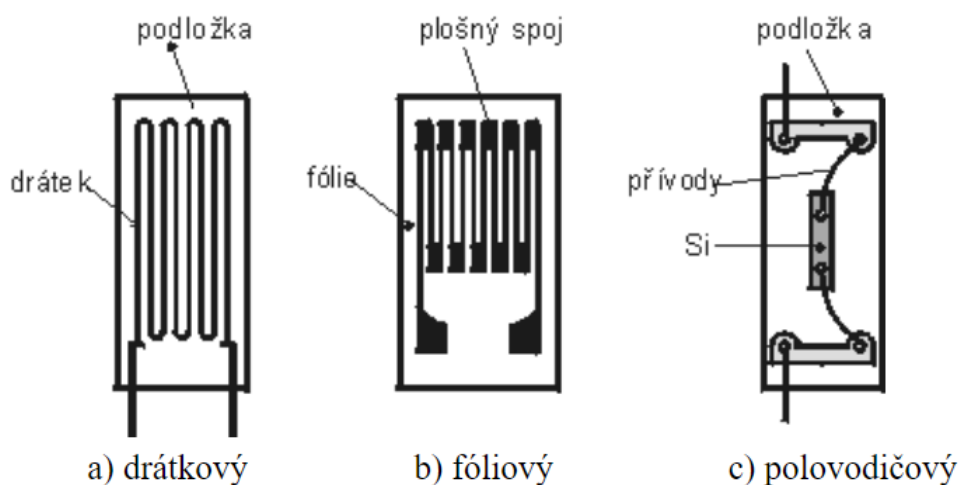
Obr. 8 Schéma kapacitního snímače a jeho nelineární charakteristika [9] [11]

2.2 TENZOMETRICKÉ SNÍMAČE TLAKU

Odporový tenzometr je senzor, u něhož se mění elektrický odpor při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací³. Při deformaci vodičů a polovodičů dochází ke změnám krystalografické orientace, která vede ke změně odporu. Dělí se na kovové a polovodičové odporové tenzometry.

Při deformaci kovových vodičů se mění jejich rozměry, což vede ke změně jejich elektrického odporu. Zhotovují se z odporových drátků o průměru 0,02 až 0,05 mm, který je nalepen ve tvaru mnohonásobné vlásenky na tenký podklad z papíru nebo z plastické hmoty. Konce drátku jsou připájeny na tlustší vývody. Celý tenzometrický snímač se na měřenou součást přilepí speciálním lepidlem. Snímače složitějších tvarů (radiální, spirálové) se dnes vyrábí odleptáváním tenké odporové fólie.

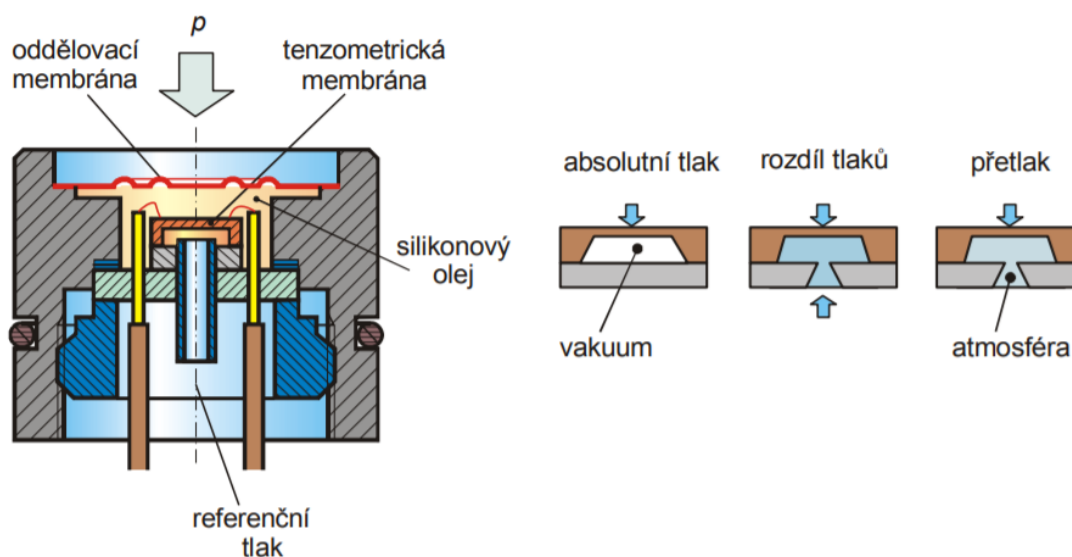
Polovodičové tenzometry se vyrábějí z monokrystalu křemíku, a to buď řezáním, broušením či leptáním. Lepí se buď na fenolformaldehydovou podložku nebo přímo na měřicí mechanický člen. Působení mechanického namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu polovodiče nebo v difúzní vrstvě polovodiče vede ke změně pohyblivosti nosičů náboje (piezorezistivní jev) a tím se mění elektrická vodivost a odpor senzoru. Změna odporu závisí na typu polovodiče i na koncentraci příměsí. Vykazují nelineární závislosti odporu na deformaci i teplotě. Polovodičové tenzometry jsou citlivější než kovové.



Obr. 9 Provedení tenzometrických snímačů tlaku [10]

Dále existují snímače tlaku s difundovanými tenzometry. Na povrchu křemíkové membrány jsou difúzní technologií vytvořeny polovodičové tenzory. Membrána je tedy současně pružným elementem pro snímání tlaku a převodníkem na elektrický signál. Mezi hlavní přednosti křemíkové membrány jako deformačního prvku patří platnost Hookova zákona v širokém rozsahu deformací a zanedbatelné hystereze. Křemíkové čidlo chrání silikonová náplň s oddělovací membránou.

³ Pružnými deformacemi rozumíme takové síly, které působí v mezích platnosti Hookova zákona ($\epsilon = \sigma/E$) a jsou zpravidla vyvolány tahem nebo tlakem. (ϵ - poměrná délka prodloužení, E - Youngův modul pružnosti v tahu, σ - mechanické napětí)



Obr. 10 Schéma tenzometrického snímače tlaku s difundovanými tenzometry [11]

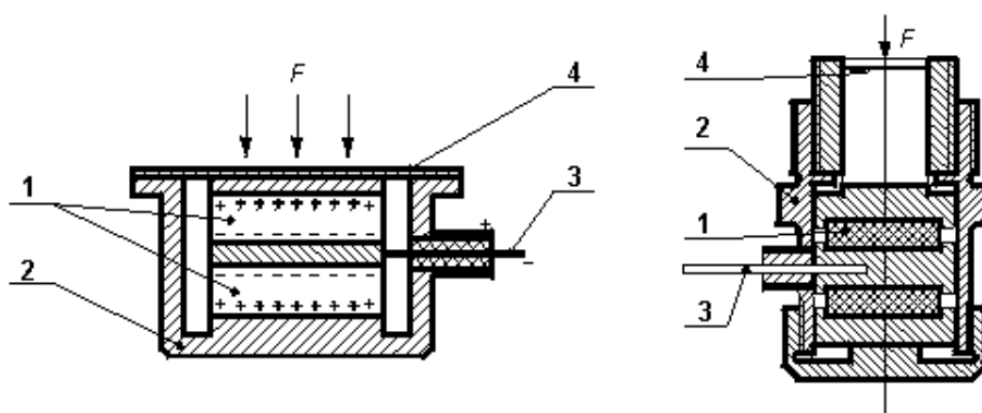
2.3 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE TLAKU

Při mechanické deformaci (působení tlaku) některých krystalů (např. křemene, BaTiO₃ – titaničitan barnatý) dochází uvnitř dielektrika k polarizaci a na plochách ke vzniku elektrického náboje. Tomu se říká piezoelektrický jev. Jako piezoelektrický senzor se používá výbrus⁴ z krystalu, který má piezoelektrické vlastnosti. Při silovém působení na tento výbrus dochází k vyvolání elektrického náboje, piezoelektrický snímač je tedy generátorem elektrického signálu.

K hlavním přednostem těchto snímačů patří jejich malé rozměry a hmotnost, které vedou k dobrým dynamickým vlastnostem. Mají časovou konstantu v řádu mikrosekund a jsou tedy předurčeny k měření dynamických tlakových průběhů. Jsou vhodné i pro měření za vysokých teplot (do 550°C). K nevýhodám patří teplotní závislost, obtížnější zpracování signálu a nemožnost měřit ve statickém stavu. Jsou to špičkové přístroje a jejich cena je tedy vysoká.

Obr. 11 znázorňuje schéma piezoelektrického snímače tlaku. Snímač obsahuje dva piezoelektrické krystaly (1), které jsou zapojeny proti sobě a jejich náboje se sčítají. Křít snímače (2) je vodivě spojen s vnějšími elektrodami obou krystalů a současně vytváří elektrické i magnetické stínění. Centrální elektroda (3) je vyvedená izolační průchodkou. Přenos tlakové síly na krystal je zprostředkován membránou (4).

⁴ Na plochách specificky orientovaných k ose mechanického namáhání se dělají výbrusy a plochy se opatřují kovovými elektrodami.



Obr. 11 Schéma piezoelektrických snímačů tlaku [10]

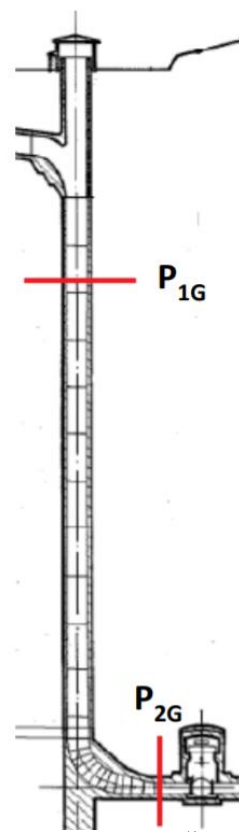
3 VYHODNOCENÍ PRŮTOKU

Vyhodnocení průtoku metodou tlak-čas bylo provedeno na reálných datech z měření na VE Lipno I a na PVE Dalešice. Průtok byl vyhodnocován pomocí programu *MS Excel*. Podrobný postup vyhodnocení je popsán na datech naměřených na VE Lipno I na TG1.

3.1 VE LIPNO [12]

Vodní elektrárna Lipno I je součástí vltavské kaskády. Její nádrž s rozlohou téměř 50 km² představuje svou plochou největší umělé jezero v ČR. Objem 306 mil. m³ je využíván pro víceleté řízení odtoku. Regulací průtoku se zvětšují minimální odtoky a omezují povodňové špičky. Tato elektrárna se využívá k výrobě levné, ekologicky čisté a špičkové elektrické energie a pro regulaci výkonu celostátní energetické soustavy. Elektrárna je schopna najet na plný výkon do 150 vteřin. Ovládána je dálkově z centrálního dispečinku vodních elektráren ve Štěchovicích a umožňuje tak ovlivňovat výkonovou bilanci elektrizační soustavy ČR. Kolísání průtoku vyrovnává malá průtočná vodní elektrárna Lipno II o výkonu 1,5 MW, vybudovaná pod Lipnem I.

Vodní dílo Lipno vznikalo v letech 1953-58. K zadržení vody slouží kombinovaná zemní a gravitační hráz o výšce 26 m. Samotná vodní elektrárna se nachází v podzemní kaverně vylámané v hloubce 160 m pod terénem v blízkosti hráze (viz Obr. 13). Voda je přiváděna na turbíny dvěma tlačnými ocelovými šachtami, průměru 4,5 m a délky 160 m, přes kulové uzávěry a odváděna 3,6 km dlouhým podzemním odpadním tunelem, širokým 8,4 m a vysokým 7,8 m. V podzemní elektrárně, uvedené do provozu v roce 1959, jsou umístěna dvě plně automatizovaná soustrojí s Francisovými turbínami a potřebná elektrická zařízení. Instalovaný výkon turbín je 2x60 MW. Obr. 12 znázorňuje řez přiváděcím potrubím s vyznačenými měřicími průřezy.



Obr. 12 Řez přiváděcím potrubím [8]



Obr. 13 Vodní elektrárna Lipno I [12]

3.2 PVE DALEŠICE [13]

Vodní dílo Dalešice bylo vybudováno v souvislosti s výstavbou blízké jaderné elektrárny Dukovany. Součástí vodního díla jsou nádrž v Dalešicích s objemem 127 mil. m³, vyrovnávací nádrž Mohelno, přečerpávací elektrárna Dalešice a průtočná vodní elektrárna Mohelno. Vodní nádrž Dalešice především zajišťuje technologickou vodu pro JE Dukovany, vytváří spád a užitečný obsah pro práci PVE Dalešice a dlouhodobě vyrovnává průtok řeky Jihlavy. Podobně jako VE Lipno I vyrábí elektřinu ve špičkách, dále odebírá energii v době jejího přebytku, reguluje výkon celostátního energetického systému a funguje i jako okamžitá poruchová rezerva. Rychlost najezení na plný výkon je 60 sekund.

Vodní dílo Dalešice bylo postaveno v letech 1970-78. Nádrž je vytvořena sypanou rokfilovou hrází s jílovým těsněním o výšce 100 m. Na turbíny přivádí vodu 4 ocelová potrubí spojující vtokový objekt s elektrárnou. Turbínové uzávěry tvoří hydraulicky ovládané klapky. V přečerpávací vodní elektrárně jsou instalována 4 soustrojí s reverzními Francisovými turbínami pro spád 90 m. Celkový výkon je 475 MW.

3.3 URČENÍ TLAKOVÉ DIFERENCE

Jako první krok je třeba určit tlakovou diferencí Δp . Jak již bylo uvedeno, měření tlaku probíhalo na dvou průřezích potrubí vždy čtyřmi tlakovými snímači (Obr. 2). Nejdříve se tedy určí střední hodnota tlaku v daném průřezu měření jako průměrná hodnota ze všech čtyř tlakových snímačů v každém časovém okamžiku zvlášť.

Horní průřez (první po směru proudu):

$$p_{1G} = \frac{p_{1G1} + p_{1G2} + p_{1G3} + p_{1G4}}{4} \quad (17)$$

Dolní průřez (druhý po směru proudu):

$$p_{2G} = \frac{p_{2G1} + p_{2G2} + p_{2G3} + p_{2G4}}{4} \quad (18)$$

Rozdílem středních hodnot tlaků v horním a dolním průřezu měření se spočítá naměřená tlaková diference Δp_m pro každý časový krok jako:

$$\Delta p_m = p_{2G} - p_{1G} \quad (19)$$

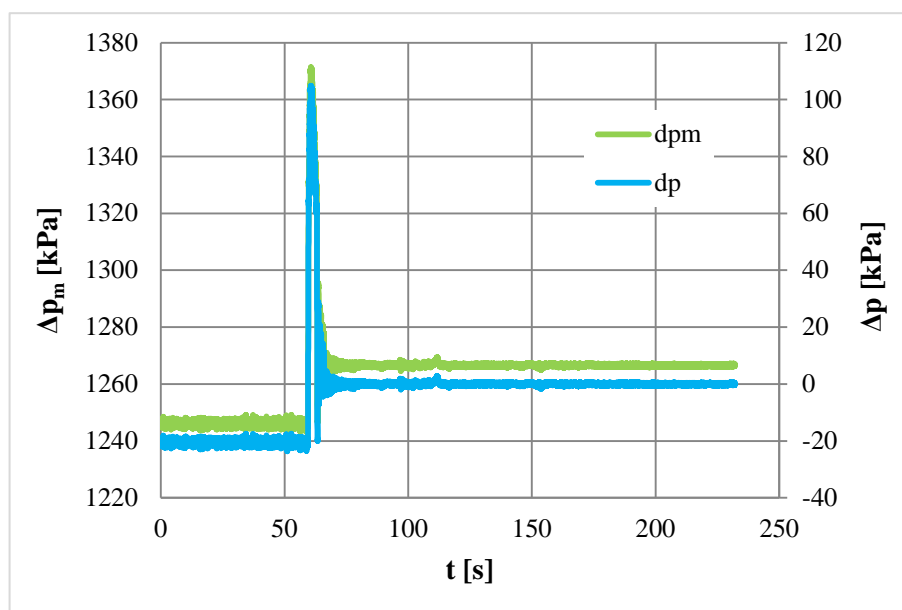
Celkový tlakový rozdíl Δp se určí tak, že se od naměřené tlakové diference Δp_m odečte statický tlak, neboli průměrná hodnota naměřené tlakové diference v okamžiku, kdy je průtok nulový, tedy po dovření rozvaděče. Statický tlak se určí z naměřeného tlakového rozdílu jako:

$$\Delta p_s = \Delta p_m (Q = 0) \quad (20)$$

Poté se v každém časovém okamžiku spočítá celková tlaková diference jako rozdíl naměřené tlakové diference v tomto časovém okamžiku a hodnoty statického tlaku:

$$\Delta p = \Delta p_m - \Delta p_s \quad (21)$$

Graf 1 zobrazuje průběh tlaků při vodním rázu, který je vyvolaný uzavíráním rozvaděče, a jeho následné dokmitávání. Na začátku měření byl průtok konstantní a to až přibližně do 60 s, kdy začalo postupné zavírání rozvaděče. Vlivem tohoto zavírání došlo k vodnímu rázu a nárůstu tlaku o hodnotu až 125 kPa. Poté došlo ke zpětnému proudění, k poklesu tlaku a jeho následnému dokmitávání. Kolem 112. s je patrné úplné dovření kulového ventilu, které se projevilo malým zakolísáním tlaku. Na grafu je také vidět posunutí naměřené tlakové diference po odečtení statického tlaku, který se v tomto případě určil jako průměrná hodnota naměřeného tlaku mezi 120. až 145. s, kdy je již průtok nulový. Zelená křivka zobrazuje původní naměřenou tlakovou diferenci a modrá křivka přepočtenou celkovou tlakovou diferencí, se kterou se dále počítá.



Graf 1 Časový průběh naměřené tlakové diference (modrá křivka) a přepočtené celkové tlakové diference (zelená křivka)

3.4 URČENÍ ZTRÁTOVÉHO SOUČiniteLE

Při určování ztrátového součinitele nebyl gravitační člen uvažován, protože gravitace je již obsažena v celkové tlakové diferenci. Potom se odporový součinitel určí podle rovnice (10) jako:

$$R = -\frac{\Delta p(Q)}{Q_0 \cdot |Q_0|} \quad (22)$$

kde $\Delta p(Q)$ je celková tlaková diference při ustáleném průtoku. V tomto případě je to průměrná hodnota mezi 0. až 50. s. Za Q_0 se dosazuje ustálená hodnota průtoku před začátkem zavírání uzávěru. V *ME Excel* bylo počítáno s hodnotou průtoku v nultém časovém kroku (v čase $t = 0$). Druhá mocnina byla nahrazena absolutní hodnotou kvůli možnému zpětnému proudění.

3.5 URČENÍ PRŮTOKU

Při určování průtoku se vychází z rovnice (9). Jedná se o diferenciální rovnici, na kterou je třeba aplikovat numerickou metodu, aby se získalo disktrétní řešení ve tvaru algebraické rovnice. Numerické řešení spočívá v diskretizaci rovnice, tedy výpočtová doména se rozdělí na části. Zde tím jsou myšleny jednotlivé naměřené časové hodnoty tlaků. Pro časový člen se používá metoda dopředné diference (1. řád přesnosti). Opět je zde vynechán gravitační člen, protože vliv gravitace je již obsažen v celkové tlakové diferenci. Potom má rovnice tvar:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{S}{\rho \cdot L} (R \cdot Q \cdot |Q| + \Delta p) = -\frac{R \cdot Q \cdot |Q| + \Delta p}{\rho \cdot P_f} \quad (23)$$

Po diskretizaci má rovnice následující podobu:

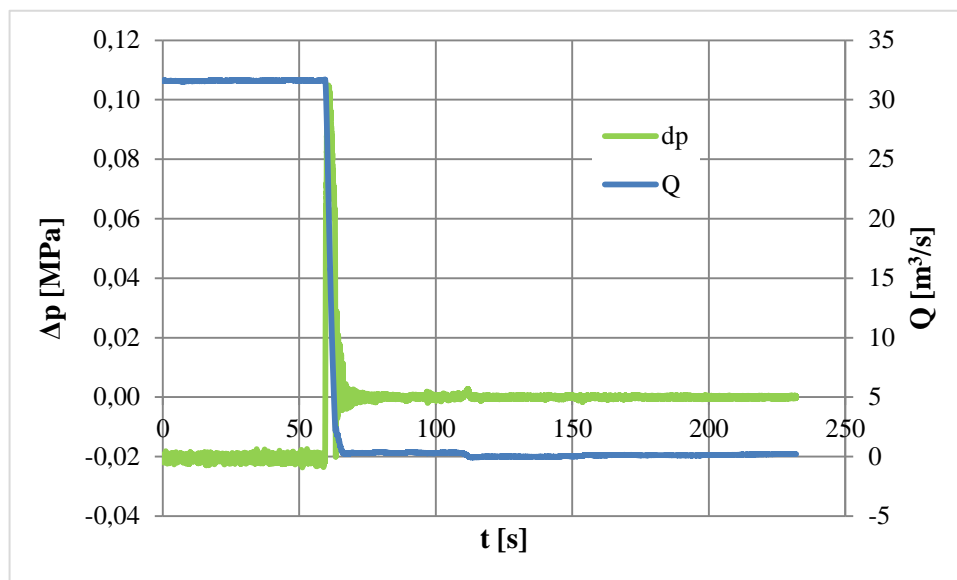
$$\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t} = -\frac{R \cdot Q_i \cdot |Q_i| + \Delta p_i}{\rho \cdot P_f} \quad (24)$$

Vyjádří se hledaný průtokový člen, kdy hodnota Q_i je známá z předchozího časového kroku a počítá se hodnota Q_{i+1} :

$$Q_{i+1} = Q_i - \frac{\Delta t}{\rho \cdot P_f} (R \cdot Q_i \cdot |Q_i| + \Delta p_i) \quad (25)$$

Počáteční hodnota Q_0 se volí. Následně se provede výpočet v každém časovém kroku závislý právě na této počáteční hodnotě. Poté přijde na řadu korekce počáteční hodnoty Q_0 . Po dověření rozvaděče by měl být průtok nulový, proto se určí průměrná hodnota v čase po dověření. V tomto případě to bylo mezi 120. až 145. s. Následně se v *MS Excel* pomocí funkce *Řešitel* tento průměr na základě počátečního průtoku Q_0 nechá přiblížit nulové hodnotě. Hodnota Penstock faktoru P_f byla předem zadána.

V grafu (viz Graf 2) lze vidět vypočtený časový průběh průtoku (modrá křivka) a tlakové difference (zelená křivka). Průtok byl až do doby, kdy došlo k zavírání, konstantní. Poté, kolem 60. s, kdy se začal rozvaděč zavírat, došlo k jeho prudkému poklesu a následnému dokmitávání kolem nulové hodnoty.



Graf 2 Průběh průtoku a tlakové difference v závislosti na čase

3.5.1 FUNKCE ŘEŠITEL V MS EXCEL [14]

Řešitel je doplněk pro MS Excel v záložce Data, pomocí kterého je možné najít optimální (maximální nebo minimální) hodnotu pro vzorec v jedné buňce, tzv. buňce cíle, s ohledem na omezující podmínky (limity), určené hodnotami jiných buněk vzorce v listu. Řešitel pracuje se skupinou buněk označených jako rozhodovací proměnné nebo proměnné buňky. Ty se podílejí na výpočtů vzorců v buňce cíl a buňkách s omezujícími podmínkami. Řešitel upravuje hodnoty v buňkách rozhodovacích proměnných tak, aby byly splněné limity buněk s omezujícími podmínkami a aby došel k výsledku, který má být v cílové buňce. Zjistí tedy maximální nebo minimální hodnotu jedné buňky při změně ostatních buněk. Je možné zadat až 200 proměnných buněk. Jako omezující podmínky je možné zvolit různé vztahy (\leq , $=$, \geq), celé číslo, binární číslo nebo vše odlišné. Při použití Řešitele je na výběr ze tří libovolných modelů řešení. Metoda *GRG Nonlinear*, která slouží k řešení hladce nelineárních problémů, metoda *LP Simplex*, která slouží k řešení lineárních problémů a metoda *Evolutionary*, která slouží k řešení jiných než hladkých problémů.

V tomto případě byla cílem buňka s počátečním průtokem Q_0 na základě změny proměnné buňky s průměrem průtoků mezi 120. až 145. s na nulovou hodnotu. Omezující podmínky nebylo třeba zadávat. Řešitel stanovil počáteční průtok Q_0 s průměrným průtokem v intervalu 120. až 145. jdoucí k nule.

3.5.2 FUNKCE CONCATENATE V MS EXCEL [14]

Pro výpočet tlakového rozdílu je nutné nejprve zvolit časový rozsah, například 120. až 145. s. Při výpočtu v programu MS Excel se tedy musí určit, kterým řádkům v rozsáhlém souboru dat odpovídají dané časové okamžiky a to tak, že se k prvnímu řádku, na kterém začíná soubor naměřených dat, přičte podíl daného časového okamžiku a časového kroku:

$$\text{hledaný řádek} = 1. \text{řádek dat} + \frac{\text{zadaný čas}}{\text{časový krok}} \quad (26)$$

Časový krok se určí jako převrácená hodnota vzorkovací frekvence:

$$\text{časový krok} = \frac{1}{\text{vzorkovací frekvence}} \quad (27)$$

Tlakový rozdíl se spočítá jako průměrná hodnota ve zvoleném časovém okamžiku, tedy do argumentu funkce *PRŮMĚR* se dosadí hledané řádky odpovídající požadovaným časovým okamžikům ve sloupci obsahující hodnoty tlaků. V případě, že je z nějakého důvodu nutné změnit zvolený časový interval, musí se znovu přepočítat odpovídající řádky a následně ručně přepsat argument ve funkci *PRŮMĚR*. Pokud by se časový interval měnit vícekrát, mohl by být tento postup poměrně zdlouhavý.

Tento postup může usnadnit funkce *CONCATENATE*, která se používá ke spojení dvou nebo více textových řetězců do jednoho řetězce. Do argumentu funkce se s uvozovkami " " píše text, bez uvozovek odkaz na buňku. Mezi textové argumenty se píše středník. Pokud tedy použijeme tuto funkci, jako je zobrazeno na následujícím obrázku (viz Obr. 14), vrátí nám textový řetězec ve tvaru C15613:C18863. V buňkách B4 a B5 jsou spočítány řádky odpovídající zvoleným časovým okamžikům výše uvedeným postupem. Následně se

do argumentu funkce *PRŮMĚR* zadá odkaz na buňku přes funkci *NEPŘÍMÝ.ODKAZ*, ve které byla použita funkce *CONCATENATE* ($=\text{PRŮMĚR}(\text{NEPŘÍMÝ.ODKAZ}(15))$). Potom už stačí jen přepisovat hodnoty časových okamžiků a zbytek výpočtu se provádí automaticky.

| | A | B | C | H | I |
|----|-----|-------|--------|------------------------------------|-----------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | čas | řádek | C | 10,8936 (Pf) | |
| 4 | 145 | 18863 | ro | 1000 | |
| 5 | 120 | 15613 | dp Q=0 | 1,27 dpm při nulovém průtoku | =+CONCA |
| 6 | 50 | 6513 | dp Q | -0,0248 ustálený průtok na začátku | D13:D6513 |
| 7 | 0 | 13 | R | 2,00605E-05 odpor:R=-dpQ/Q^2(t=0) | |
| 8 | 150 | 19513 | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | | | | | |

Obr. 14 Příklad použití funkce *CONCATENATE* v MS Excel

Funkce *NEPŘÍMÝ.ODKAZ* vrátí odkaz určený obsahem textovým řetězcem. Odkazy jsou okamžitě vyhodnocovány a je zobrazován jejich obsah. Syntaxe této funkce obsahuje dva argumenty, povinný a nepovinný. Povinným argumentem je odkaz na buňku obsahující buď další odkaz, název definovaný jako odkaz nebo odkaz na buňku ve tvaru textového řetězce. Pokud je odkazováno na jiný sešit (externí odkaz), musí být daný sešit otevřený. Nepovinným argumentem je logická hodnota, která určuje typ odkazu.

3.5.3 VYHODNOCENÉ PRŮTOKY

V následující tabulce (viz Tab. 1) jsou uvedeny výsledky pro měření při různých průtocích na VE Lipno. První sloupec obsahuje názvy souborů s naměřenými daty. Výsledkem je průměrná hodnota průtoku v časovém intervalu před začátkem zavírání rozvaděče (0.-50. s). Pro informaci je zde také uvedena průměrná hodnota průtoku po uzavření rozvaděče (120.-145. s), neboli chyba, se kterou byl určen průtok Q (proměnná buňka pro *Řešitele*).

Tab. 1 Vyhodnocené průtoky pro VE Lipno

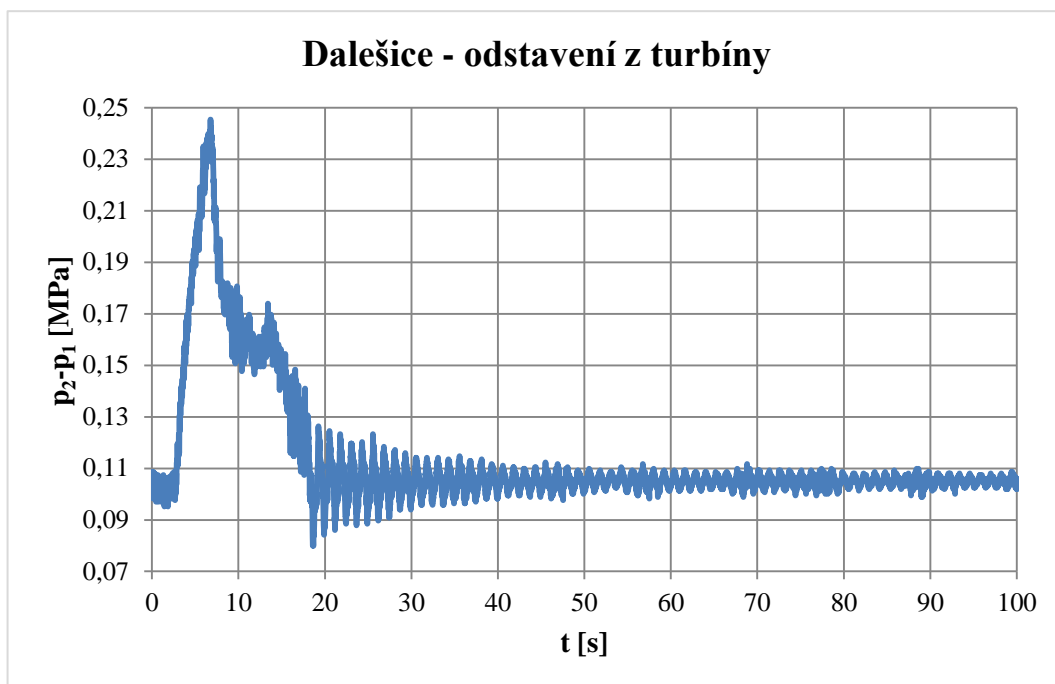
| Soubor | Ustálený průtok | Chyba |
|--------|---------------------|---------------------|
| dat | [m ³ /s] | [m ³ /s] |
| G11 | 25,791 | -1,3E-08 |
| G13 | 31,603 | -1,6E-10 |
| G14 | 35,152 | 2,0E-09 |
| G15 | 38,808 | -5,5E-09 |
| G20 | 46,675 | 1,5E-09 |

V další tabulce (viz Tab. 2) jsou uvedeny vyhodnocené průtoky pro PVE Dalešice. Zde bylo měření prováděno jak při odstavování z turbínového provozu (T), tak při odstavování z čerpadlového provozu (Č). Tyto režimy lze rozeznat pomocí průběhu naměřené tlakové difference p_2-p_1 , kdy se vliv zavření rozvaděče projeví buď nárůstem (T) nebo poklesem (Č) tlaku. Příklady těchto tlakových průběhů jsou pro oba režimy uvedeny v následujících grafech (viz Graf 3 a Graf 4). Při vyhodnocování průtoku z dat naměřených při čerpadlovém provozu byla naměřená tlaková difference brána jako:

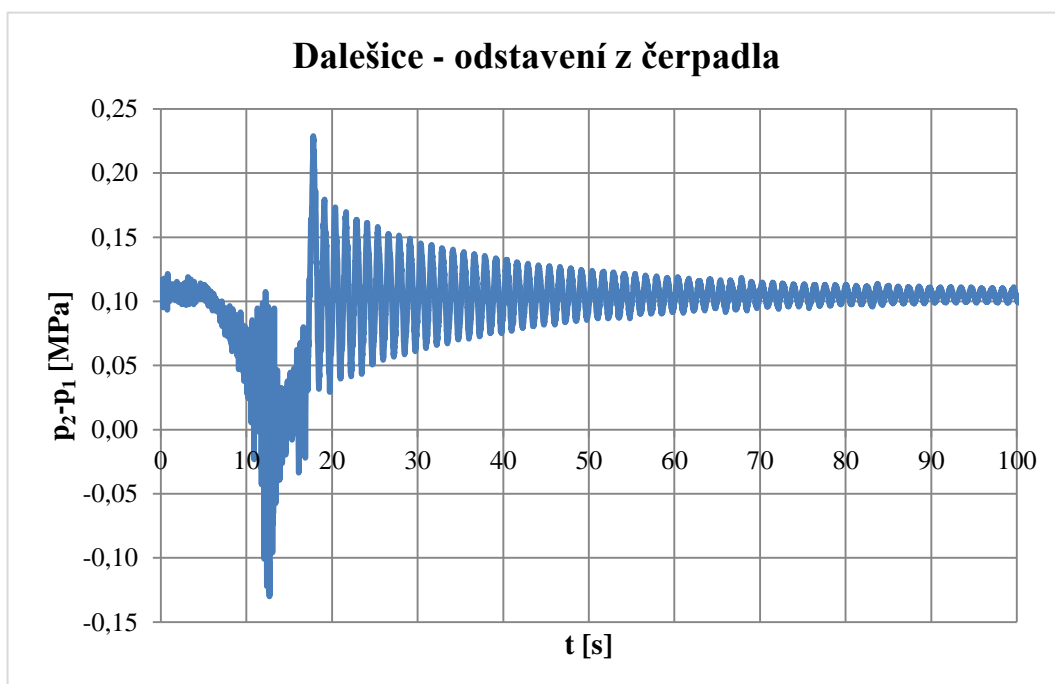
$$\Delta p_m = p_{1G} - p_{2G} \quad (28)$$

Tab. 2 Vyhodnocené průtoky pro PVE Dalešice

| Soubor dat | T/Č | Ustálený průtok [m ³ /s] | Chyba [m ³ /s] |
|------------|-----|-------------------------------------|---------------------------|
| dal01 | Č | 114,822 | -7,0E-10 |
| dal02 | Č | 124,803 | -2,8E-12 |
| dal04 | Č | 112,927 | 2,3E-12 |
| dal06 | T | 150,710 | -8,6E-14 |
| dal07 | T | 110,705 | -3,3E-09 |
| dal08 | T | 113,586 | -1,9E-09 |
| dal10 | T | 144,348 | 3,9E-14 |
| dal11 | T | 134,573 | 2,7E-09 |
| dal12 | T | 128,302 | -6,1E-10 |



Graf 3 Průběh tlakové difference při odstavení z turbínového provozu na PVE Dalešice (dal06)



Graf 4 Průběh tlakové difference při odstavení z čerpadlového provozu na PVE Dalešice (dal04)

4 STANOVENÍ CITLIVOSTI VYHODNOCENÉHO PRŮTOKU NA VÁHY JEDNOTLIVÝCH TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ

Tlakové snímače bývají instalovány na vnitřní stěny velkých přírodních potrubí v průběhu pravidelných ročních odstávek. Vzhledem k tomu, že většinou jsou tato potrubí postavena pod zemským povrchem, není k tlakovým snímačům možný přístup z venku, ale pouze zevnitř. To značně komplikuje přístupnost k těmto snímačům, dojde-li k jejich poškození a je třeba je vyměnit či opravit. V takovém případě je nutná odstávka vodní elektrárny, což z ekonomických důvodů většinou nepřipadá v úvahu.

Pokud je tedy zjištěn nefunkční snímač, vyhodnocení průtoku metodou tlak-čas je prováděno pouze s funkčním počtem snímačů. Je tedy na místě stanovit citlivostní analýzu na váhy jednotlivých tlakových snímačů, neboli jaký vliv na vyhodnocený průtok má výpočet s vynecháním jednoho nebo více snímačů. Ta spočívá v opakovaném vyhodnocování stejných dat metodou tlak-čas, kdy jsou postupně uvažovány váhy na jednotlivé snímače. Dále spočívá v porovnání odchylek jednotlivých tlakových snímačů v dolním průřezu měření.

4.1 VÁHY JEDNOTLIVÝCH SNÍMAČŮ

Při zjišťování váhy jednotlivých tlakových snímačů a jejich vlivu na výpočet průtoku bylo postupováno tak, že nejprve se provedl výpočet metodou tlak-čas s uvažováním všech čtyř tlakových snímačů v dolním průřezu měření a následně se na stejných datech provedly další čtyři výpočty, ale tentokrát s uvažováním vždy jen jednoho dolního tlakového snímače (p2G1/p2G2/p2G3/p2G4). Experimentálně bylo ověřeno, že pokud by byl právě onen tlakový snímač vynechán a výpočet by byl prováděn s uvažováním zbývajících tří tlakových snímačů, odchylka od průtoku vypočteného s uvažováním všech čtyř snímačů vyjde znaménkově opačně a přibližně třikrát menší než s uvažováním jednoho tlakového snímače. Tlakové snímače v horním průřezu měření byly v každém výpočtu uvažovány všechny čtyři z důvodu řádově menších naměřených hodnot tlaků než u snímačů v dolním průřezu.

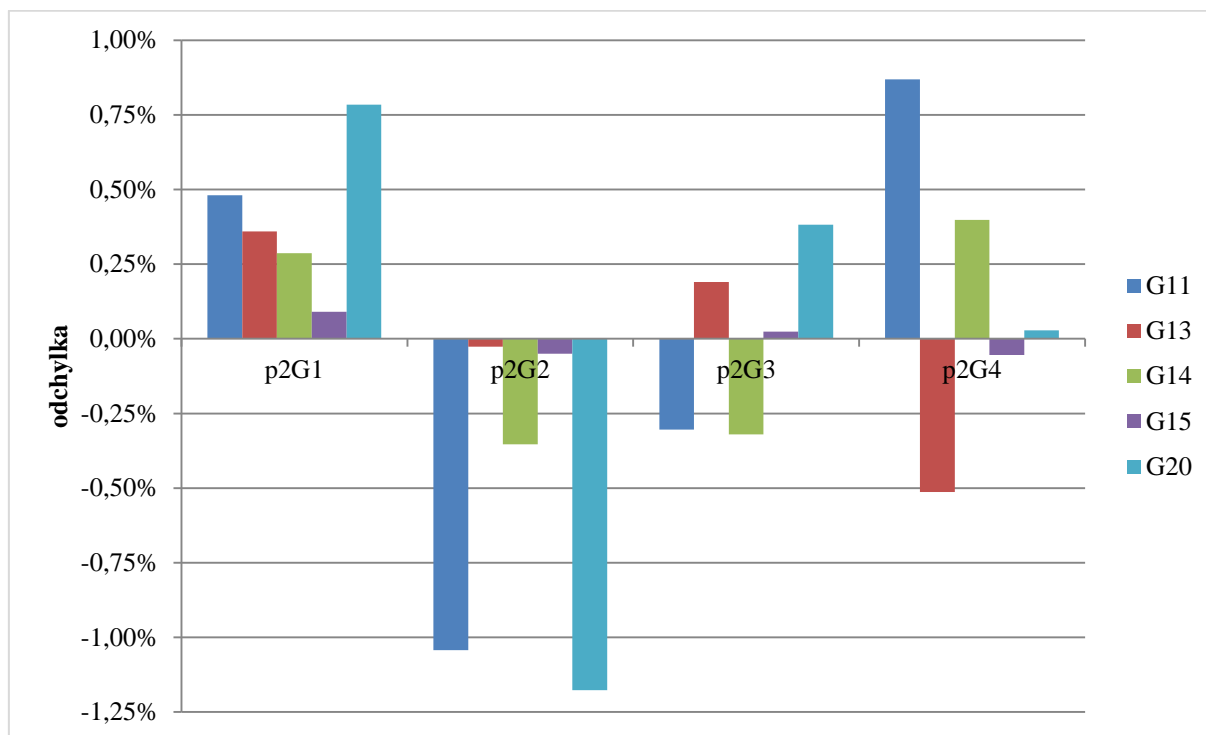
Jako výsledná hodnota průtoku, která byla navzájem porovnávána, se bere průměrná hodnota průtoku v časovém intervalu 0–50 s jako ustálená hodnota průtoku před začátkem uzavírání rozvaděče. Výchozí hodnotou pro vyhodnocování váhy jednotlivých snímačů je průtok vyhodnocený s uvažováním všech čtyř snímačů. Ten tedy znamená 100 %.

Pro porovnání zde byla použita data naměřená na VE Lipno při různých průtocích. V tabulce (viz Tab. 3) jsou uvedeny ustálené hodnoty průtoků před začátkem zavírání rozvaděče se všemi čtyřmi snímači pro každý soubor dat.

Tab. 3 Měřené průtoky

| | | |
|------------|--------|-------------------|
| G11 | 25,791 | m ³ /s |
| G13 | 31,603 | m ³ /s |
| G14 | 35,152 | m ³ /s |
| G15 | 38,808 | m ³ /s |
| G20 | 46,675 | m ³ /s |

Graf 3 zobrazuje procentuální odchylky průtoků při použití jednotlivých snímačů od průtoku při použití všech čtyř snímačů. Vyhodnocení bylo provedeno pro 5 měřených souborů. Největší odchylku vykazuje snímač p2G2 a to až přes 1 %, což v případě souboru G20 znamená 0,549 m³/s. Při použití snímače p2G1 byl vyhodnocený průtok vždy o něco větší, než při použití všech čtyř snímačů. Nejmenší průměrnou absolutní odchylku vykazuje snímač p2G3 (0,24 %), kdežto největší právě snímač p2G2 (0,53 %).



Graf 3 Procentuální odchylka průtoku jednotlivých tlakových snímačů

4.2 ODCHYLKY JEDNOTLIVÝCH TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ

Citlivostní analýza byla vyhodnocena také přímo z naměřených tlaků a to v druhém průřezu měření. Porovnával se rozdíl naměřených tlaků na jednotlivých tlakových snímačích před začátkem zavírání rozvaděče a po jeho zavření. V dolním průřezu jsou větší odchylky než v horním průřezu, tlaky zde nabývají výrazně vyšších hodnot. Nejprve byla v každém časovém okamžiku určena střední hodnota tlaku p_s jako průměr ze všech čtyř tlakových snímačů. Poté byla tato hodnota odečtena od hodnot jednotlivých snímačů jako $p_i - p_s$. Pro jednoduchost vyhodnocování byla průměrná hodnota tlaků po uzavření rozvaděče, kdy tlak dokmitává kolem ustálené hodnoty, srovnána pomocí funkce *Řesitel* u každého snímače na nulovou hodnotu, v tomto případě v časovém intervalu 120–145 s. Následně byla určena průměrná hodnota tlaku dp před začátkem zavírání rozvaděče, tedy v časovém intervalu 0–50 s. Hodnota dp tedy vyjadřuje rozdíl tlaku před a po uzavření rozvaděče a zastavení průtoku v druhém průřezu měření. Tyto hodnoty byly mezi jednotlivými snímači a při různých měřených průtocích porovnány.

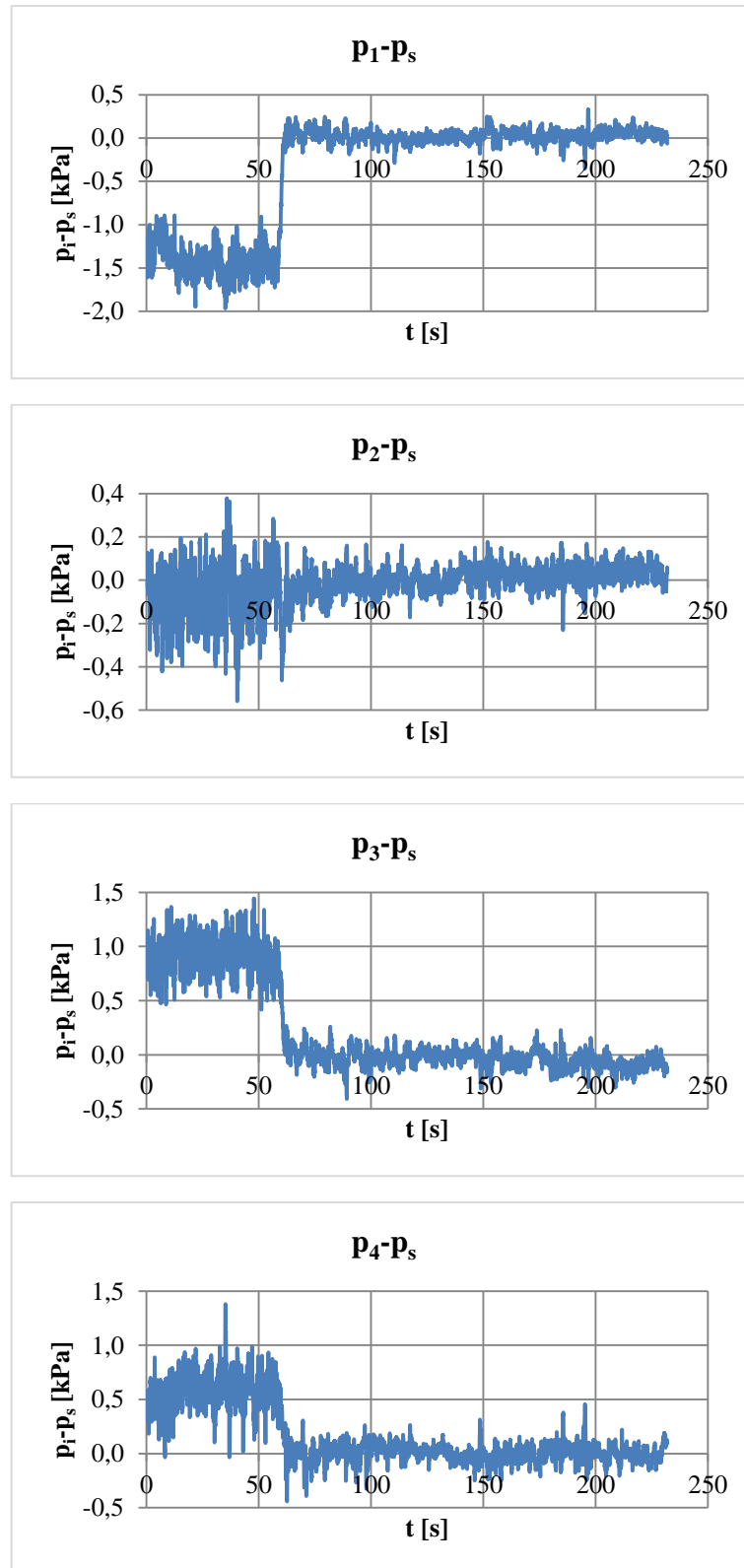
Graf 4 zobrazuje, že tlakové snímače p2G1 a p2G2 mají záporný tlakový rozdíl a tlakové snímače p2G3 a p2G4 mají kladný tlakový rozdíl. Tlakové snímače p2G1 a p2G2 jsou umístěny v horní polovině měřeného průřezu, měří tedy menší hodnotu než je střední hodnota tlaku p_s . Naopak snímače p2G3 a p2G4 jsou umístěny v dolní polovině měřeného průřezu, měří tedy hodnotu tlaku větší než p_s . Kladné a záporné hodnoty tedy odpovídají umístění snímačů vzhledem k vodorovné ose potrubí. Rozmístění snímačů je znázorněno na obrázku výše (viz Obr. 2). Střední hodnota z těchto snímačů p_s je tedy vztažena k vodorovné ose měřeného průřezu. Absolutní hodnota tohoto tlakového rozdílu se zvětšuje se zvyšujícím se měřeným průtokem. Výjimkou je tlakový snímač p2G2, který si udržuje přibližně konstantní hodnotu kolem 0,09 kPa.

Největší absolutní tlakový rozdíl vykazuje snímač p2G1 a to 2,51 kPa při průtoku 46,475 m³/s. Tento snímač má také největší absolutní průměr z hodnot při různých průtocích a to 1,50 kPa. Na druhém místě je snímač p2G3 s 0,98 kPa a na třetím místě snímač p2G4 s 0,62 kPa.



Graf 4 Rozdíl tlaků před a po uzavření rozvaděče na dolních snímačích

Následující grafy (viz Graf 5) zobrazují příklady průběhu naměřeného tlakového rozdílu dp v závislosti na čase ze souboru dat G14. Z grafů je patrná anomálie tlakového snímače p2G2, který téměř nezaznamenal tlakovou změnu po dověření rozvaděče. To může být pravděpodobně způsobeno chybou lineární konstanty snímače. Z grafu (viz Graf 3) vyplývá, že výpočet právě s tímto tlakovým snímačem vykazuje největší odchylku od průtoku měřeného se všemi čtyřmi snímači a to až přes 1 %.



Graf 5 Průběhy tlakového rozdílu $dp(t)$ z naměřených dat G14

5 NEJISTOTY MĚŘENÍ [15] [16] [17] [18]

Jako nejistota měření je definován určitý parametr, který souvisí s výsledkem měření. Charakterizuje rozpětí hodnot, v nichž se nachází výsledná naměřená hodnota vůči hodnotě skutečné. Skutečný výsledek se tedy pohybuje v určitém intervalu okolo naměřené hodnoty. Snahou měření je co nejvíce minimalizovat tento interval.

Nejistoty se dělí na dva typy a to nejistota typu A $u_A(x)$ (statické zpracování měřených údajů) a nejistota typu B $u_B(x)$ (jiné). Celková (kombinovaná) nejistota se určí jako součet čtverců obou nejistot.

$$u_C(x) = \sqrt{u_A(x)^2 + u_B(x)^2} \quad (29)$$

5.1 NEJISTOTA TYPU B

Tato nejistota je založena na jiných než statistických metodách analýzy. Je podobná systematickým (soustavným) chybám⁵, ale lze ji použít i pro odhad vlivu kalibrace. Z hlediska měření je nepřipustná a nejsme schopni ji korigovat. Určuje se pomocí údajů výrobce měřicí techniky, zkušeností z předchozích sérií měření, údajů získaných kalibrací a z certifikátů. Za nejčastější zdroje nejistot jsou označovány nedokonalosti:

- použitých měřících přístrojů a systémů,
- použitých metod měření,
- použitých přepočtových konstant při nepřímém měření,
- použitých výpočtových vztahů (např. linearizace),
- podmínek měření.

Na tuto nejistotu nemá vliv počet měření. U tlakoměrů může být způsobena zavzdušněním snímačů nebo vypadlým napájením. Je možné ji minimalizovat například pomocí proškolené obsluhy, akreditovanou laboratoří a kvalitními snímači.

Pro tlakoměr ji lze určit jako součin třídy přesnosti a maximální možné měřené hodnoty:

$$U_B(x) = tř.p. \cdot p_{MAX} \quad (30)$$

5.2 NEJISTOTA TYPU A

Tato nejistota je způsobena mnoha malými náhodnými vlivy (nahodilé chyby). Je založena na statické analýze opakované série měření. Odhad výsledné hodnoty je reprezentován hodnotou aritmetického průměru \bar{x} . Příslušná nejistota k odhadu se určí jako směrodatná odchylka. Tuto nejistotu lze minimalizovat počtem vzorků a vícenásobným měřením.

⁵ Systematické chyby mají při opakovaném měření stále stejnou polaritu a velikost. Často jsou známy příčiny jejich vzniku, proto je možné většinu těchto chyb alespoň zmenšit opravou. Jsou způsobeny například vlivem teploty, kmitočtu, spotřebou přístrojů nebo nepřesností pozorování.

5.3 STATISTIKA A VÝPOČET NEJISTOTY TYPU A

Máme naměřený vektor:

$$\vec{x} = x_1 \dots x_n$$

Aritmetický průměr pro neroztříděný soubor (střední hodnota) se určí jako:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (31)$$

Základní charakteristiky proměnlivosti (variability) statistického souboru jsou rozptyl, směrodatná odchylka a směrodatná odchylka střední hodnoty.

Rozptyl vyjadřuje, jak moc jsou hodnoty ve sledovaném souboru rozptýleny, neboli jak moc jsou vzdálené (odchýlené) od průměru. Udává průměr druhých mocnin vzdáleností (neboli průměrnou čtvercovou odchylku) od průměru. Z praktických důvodů je hodnota těchto odchylek umocněna (abychom se zbavili záporných hodnot). Někdy se mu říká též variace. Pokud je roven nule, znamená to, že všechny hodnoty ve sledovaném souboru jsou si rovny. V programu *MS Excel* se pro výpočet dá použít funkce VAR. Při výpočtech se také užívá jiný vzorec, kdy výraz $\frac{1}{n}$ zaměníme výrazem $\frac{1}{n-1}$. Pro neroztříděný soubor se spočítá jako:

$$s^2(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \quad (32)$$

Výběrová směrodatná odchylka, podobně jako rozptyl, určuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměrné hodnoty. Jednoduše řečeno, je tedy průměrnou hodnotou od průměru a je rovna druhé odmocnině z rozptylu. Má tedy stejné jednotky jako původní hodnoty. Je opět vždy kladná a nezáleží u ní na počtu vzorků. V *MS Excel* slouží pro výpočet funkce SMODCH.VYBĚR. Směrodatná odchylka se určí pomocí vzorce:

$$s_x = \sqrt{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (33)$$

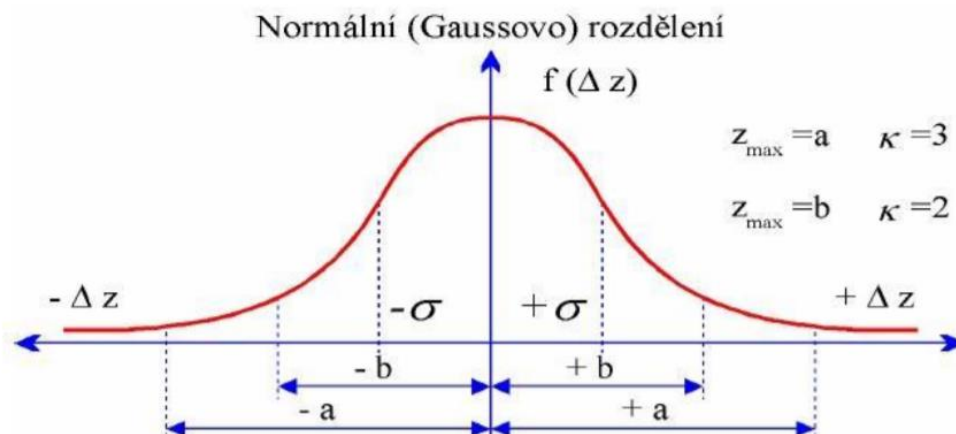
Směrodatná odchylka střední hodnoty je rovna standardní nejistotě typu A (u_A) veličiny X. Tady už záleží na počtu vzorků. Čím je jich více, tím menší je nejistota typu A. Určí se jako podíl směrodatné odchylky a druhé odmocniny z počtu vzorků.

$$S_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} = u_A(x) \quad (34)$$

Rozšířená standardní nejistota $U(x)$ poskytuje větší pravděpodobnost správného výsledku měření. Stanovuje interval okolo naměřeného výsledku měření, v němž se s určitou pravděpodobností nalézá skutečný výsledek. Získá se tak, že se standardní nejistota vynásobí určitým koeficientem rozšíření k .

$$U_A(x) = k \cdot u_A(x) = k \cdot S_{\bar{x}} \quad (35)$$

Jestliže můžeme předpokládat normální rozdělení výsledku měření (viz Obr. 15), volíme k jako kvantil normovaného normálního rozdělení. Například pro pravděpodobnost pokrytí přibližně 95 % bude $k = 2$ a pro 99,7 % bude $k = 3$. Standardní nejistota je určena s pravděpodobností 68 % ($k = 1$), jinak řečeno, 1/3 výsledků může padnout mimo takto stanovené pole nejistot.



Obr. 15 Normální (Gaussovo) rozdělení [18]

Koeficient rozšíření je možné stanovit i jiným postupem tak, aby odpovídal pravděpodobnosti pokrytí výsledku. Vychází se z určení efektivního počtu stupňů volnosti měření a tabulek koeficientu Studentova rozdělení. $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ je $(1 - \frac{\alpha}{2})$ kvantil Studentova rozdělení $S(k)$ s $k = n - 1$ stupni volnosti. α odpovídá hladině významnosti a n počtu vzorků. Kvantily tohoto rozdělení jsou uvedeny například v tabulce [12] na str. 162.

Na již změřených datech z Lipna byla spočítána rozšířená nejistota typu A určených průtoků jako směrodatná odchylka střední hodnoty. Byly uvažovány průměrné hodnoty průtoků v časovém intervalu od 0. do 50. s neboli průměrné hodnoty před začátkem uzavírání rozvaděče. Jako koeficient rozšíření k byl zvolen kvantil Studentova rozdělení. Vždy bylo uvažováno 5 vzorků a to jednou z výpočtu s použitím všech čtyř snímačů v dolním průřezu měření a čtyřikrát z výpočtu s použitím vždy jen jednoho snímače v dolním průřezu měření (viz kapitola 4). Z toho vyplývají 4 stupně volnosti. Hladina významnosti α byla zvolena 5 %, tedy $1 - \frac{\alpha}{2}$ odpovídá hodnotě 0,975. Těmto hodnotám odpovídá v již výše zmiňované tabulce kvantil $k = 2,776$. Následně tak mohla být spočítána rozšířená nejistota typu A. Aby bylo usnadněno porovnání, byla určena průměrná hodnota z 5 vzorků v každém souboru dat. Ta byla uvažována jako výchozí hodnota (100 %) a vůči ní byla porovnána rozšířená nejistota. V následující tabulce (viz Tab. 4) jsou zobrazeny výsledky.

Tab. 4 Rozšířená nejistota typu A určených průtoků (data Lipno)

| Soubor dat | G11 | G13 | G14 | G15 | G20 |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| $u_A(Q)$ [m ³ /s] | 0,085 | 0,046 | 0,054 | 0,010 | 0,153 |
| $U_A(Q)$ [m ³ /s] | 0,236 | 0,129 | 0,149 | 0,029 | 0,424 |
| Průměrná hodnota průtoků [m ³ /s] | 25,791 | 31,604 | 35,152 | 38,809 | 46,677 |
| Procentuální chyba $U_A(Q)/Q$ | 0,91% | 0,41% | 0,42% | 0,07% | 0,91% |

Největší rozšířená nejistota typu A vyhodnocených průtoků je v souboru dat G11 a G20, tedy s nejmenším měřeným průtokem a s největším měřeným průtokem. V těchto případech tvoří téměř 1 % průměrné hodnoty průtoků před zavřením rozvaděče. Naopak nejmenší je v souboru G15, kdy nepřesáhne ani desetinu procenta. Jak je patrné z grafu (viz Graf 3), tak v G11 a G20 jsou největší odchylky průtoků při výpočtu s jednotlivými snímači od průtoků se všemi čtyřmi snímači, kdežto právě v G15 jsou tyto odchylky minimální.

6 STANOVENÍ CITLIVOSTI VYHODNOCENÉHO PRŮTOKU NA NUMERICKÉ ZATLUMENÍ MĚŘENÝCH TLAKŮ

Jak již bylo výše zmíněno, tlakové snímače jsou přístupné pouze při pravidelných odstávkách vodní elektrárny přibližně jedenkrát ročně po dobu jednoho týdne. Není tedy často možné provést okamžitou výměnu či opravu poškozených snímačů. Pokud se zjistí porucha nějakého snímače, lze tento snímač při vyhodnocování průtoku metodou tlak-čas vynechat. Jaký vliv toto vynechání na vyhodnocený průtok má, bylo rozebíráno v kapitole 4.

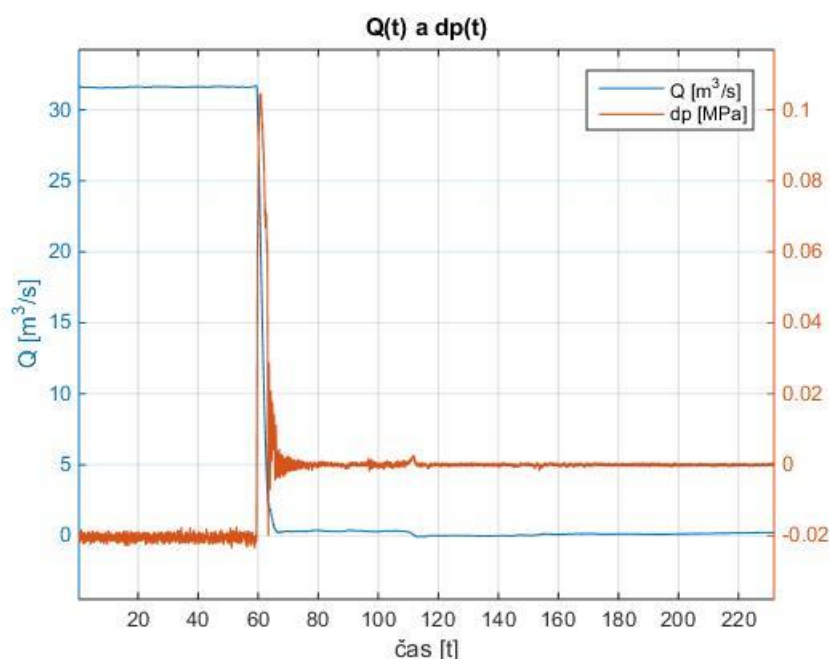
Vždy však není snadné zjistit chybné měření snímače případně vliv okolního šumu nebo jiné zkreslení naměřeného tlakového signálu. Potom do výsledného vyhodnocování průtoku vstupuje chyba, která ovlivňuje konečné výsledky. Tato kapitola se tedy bude zabývat tím, jak se změní vyhodnocený průtok v případě, že tlakové snímače zaznamenají kromě tlakového signálu také například okolní šum, frekvence elektrické sítě nebo cizí frekvence. Dalším nepříznivým vlivem může být časové zpoždění mezi horním a dolním měřeným tlakovým signálem, jejímž rozdílem se určuje celková tlaková diference.

Kapitola je tedy rozdělena do několika podkapitol, přičemž v každé je zkoumán vliv určitého zásahu do tlakového signálu na vyhodnocený průtok. Ve všech případech byl s upraveným tlakovým signálem znovu vyhodnocen průtok a porovnán s původním průtokem. Následně byla odchylka těchto průtoků vynesena do grafu v závislosti na daném zásahu do signálu. V některých případech bylo porovnáno i frekvenční spektrum pomocí Fourierovi transformace. Tentokrát byly veškeré výpočty provedeny v programu *Matlab*, což je program vhodný pro analýzu dat. Pro porovnávání byl vybrán soubor dat G13 z měření na VE Lipno I, tedy pro průtok $31,603 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.1 VYHODNOCENÍ PRŮTOKU V PROGRAMU *MATLAB*

Pro porovnávání vyhodnocených průtoků s původním a upraveným tlakovým signálem muselo být provedeno vyhodnocení průtoků metodou tlak-čas také v programu *Matlab*. Veškeré časové intervaly zůstaly stejné jako v případě vyhodnocování v *MS Excel*. Pokud si tedy situace nevyžadovala jinak, jako výsledný průtok (ustálená hodnota před začátkem zavírání rozvaděče) byla brána průměrná hodnota průtoků mezi 0–50 s. Jako podmínka pro určení počátečního průtoků Q_0 byl brán průměrný průtok mezi 120–145 s (průtok po dověření rozvaděče a kulového ventilu), který musel být menší než hodnota $1e-05$. Vyhodnocený průtok v programu *Matlab* je pak $31,6034 \text{ m}^3/\text{s}$, tedy naprosto identický jako při vyhodnocování v programu *MS Excel*. Chyba, s kterou byl určen, je $9,7133e-06 \text{ m}^3/\text{s}$.

Časový průběh vyhodnoceného průtoků (modrá křivka) a tlakové diference (červená křivka) je vyobrazen v následujícím grafu (viz Graf 6). Opět je zde vidět, že zavírání rozvaděče začalo kolem 60. s. a úplné dověření kulového ventilu kolem 112. s.



Graf 6 Časový průběh průtoků Q a tlakové diference dp vyhodnocený metodou tlak-čas v programu *Matlab*

6.2 FOURIEROVA TRANSFORMACE [19] [20]

Fourierova transformace (dále jen FT) je matematická metoda, která slouží k analýze časových signálů pomocí jejich převedení do frekvenční oblasti a k analýze frekvenčního spektra změřeného signálu. Frekvenční spektrum signálu je soubor frekvencí obsažených v původním signálu (množina frekvencí harmonických funkcí, na které lze změřený signál rozložit). Aby nedocházelo ke zkreslení Fourierova obrazu při FT originálu, musí být vzorkovací frekvence alespoň dvojnásobkem nejvyšší frekvence obsažené v signálu originálu (vzorkovací teorém). Metoda umožňuje provádět frekvenční filtraci, tedy odstraňovat ze signálu části s různými frekvencemi, což může například snížit úroveň šumu v signálu.

V případě počítačového zpracování nemáme spojitou funkci, ale jen její hodnoty v diskrétních vzorkovacích okamžicích. Z těchto důvodů se definuje diskrétní Fourierova transformace (DFT), která je již polynomem a jejími vstupy a výstupy jsou posloupnosti hodnot.

$$F\{f(t)\} = f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} \cdot dt, \quad (36)$$

kde $f(t)$ je původní signál, který je znám pouze pro časový interval T .

$$F\{f(t)\} = f(\omega) = \int_0^T f(t) \cdot e^{-i\omega t} \cdot dt \quad (37)$$

ω musí být volena jako celé periody, kde k je libovolné přirozené číslo:

$$\omega_k = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{k}{T}, \quad \text{kde } k = 1, 2, 3 \dots \quad (38)$$

Aby po DFT byl význam amplitudy, je nutno uvažovat:

$$F\{f(t)\} = f(\omega_k) = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot \frac{k}{T} \cdot t} \cdot dt \quad (39)$$

Analytické řešení existuje jen v omezeném počtu případů a je tedy nutno tento integrál řešit numericky (přechodem integrál \rightarrow sumace). N je počet vzorků a j je sčítací index:

$$F\{f(t)\} = f(\omega_k) = \frac{2}{T} \sum_{j=0}^{N-1} f(t_j) \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot \frac{k \cdot j}{N}} \cdot \Delta t, \quad \text{kde } T = N \cdot \Delta t \quad (40)$$

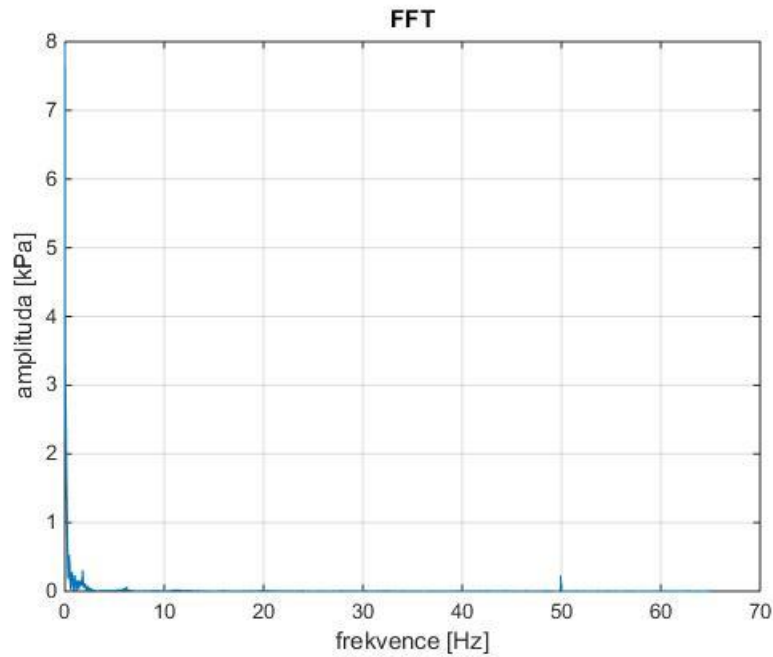
$$F\{f(t)\} = f(\omega_k) = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f(t_j) \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot \frac{k \cdot j}{N}} \quad (41)$$

Předpis pro zpětnou FT:

$$F^{-1}\{f(t)\} = f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(i\omega) \cdot e^{i\omega t} \cdot d\omega \quad (42)$$

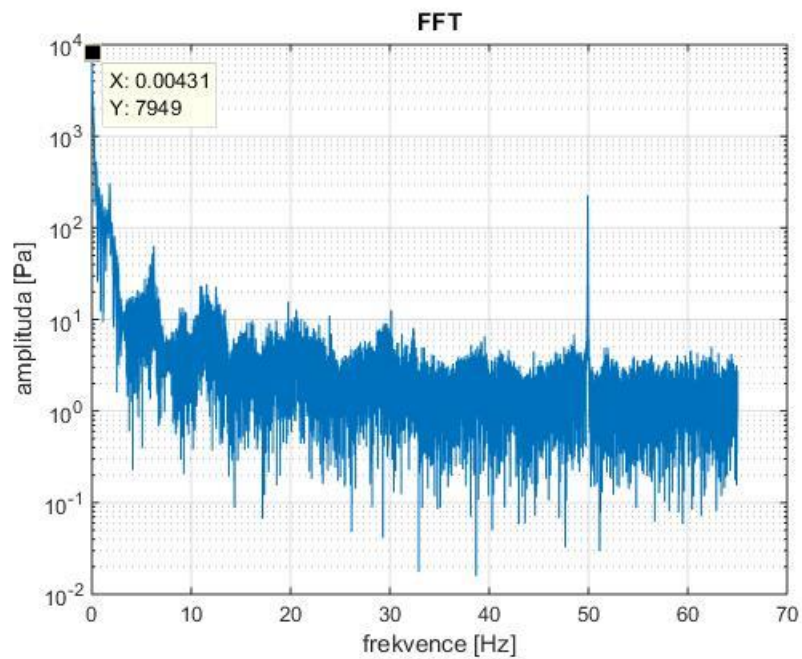
V *Matlabu* se k tomuto účelu používá funkce *IFFT*.

Při provádění FFT v programu *Matlab* byla statika již odečtena. Graf 7 zobrazuje frekvenční spektrum signálu. Vzorkovací frekvence zde byla 130 Hz.



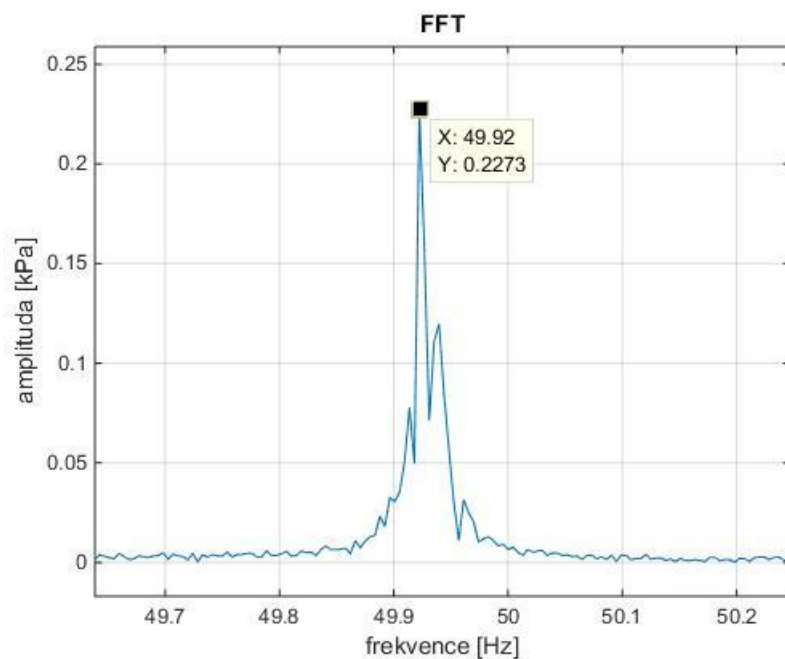
Graf 7 FFT

Graf 8 vyjadřuje stejné frekvenční spektrum jako předchozí graf, ale tentokrát je osa y, vyjadřující amplitudu v jednotkách kPa, v logaritmickém měřítku.



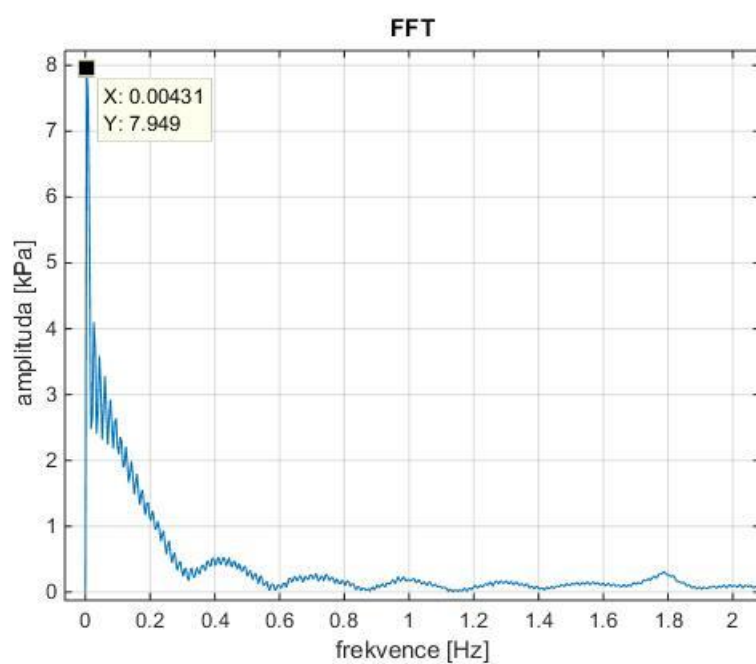
Graf 8 FFT s osou y v logaritmickém měřítku

Na dalším grafu (viz Graf 9) je detail FFT kolem 50 Hz, který zachycuje vliv frekvence elektrické sítě na tlakové snímače.



Graf 9 Detail FFT – frekvence elektrické sítě

Graf 10 zobrazuje průběh frekvenčního spektra signálu v oblasti nízkých frekvencí



Graf 10 Detail FFT kolem nízkých frekvencí

6.3 VYHLAZENÍ SIGNÁLU POMOCÍ KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU [21]

Klouzavý průměr (*moving average*) je statistická metoda, která umožňuje eliminovat krátkodobé výkyvy a naopak zvýrazňovat dlouhodobé trendy nebo cykly. Funguje jako nízkofrekvenční filtr. Posouzení krátkodobosti a dlouhodobosti záleží na různých parametrech, zejména na velikosti okna. Velikost okna odpovídá počtu prvků obsažených v podmnožině číselné řady. Zjednodušeně lze klouzavý průměr považovat za nástroj sloužící k vyhlazení zpracovávaného signálu a k částečnému zbavení náhodného šumu. Vyhlazovací účinek roste spolu s rostoucí délkou klouzavé části (podmnožiny). Při použití klouzavého průměru se však musí dávat pozor na to, aby nedošlo ke ztrátě reálné informace.

První element klouzavého průměru je získán tím, že se vezme průměr počáteční podmnožiny (klouzavé části) číselné řady. Potom je množina modifikována posunem dopředu, tj. vynechá se první číslo podmnožiny a naopak se zahrne první za ní následující. Daná podmnožina tedy po číselné řadě „klouže“ spolu s postupem času.

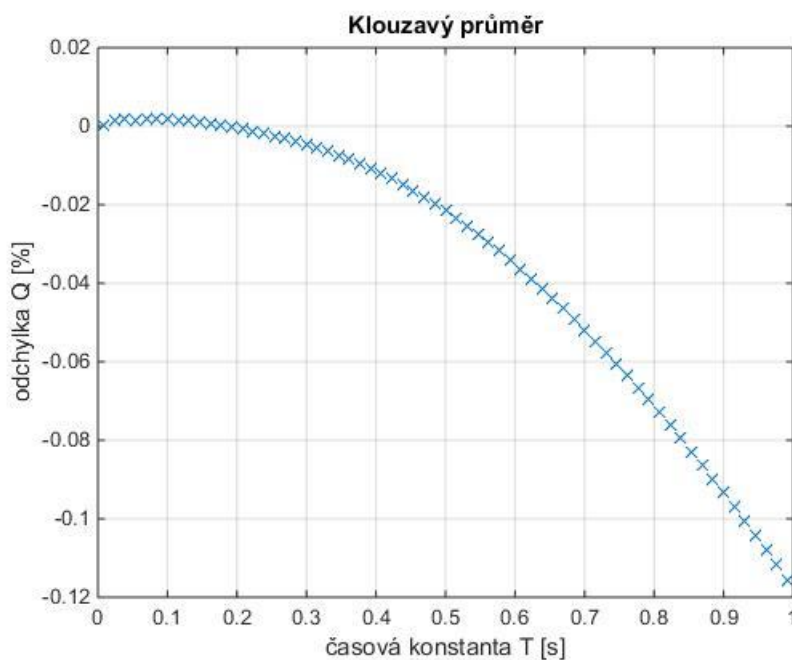
Klouzavému průměru v prostředí programu *Matlab* odpovídá funkce *SMOOTH*. Její předpis je ve tvaru $y = \text{smooth}(x, \text{span}, \text{method})$. Prvním parametrem x je původní signál určený k vyhlazení (vektor). Druhý parametr span odpovídá velikosti okna. Musí být lichý a celé číslo, nebo skalární hodnota v rozsahu (0;1) označující zlomek celkového počtu prvků obsažených v původním signálu x . Za method se dosazuje metoda. Výchozí metodou (parametr se vynechá) je právě klouzavý průměr. Tento proces je velmi podobný filtraci s dolní propustí (více v kapitole 6.6). Funkci *SMOOTH* popisuje rovnice (43):

$$y_s(i) = \frac{1}{2N+1} (y(i+N) + y(i+N-1) + \dots + y(i-N)) \quad (43)$$

$y_s(i)$ je vyhlazená hodnota pro i -tou hodnotu, N je počet sousedních hodnot v podmnožině čísel (span) na každou stranu od $y_s(i)$ a $2N+1$ je velikost okna neboli podmnožiny čísel.

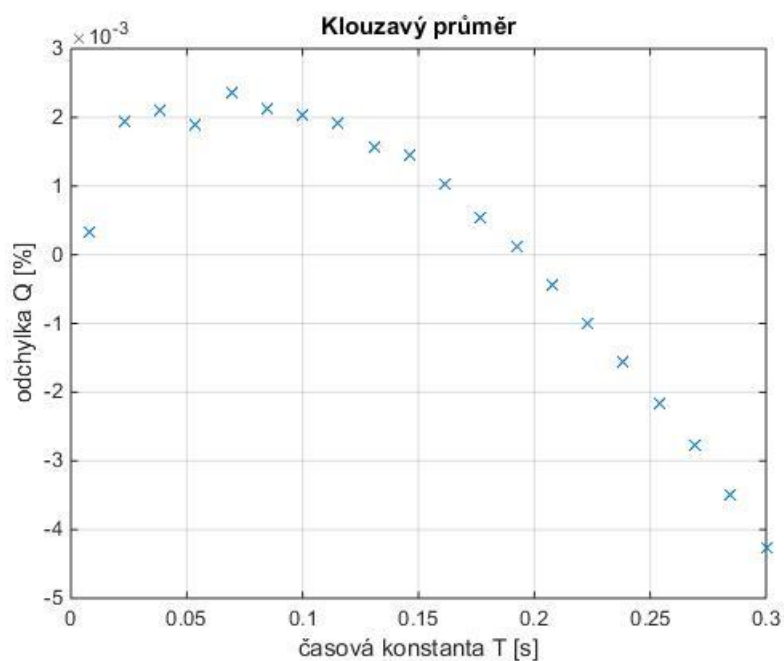
Jak již bylo uvedeno, intenzita vyhlazení signálu závisí na velikosti okna. Tuto velikost lze nadefinovat v čase. Naměřená data, na kterých byl posuzován vliv použití klouzavého průměru, mají vzorkovací frekvenci 130 Hz, tedy za 1 s bylo naměřeno 130 hodnot. Velikosti okna 130 tedy odpovídá časová konstanta $T = 1$ s. Odchylka Q [%], která vznikla porovnáním původního vyhodnoceného průtoku a nově vyhodnoceného průtoku s vyhlazeným tlakovým signálem, byla porovnávána v závislosti na této časové konstantě. Její závislost je vynesena do grafu (viz Graf 11). Časová konstanta byla volena od 1/130 po 1 s, po kroku 2/130.

Protože velikost okna nemůže být definována v krajních bodech tlakového signálu, nejsou jeho okrajové hodnoty vyhlazené. Proto byl původní a nově vyhodnocený průtok vyhodnocen z intervalu 0,5–50 s. Levá krajní hodnota tohoto intervalu byla tedy posunuta o 0,5 s, což odpovídá 65 hodnotám (polovina maximální velikosti okna, s kterou bylo vyhlazování prováděno).



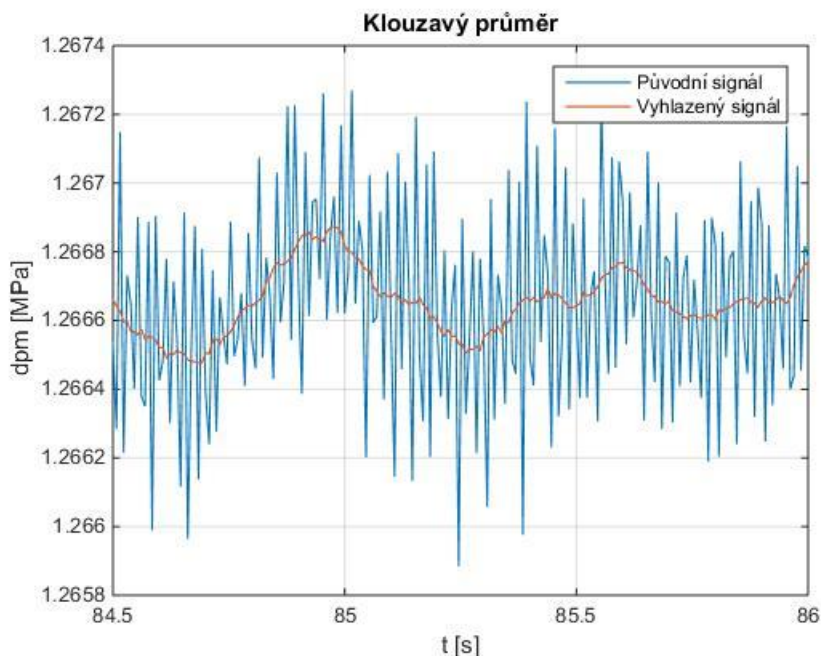
Graf 11 Závislost odchylny Q na časové konstantě T

Graf 12 zobrazuje detail předchozího grafu pro nízké hodnoty časové konstanty. Do hodnoty přibližně 0,07 s odchylna Q roste a je kladná. Od této hodnoty výše odchylna klesá a od hodnoty 0,18 s začne být záporná, neboli přepočítaný průtok je nižší než původní.



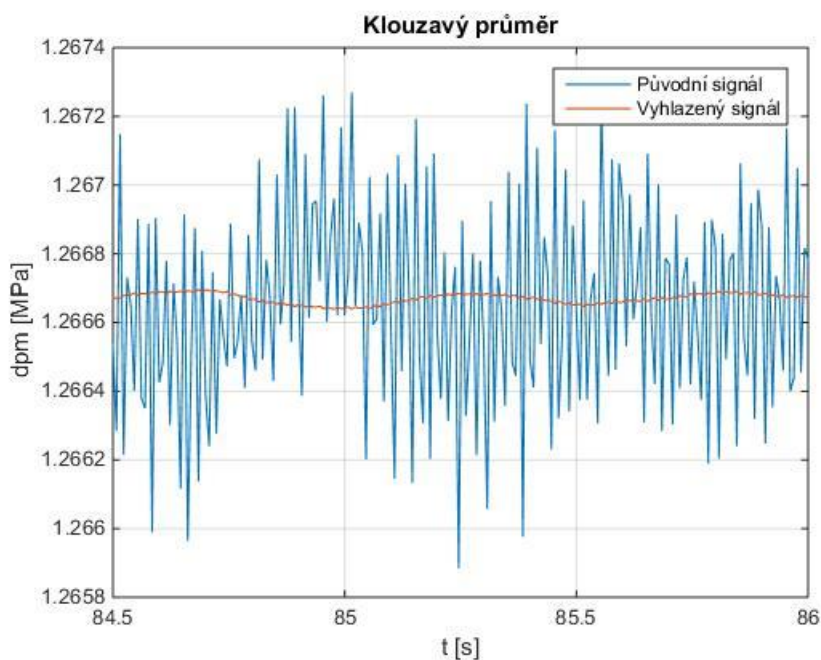
Graf 12 Detail závislosti odchylny Q na časové konstantě T

Následující dva grafy zobrazují detail porovnání původního (modrá křivka) a vyhlazeného (červená křivka) tlakového signálu pro stejný časový interval. Pro první případ (viz Graf 13) byla použita časová konstanta 0,1 s, ta odpovídá velikosti okna 13. Už tady došlo k odstranění krátkodobých výkyvů. Přepočítaný průtok je jen o 0,0017 % vyšší než původní.



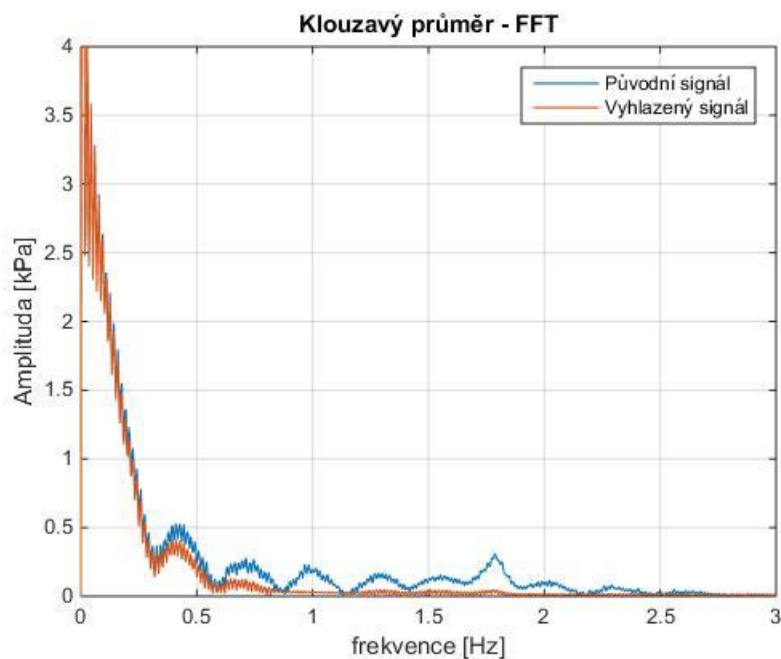
Graf 13 Porovnání tlakových signálů pro $T=0,1$ s, odchylka Q 0,0017 %

V dalším případě (viz Graf 14) byla použita časová konstanta 1 s, tedy velikost okna 129. Zpracováváný signál je již téměř vyhlazený. Přepočítaný průtok je o 0,1155 % nižší než původní. Nedošlo tedy k nechtěnému zkreslení signálu a tím i výrazné ztrátě důležitých informací.



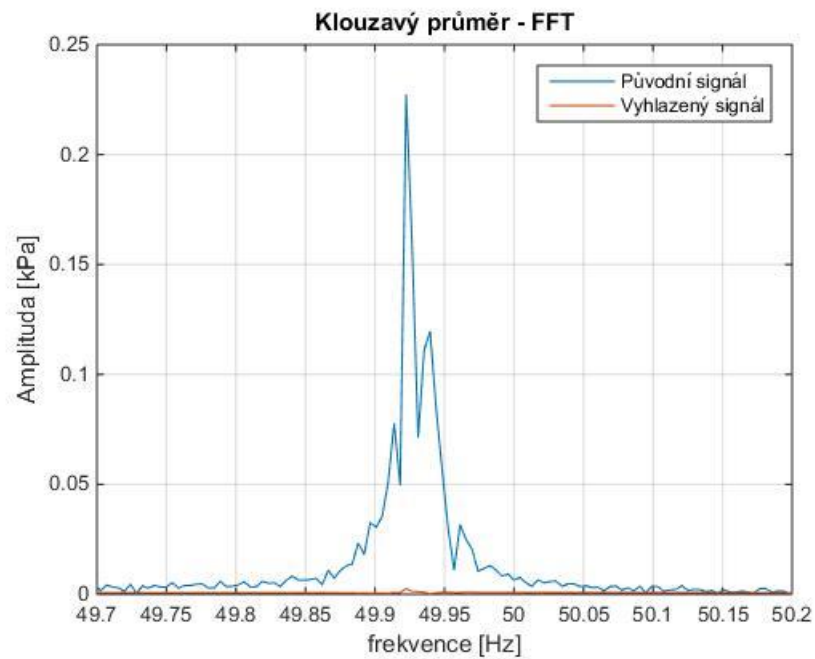
Graf 14 Porovnání tlakových signálů pro $T=1,0$ s, odchylka Q -0,1155 %

Graf 15 znázorňuje detail porovnání frekvenčního spektra tlakových signálů v oblasti nízkých frekvencí pro časovou konstantu 1 s. Z grafu je patrné, že došlo k úplnému utlumení některých frekvencí kmitání, případně se snížila jejich amplituda.



Graf 15 Porovnání FFT – detail v oblasti nízkých frekvencí ($T=1,0$ s)

Graf 16 zobrazuje opět porovnání FFT pro časovou konstantu 1 s a to detail potlačení vlivu frekvence elektrické sítě, který se projevil kolem 50 Hz.



Graf 16 Detail porovnání FFT – utlumení frekvence elektrické sítě ($T=1,0$ s)

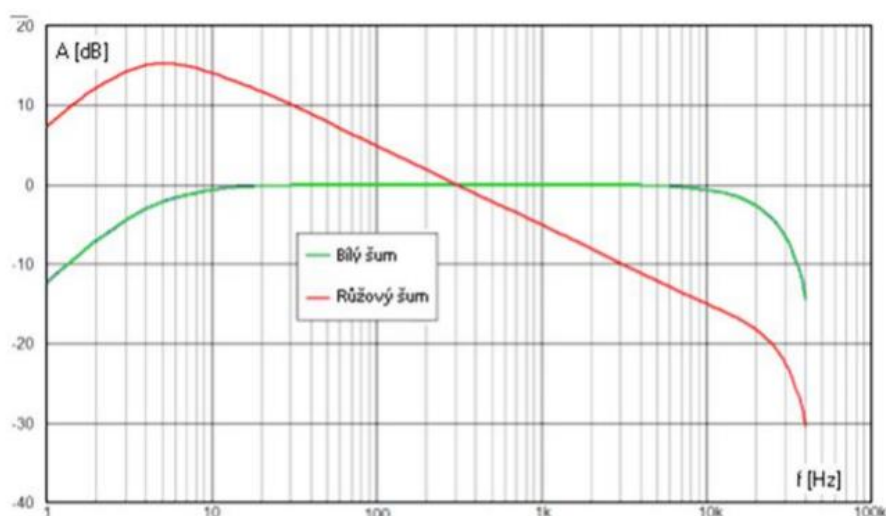
6.4 VLIV NÁHODNÉHO OKOLNÍHO ŠUMU [22]

Tato podkapitola je zaměřena na to, jaký vliv na vyhodnocení průtoku může mít změřený náhodný okolní šum. Aby tento vliv mohl být zkoumán, byl naměřený tlakový signál dpm uměle zašuměn.

K měřenému tlakovému signálu byla náhodně přičítána čísla z intervalu $(-0,5;0,5)$ vynásobeného určitou konstantou, protože naměřený tlakový signál je v řádek jednotek MPa a byla by jinak přičítána hodnota $\pm 0,5$ Mpa, tedy kolem 50 % naměřené hodnoty tlaků. Tato konstanta byla různě měněna, čímž se měnila hodnota přičítaného tlaku v kPa. Udává tak velikost amplitudy šumu. Odchylka vyhodnoceného průtoku s upraveným signálem je tedy v grafu (viz Graf 18) vynesena v závislosti na horní hranici rozsahu náhodně vygenerovaných čísel v jednotkách kPa, která byla k tlakovému signálu přičítána.

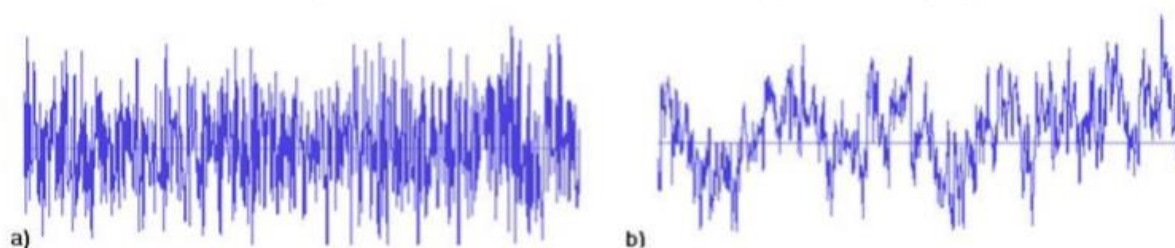
Přičítání náhodných čísel bylo prováděno v programu *Matlab* pomocí funkce *RAND*, která generuje náhodná čísla od 0 do 1. Aby byla tato čísla rovnoměrně přičítána do vyšších i nižších hodnot tlakového signálu, byla od nich vždy odečtena hodnota 0,5. Tím se dosáhlo, toho, že byla přičítána náhodná čísla z intervalu $(-0,5;0,5)$.

Takto vzniklý šum odpovídá bílému šumu. Pod pojmem bílý šum se rozumí takový signál, který obsahuje všechny frekvence ve stejné míře, tj. má ploché frekvenční spektrum. Podobně je vyvážené bílé světlo, které má lineárně frekvenčně vyvážené spektrum. Kdyby se takový signál rozložil na jednotlivé harmonické složky (což je přesně to, co provádí Fourierova transformace), budou mít všechny stejnou amplitudu. Ideální bílý šum samozřejmě neexistuje, protože by to znamenalo jej definovat pro nekonečné frekvenční pásmo. Proto se uvažuje bílý šum jen pro konkrétní kmitočtový rozsah, např. pro pásmo slyšitelnosti. Pro číselnou představu v pásmu 30 až 60 Hz má stejný výkon jako v pásmu od 300 do 330 Hz. Šum, který je vyvážený po oktávách, tedy logaritmicky, se nazývá růžový, protože obdobně vyvážené světlo má narůžovělou barvu. Uchu zní víc do basů, spíš jako hučení. Pro doplnění představy, v pásmu od 30 do 60 Hz má růžový šum stejný výkon jako v pásmu od 300 do 600 Hz, tím lépe vyhovuje lidskému sluchu, který má přibližně logaritmický průběh vnímání různých úrovní akustického tlaku - intenzity zvuku (viz Obr. 16).



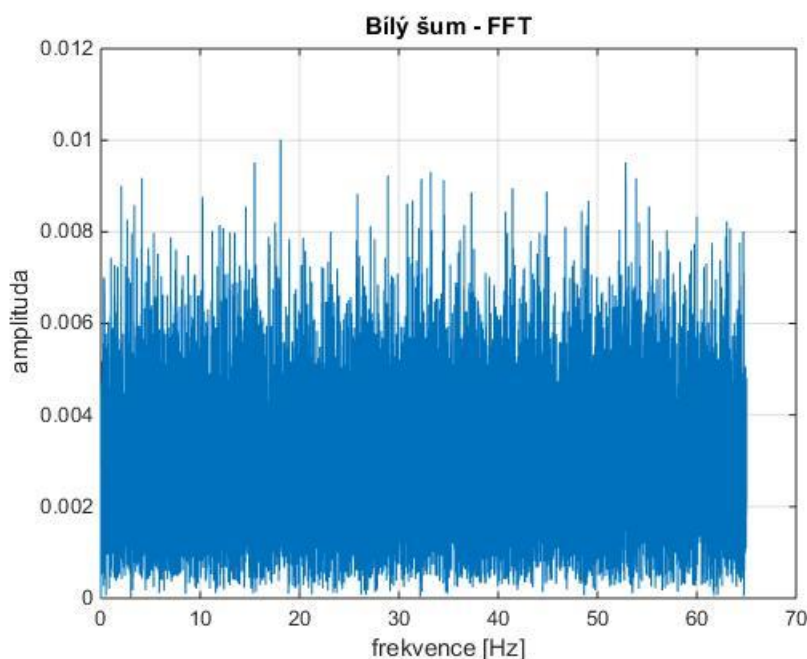
Obr. 16 Frekvenční char. bílého a růžového šumu ve slyšitelném fr. rozsahu [22]

Obr. 17 zobrazuje ukázkou časových průběhů a) bílého šumu a b) růžového šumu.



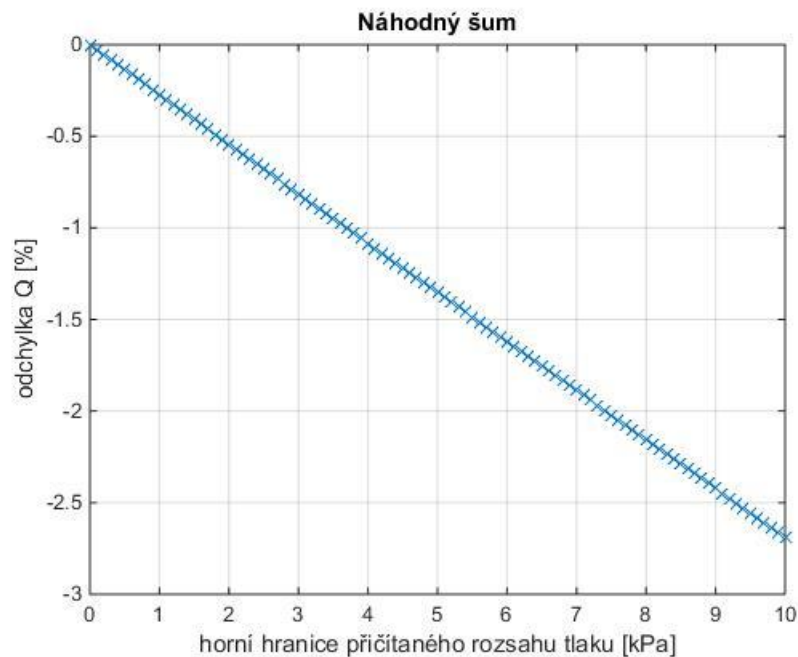
Obr. 17 Časový průběh šumu a) bílý šum b) růžový šum [22]

Na následujícím grafu (viz Graf 17) je zobrazeno frekvenční spektrum signálu s náhodně vygenerovanými čísly v intervalu $(-0,5;0,5)$, který svou délkou odpovídá původnímu tlakovému signálu. Toto spektrum odpovídá bílému šumu, tedy v následujících případech byl k tlakovému signálu vždy přičítán bílý šum.



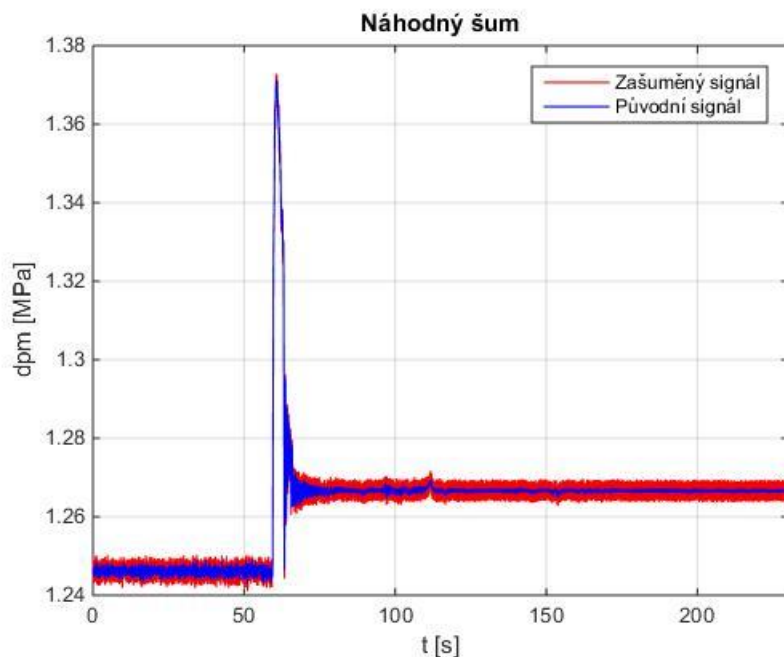
Graf 17 Frekvenční spektrum s čísly $(-0,5;0,5)$

Aby bylo porovnání vlivu různé velikosti přičítaného tlaku věrohodné, muselo se zajistit, aby byla generována vždy stejná náhodná čísla. To se zajistilo použitím příkazu `rng default`. Následně s tímto zašuměným tlakovým signálem byl znovu metodou tlak-čas vyhodnocen průtok a ten byl porovnán s původním průtokem. Závislost odchylky Q [%] na horní hranici rozsahu přičítaného tlaku [kPa] je vyobrazena v následujícím grafu (viz Graf 18). Tato závislost je téměř lineární a se zvyšujícím se rozsahem přičítaného tlaku průtok klesá, neboli absolutní odchylka průtoku roste.



Graf 18 Odchylka Q v závislosti na horní hranici přičítaného rozsahu tlaku

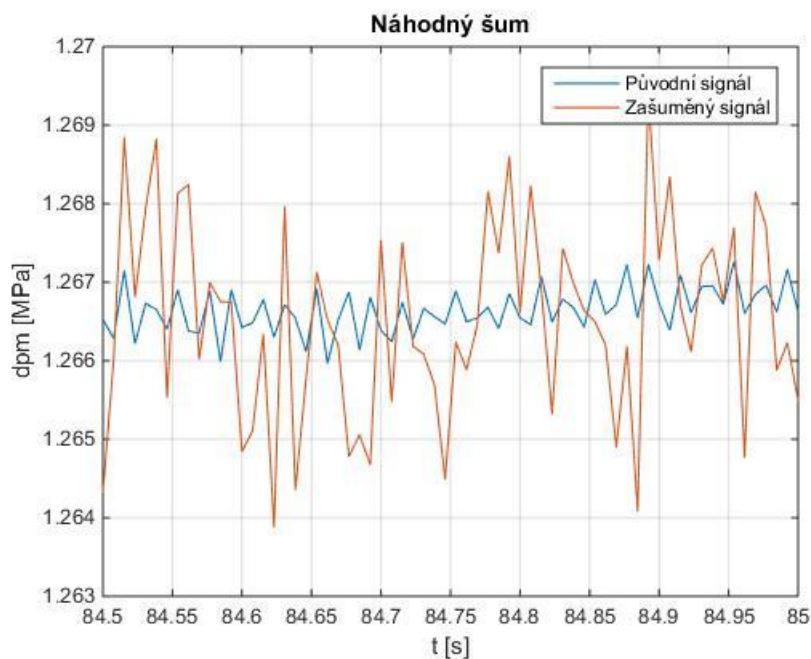
Graf 19 zobrazuje porovnání původního (modrá křivka) a zašuměného (červená křivka) tlakového signálu v závislosti na čase v případě, že byly náhodně přičítány hodnoty tlaku z rozsahu (-2,5;2,5) kPa. V tomto případě je vyhodnocený průtok se zašuměným signálem o 0,680 % nižší než původní průtok.



Graf 19 Porovnání tlakových signálů (2,5 kPa), odchylka $Q = -0,68 \%$

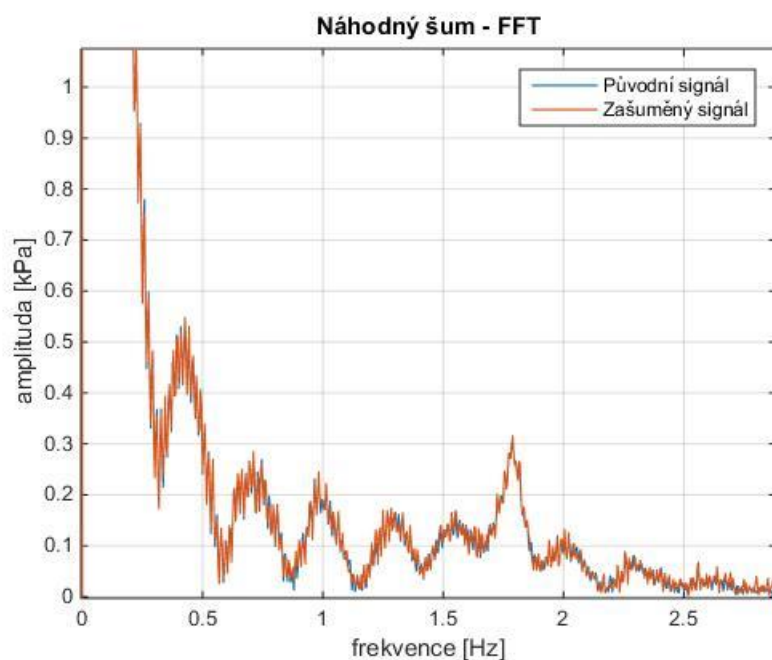
Detail tohoto zesílení mezi 84,5–85 s, tedy v době po dovržení rozvaděče, je zobrazen v grafu

(viz Graf 20). V tomto grafu lze vidět zesílení signálu o hodnotu až $\pm 2,5$ kPa. Také je zde patrné, že zašuměný signál vznikl náhodným přičítáním tlaku v zadaném rozsahu hodnot.



Graf 20 Detail porovnání tlakových signálů (2,5 kPa), odchylka $Q = -0,68$ %

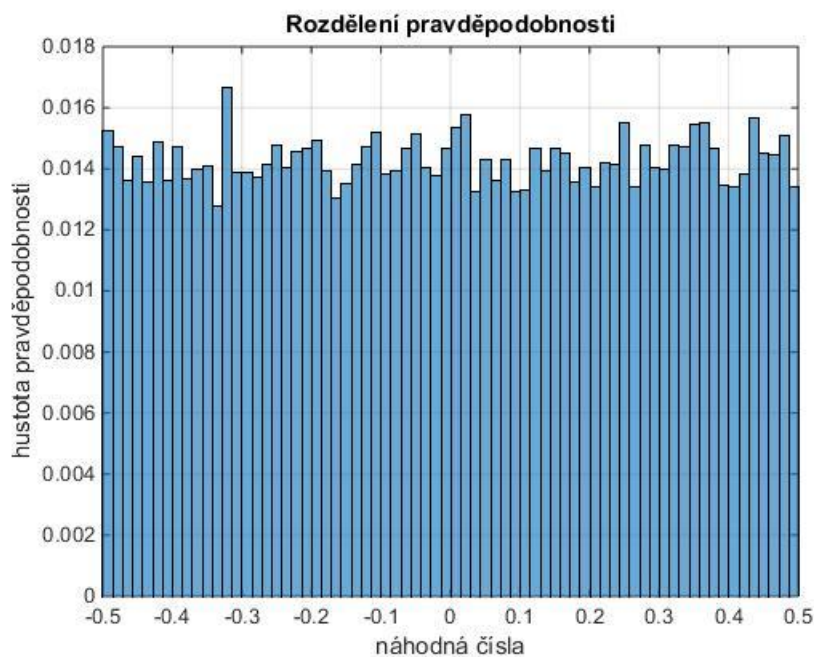
Následující graf (viz Graf 21) zobrazuje pro předchozí příklad porovnání původního (modrá křivka) a zašuměného (červená křivka) signálu po FFT v oblasti nízkých frekvencí. Po přičtení náhodných hodnot tlaků z intervalu $(-2,5; 2,5)$ kPa nedošlo k žádným významným změnám frekvenčního spektra.



Graf 21 Porovnání FFT (2,5 kPa)

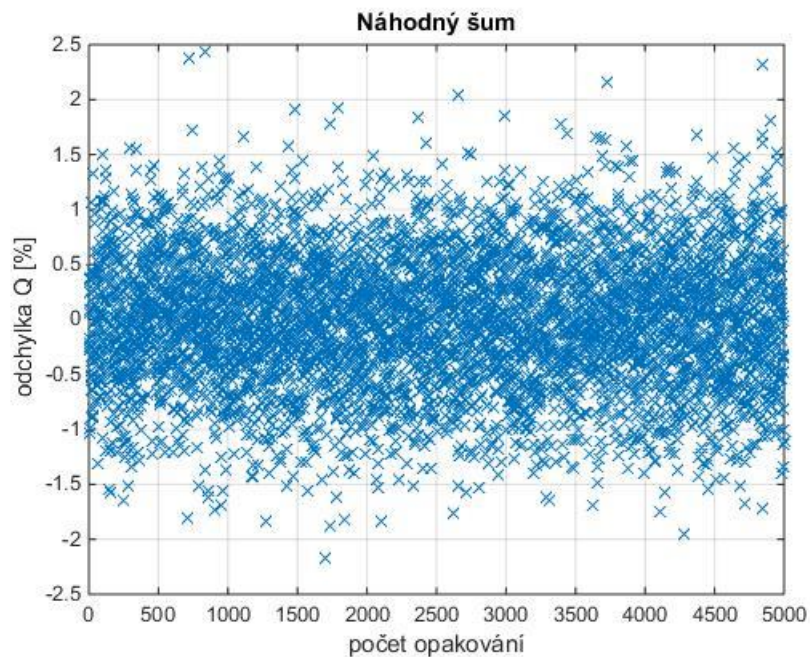
V předchozí části této podkapitoly bylo zkoumáno, jaký vliv na vyhodnocený průtok má velikost náhodného šumu. Další část podkapitoly se zabývá tím, jaký vliv na vyhodnocený průtok má různý náhodný šum, tedy tentokrát pro porovnávání nebyla používána stále stejná náhodná čísla, ale pro každé zašumění tlakového signálu se nechala vygenerovat zcela nová (*Matlab*: zrušení příkazu *rng default*). Zůstal zachován pouze interval jejich velikosti.

Rozdělení pravděpodobnosti náhodně vygenerovaných čísel (v *Matlabu* pomocí příkazu *rand*) v požadovaném intervalu má oblélníkový tvar, neboli čísla jsou rovnoměrně rozložená. Příklad tohoto rozdělení je v následujícím grafu (viz Graf 22). Počet čísel je 30161, což odpovídá velikosti vektoru s naměřeným tlakovým signálem.



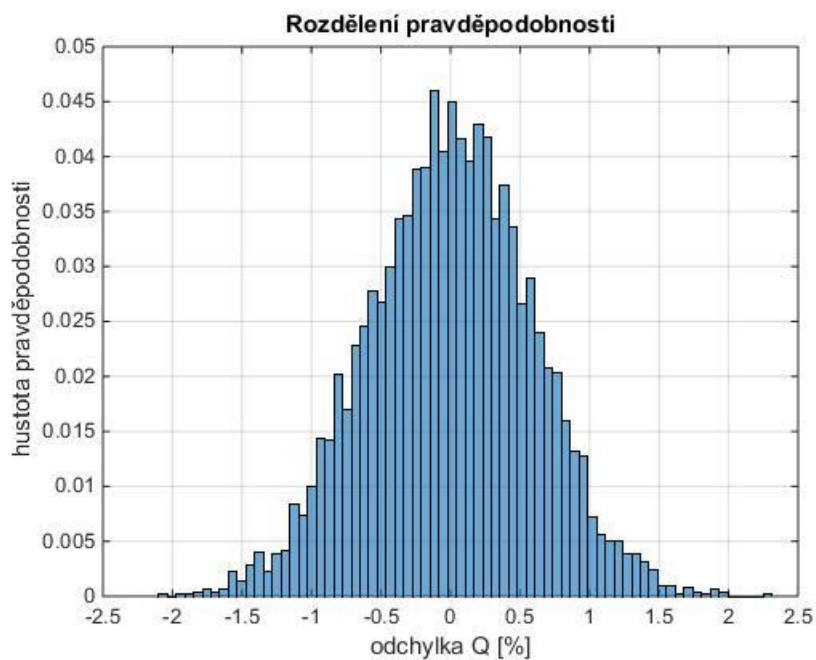
Graf 22 Rozdělení pravděpodobnosti náhodných čísel

Pro porovnání vlivu náhodně vygenerovaných čísel byly vždy přičítány hodnoty tlaku z intervalu $(-2,5; 2,5)$ kPa. Pro tento rozsah tlaků byl proces porovnávání průtoku opakován několikrát po sobě, ale jak již bylo výše zmíněno, tentokrát se vždy nechala vygenerovat nová náhodná čísla. Při každém opakování byl tedy k původnímu tlakovému signálu přičítán nový šum, který měl stejnou pouze velikost maximální a minimální hodnoty. Následující graf (viz Graf 23) zobrazuje odchylku Q [%] určenou stejným způsobem jako v předchozích případech. Osa x vyjadřuje počet opakování. Z grafu se dá usoudit, že vliv takového šumu je čistě náhodný, ale větším počtem opakování bylo zjištěno, že odchylka Q by neměla přesáhnout více než $\pm 2,5$ %, tedy pro daný rozsah přičítaných tlaků se drží v určitém intervalu.



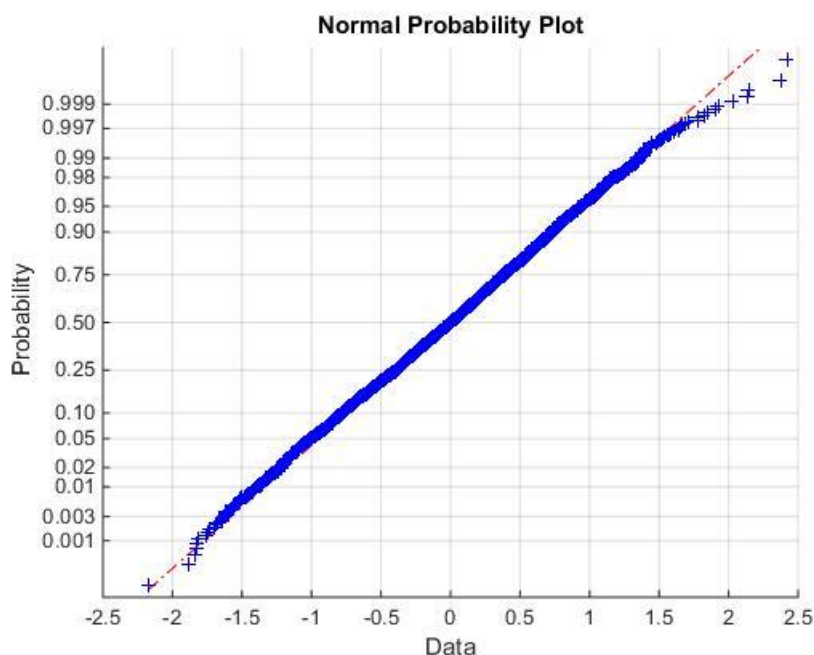
Graf 23 Odchylka Q – přičítání různých náhodných čísel při každém novém opakování (2,5 kPa)

Rozdělení pravděpodobnosti odchylky Q je pro tento případ vyneseno v následujícím grafu (viz Graf 24). Rozdělení se blíží normálnímu rozdělení neboli Gaussovu rozdělení pravděpodobnosti.



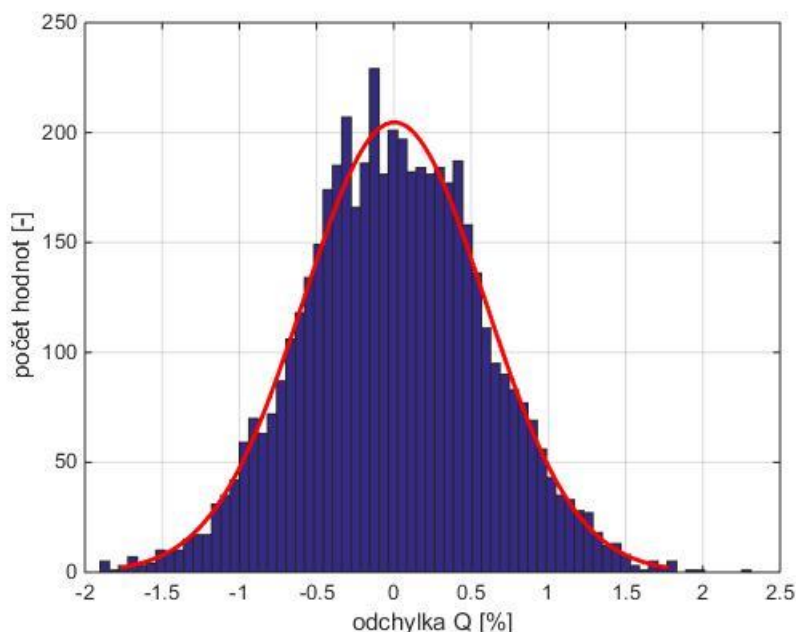
Graf 24 Rozdělení pravděpodobnosti odchylky Q

Toto tvrzení bylo ověřeno pomocí speciální *matlabovské* funkce *normplot*. Tato funkce vytváří normální pravděpodobnostní graf porovnávající distribuci dat v ose x k normálnímu rozdělení. Plná referenční čára představuje spojení prvního ($p=0,25$, tedy 25 %) a třetího ($p=0,75$, tedy 75 %) kvartilu dat. To znamená pravděpodobnost, s jakou se dané číslo vyskytne v daném intervalu. Čárkovaná referenční čára prodlužuje plnou čáru do konce dat. Pokud mají porovnávaná data normální rozdělení, pak se datové body zobrazí podél referenční čáry. Výsledek aplikace této funkce na odchylku Q je zobrazena v následujícím grafu (viz Graf 25).



Graf 25 Ověření normálního rozdělení (m. funkce *normplot*)

Dále bylo toto tvrzení možné ověřit vykreslením histogramu spolu s distribuční funkcí normálního rozdělení pomocí *matlabovské* funkce *HISTFIT*. Distribuční funkce vyjadřuje pravděpodobnost, že náhodná funkce nabude hodnoty menší než nebo rovné x . Je tedy vždy přiřazena ke konkrétní hodnotě náhodné veličiny. Argumenty funkce *HISTFIT* jsou vstupní data, počet sloupců a zvolený typ distribuční funkce, v tomto případě normálního rozdělení. Výsledek je vykreslen v následujícím grafu (viz Graf 26). Křivka distribuční funkce normálního rozdělení přibližně kopíruje histogram.



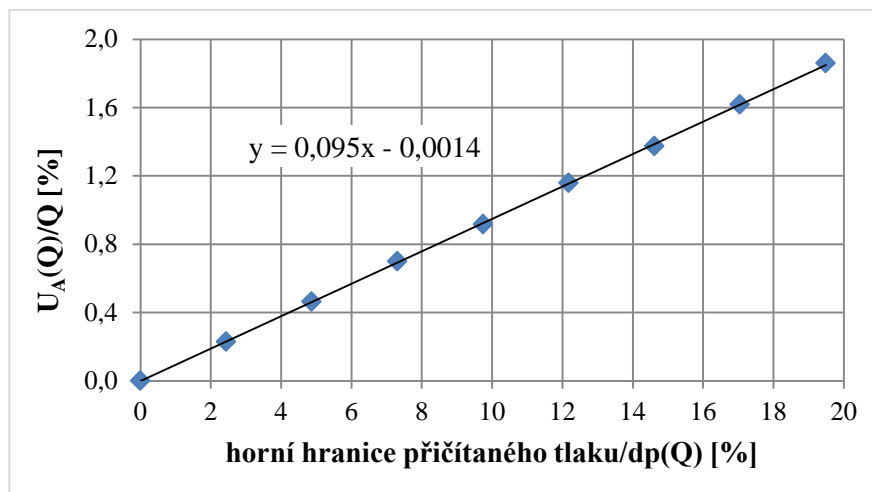
Graf 26 Histogram s distribuční funkcí

Následně byla určena nejistota typu A pro odchylku průtoků. Ta v tomto případě odpovídá přímo směrodatné odchylce, protože k dispozici je jen jedno jediné měření, které je dále upravováno. Spolehlivost byla zvolena 95 %. Počet hodnot n odpovídá počtu opakování, tedy 5000. Potom kvantil studentova rozdělení odpovídá hodnotě 1,96. Výsledky rozšířené nejistoty typu A odchylky průtoků jsou uvedeny v následující tabulce v závislosti na horní hranici rozsahu přičítaného tlaku (viz Tab. 5).

Tab. 5 Rozšířená nejistota typu A odchylky Q pro zašuměný signál

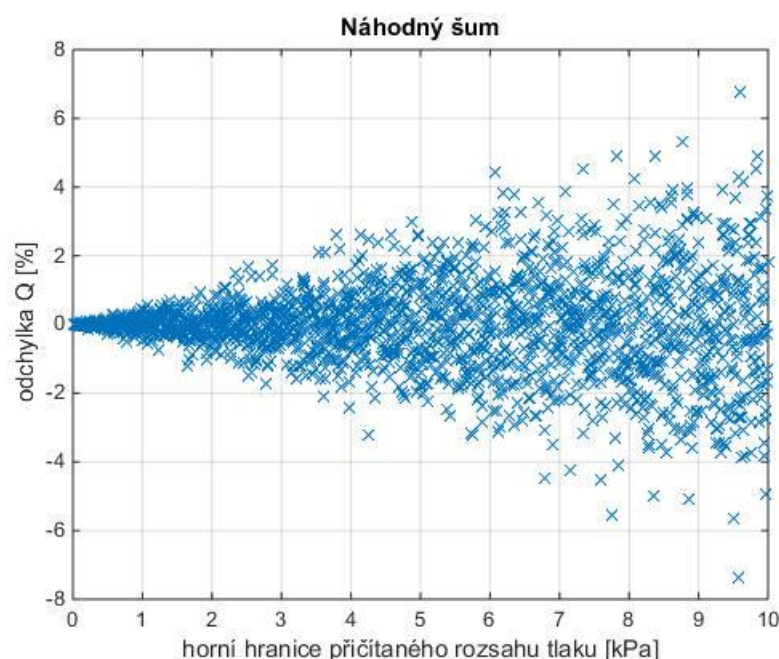
| H. h. rozsahu přičítaného tlaku [kPa] | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Směrodatná odchylka = $u_A(Q)$ [m^3/s] | 0,04 | 0,07 | 0,11 | 0,15 | 0,19 | 0,22 | 0,26 | 0,30 |
| $U_A(Q)$ [m^3/s] | 0,07 | 0,15 | 0,22 | 0,29 | 0,37 | 0,43 | 0,51 | 0,59 |
| $U_A(Q)/Q$ [%] | 0,23 | 0,46 | 0,70 | 0,92 | 1,16 | 1,37 | 1,62 | 1,86 |

Rozšířená nejistota typu A odchylky Q má na maximální hodnotě tlakového šumu lineární závislost (viz Graf 27). Osa x vyjadřuje podíl hodnoty horní hranice rozsahu přičítaného tlaku a tlakové diference před a po uzavření rozvaděče (20,52 kPa). Osa y vyjadřuje podíl rozšířené nejistoty typu A odchylky Q a celkového vyhodnoceného průtoku s nezašuměným signálem ($31,6034 \text{ m}^3/\text{s}$).



Graf 27 Rozšířená nejistota typu A odchylky Q se zašuměným signálem

Nakonec byl proveden stejný cyklus výpočtů, jaký byl proveden při vyhodnocování závislosti odchylky Q [%] na horní hranici intervalu přičítaného tlaku [kPa] (viz Graf 18), ale tentokrát se pro každou hodnotu tlaku nechala opět vygenerovat nová náhodná čísla, tak jak je uvedeno v předchozím případě. Tato závislost je vykreslena v následujícím grafu (viz Graf 28). Zde již neplatí, že vyhodnocený průtok se zašuměným tlakovým signálem je vždy nižší než původní, ale může být i vyšší a to zcela náhodně. Při bližším zkoumání a větším počtu opakování tohoto vyhodnocení je však možné usoudit, že pro každou horní hranici rozsahu přičítaného tlaku existuje určitý interval, do kterého odchylka Q padne.



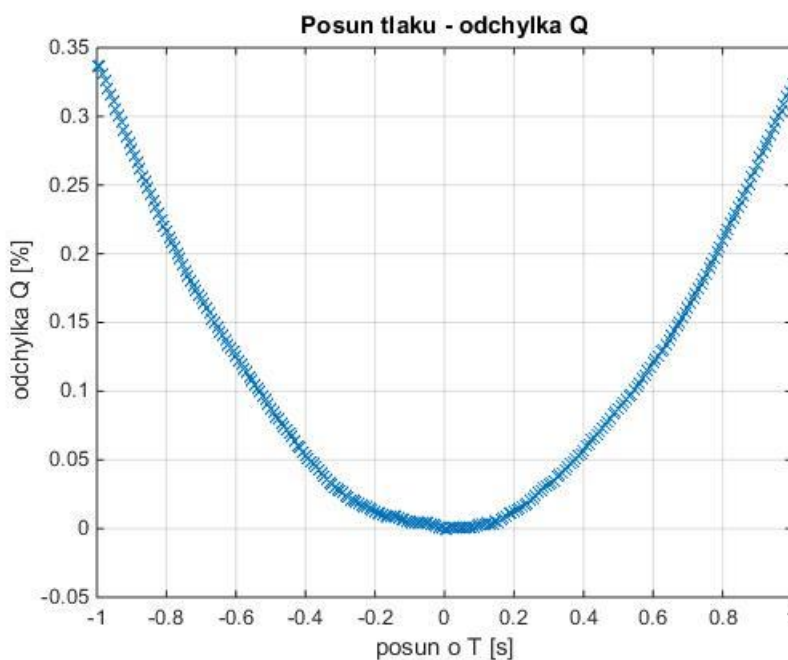
Graf 28 Odchylka Q v závislosti na horní hranici přičítaného rozsahu tlaku (vždy vygenerována nová náhodná čísla)

6.5 ZPOŽDĚNÍ TLAKOVÉHO SIGNÁLU

V případě, že tlakový signál v horním a dolním měřeném průřezu přivaděče není možné měřit na jednom počítači současně, ale tlak v každém průřezu je měřen zvlášť, může se vyskytnout problém s jejich synchronizací a potom vzniká mezi tlakovými signály časové zpoždění. Pokud na vodní elektrárně, kde se měří metodou tlak-čas průtok, není přístup k datové síti, může toto zpoždění dosáhnout až 1 s. Při možném napojení na datovou síť se odhaduje, že se toto zpoždění vejde do 0,1 s. V této podkapitole je tedy zkoumán vliv zpoždění horního i dolního tlakového signálu na vyhodnocený průtok.

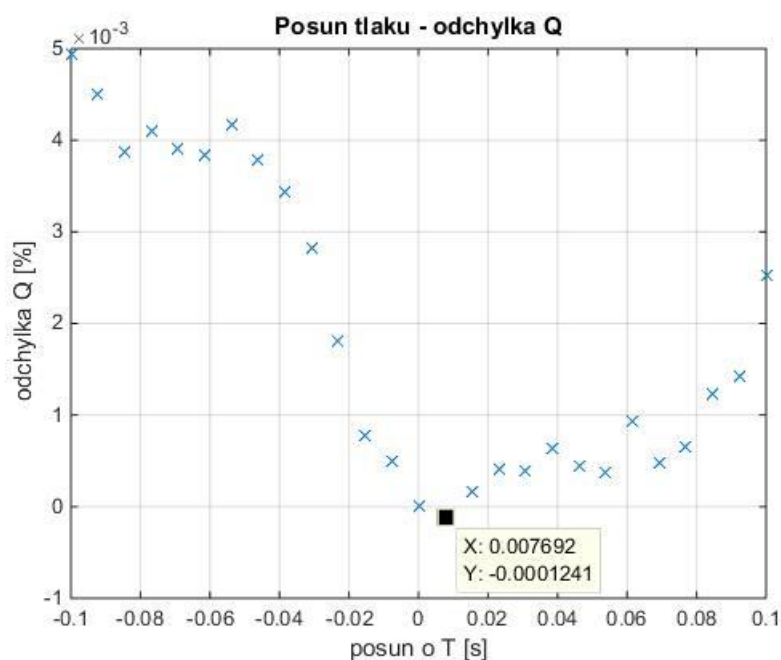
Bylo posouváno pouze s horním tlakovým signálem (p1G), dolní tlakový signál (p2G) zůstal pevně daný. Horní signál byl posouván o časovou konstantu T , která byla měněna od -1 do 1 s. Tak bylo uměle vytvářeno zpoždění mezi těmito signály. Následně byla vždy s navzájem posunutými tlaky určena tlaková diference a poté byl metodou tlak-čas opět vyhodnocen průtok. Ten byl porovnán s původním průtokem a odchylka těchto průtoků byla vynesena do grafu v závislosti na časové konstantě T , o kterou se horní tlakový signál posouval. Při porovnání FFT původního a posunutého tlakového signálu nebyla zaznamenána žádná významná změna ani zesílení amplitudy či posunutí frekvencí.

Dolní tlakový signál byl na každé straně oříznut o 1 s, tedy o maximální hodnotu posunutí, aby mohlo být posouváno s horním tlakovým signálem. Časové intervaly pro vyhodnocení průtoků a pro určení tlakové diference tedy byly také posunuty, a to o 1 s. Časový interval 0–50 s byl změněn na 0–49 s a časový interval 120–145 s byl změněn na 119–144 s. Upravením těchto časových intervalů se tak změnil výsledný průtok vyhodnocený z původního tlakového signálu a to na hodnotu 31,6017 m³/s, což je o 0,0054 % méně než původní. Graf 29 zobrazuje odchylku Q [%] v závislosti na časové konstantě T [s].



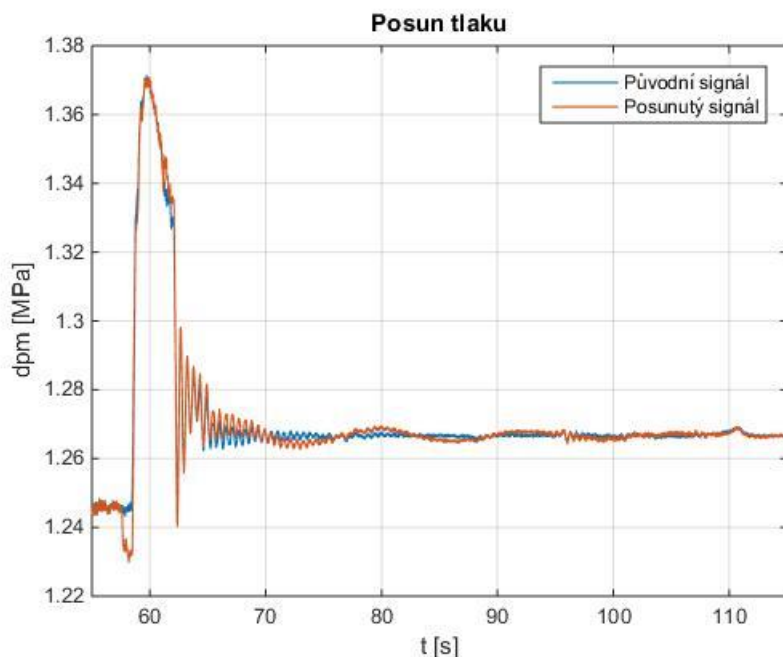
Graf 29 Odchylka Q v závislosti na časové konstantě T , o kterou byl horní tlakový signál posouván

Z tohoto grafu vyplývá, že závislost odchylky Q na kladné a záporné hodnotě časové konstanty T , o kterou byl horní tlakový signál posouván, je přibližně symetrická. Čím vyšší je hodnota časové konstanty, tím je odchylka Q větší. Vyhodnocený průtok s posunutým tlakovým signálem vyjde vždy větší. Výjimku tvoří posunutí horního tlakového signálu o hodnotu $1/130$, kdy vyjde vyhodnocený průtok menší než původní, jak je vidět v detailu tohoto grafu (viz Graf 30). Tato hodnota tedy znamená minimum dané závislosti.



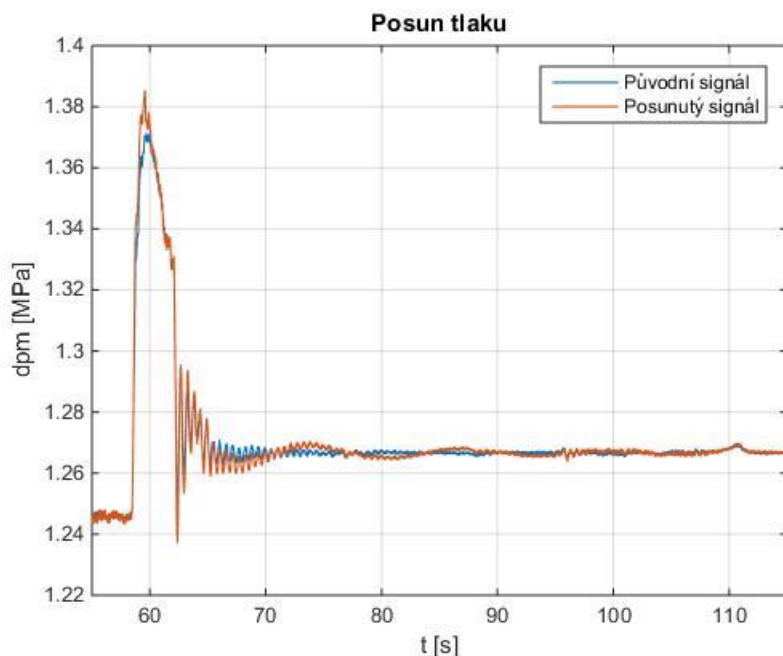
Graf 30 Detail závislosti odchylky Q na časové konstantě T

Graf 31 zobrazuje porovnání původního (modrá křivka) a posunutého (červená křivka) tlakového signálu v závislosti na čase při posunutí horního tlakového signálu o $T=1$ s. Z grafu je patrné, že posunutý tlakový signál má tendenci se rozkmitat. Odchylka Q takto posunutého tlakového signálu je 0,3234 %.



Graf 31 Porovnání tlakových signálů při posunu $p1G$ o $T=1,0$ s, odchylka $Q=0,3234$ %

Graf 32 zobrazuje stejný případ, jen došlo k posunutí $p1G$ o časovou konstantu $T=-1$ s, tedy tlakový signál byl posunut o stejnou hodnotu jako v předchozím případě, pouze na opačnou stranu. Upravený tlakový signál se opět rozkmital, ale tentokrát s opačnou amplitudou. Odchylka Q takto posunutého tlakového signálu je $0,3365$ %.



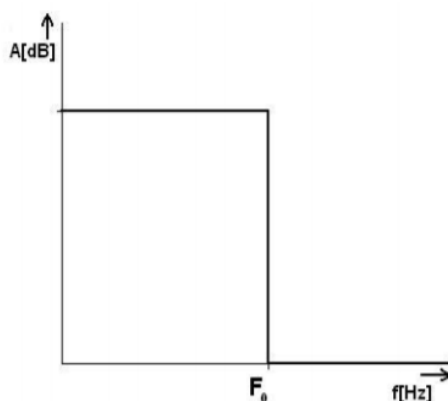
Graf 32 Porovnání tlakových signálů při posunu $p1G$ o $T=-1,0$ s, odchylka $Q=0,3365$ %

6.6 ODSTRANĚNÍ ČÁSTI FREKVENČNÍHO PÁSMO [23]

Filtrací se označují takové operace, které vedou k oddělení užitečné a rušivé složky nebo také ke zvýraznění důležitých složek časových řad, jež jsou předmětem zpracování analýzy. Termín filtrace sám o sobě upozorňuje na fakt, že cílem je určité složky propustit či zesílit a zároveň utlumit ty ostatní. Mění se tak požadovaným způsobem frekvenční složení zpracovaných časových řad. Tlumení nežádoucích harmonických složek časových řad však nelze provádět zcela libovolně. Pro tyto operace existují určitá omezení, protože jednak mohou způsobovat podstatné oscilace v přenosové funkci filtru a dále mohou být příčinou nežádoucích přechodových dějů v časové doméně.

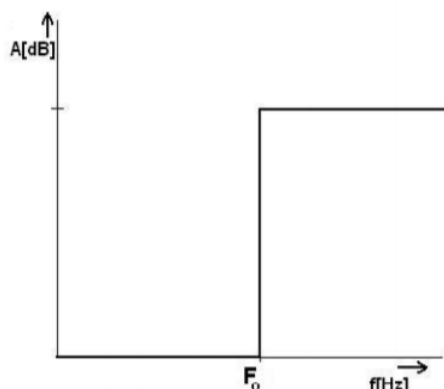
Obvykle se používají následující typy filtrů:

1. Dolní propust (Lowpass LPF) – jejím účelem je zbavit časové řady rušivých složek vysokých frekvencí a ponechat beze změny nízkofrekvenční složky. Propouští pouze složky signálu s kmitočty menšími než mezní kmitočet F_0 (viz Obr. 18).



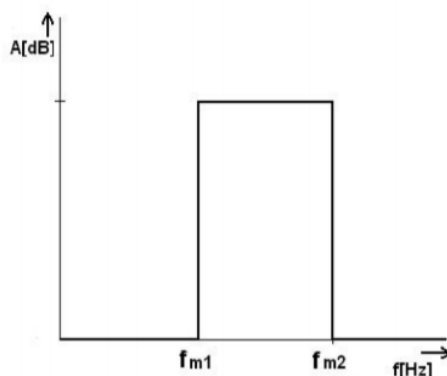
Obr. 18 Ideální filtr typu dolní propust [24]

2. Horní propust (Highpass HPF) – ta se využívá v případě, pokud rušivé složky časových řad vykazují nižší frekvence než složky užitečné (viz Obr. 19).



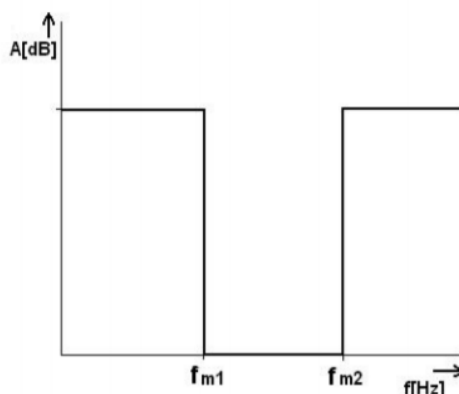
Obr. 19 Ideální filtr typu horní propust [24]

3. Pásmová propust (Bandpass BPF) – propouští frekvence z určitého frekvenčního pásma, například pokud v tomto pásmu leží užitečné složky časové řady (viz Obr. 20).



Obr. 20 Ideální filtr typu pásmová propust [24]

4. Pásmová zádrž (Bandstop BSF) – slouží k odstranění úzkopásmového rušení (viz Obr. 21).

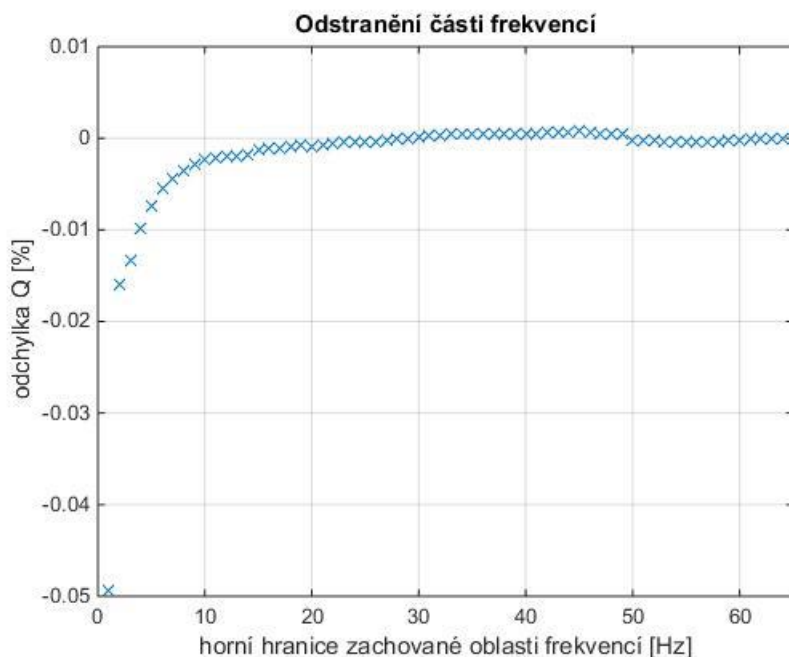


Obr. 21 Ideální filtry typu pásmová zádrž [24]

5. Notch filter – odstraňuje specifickou frekvenci.

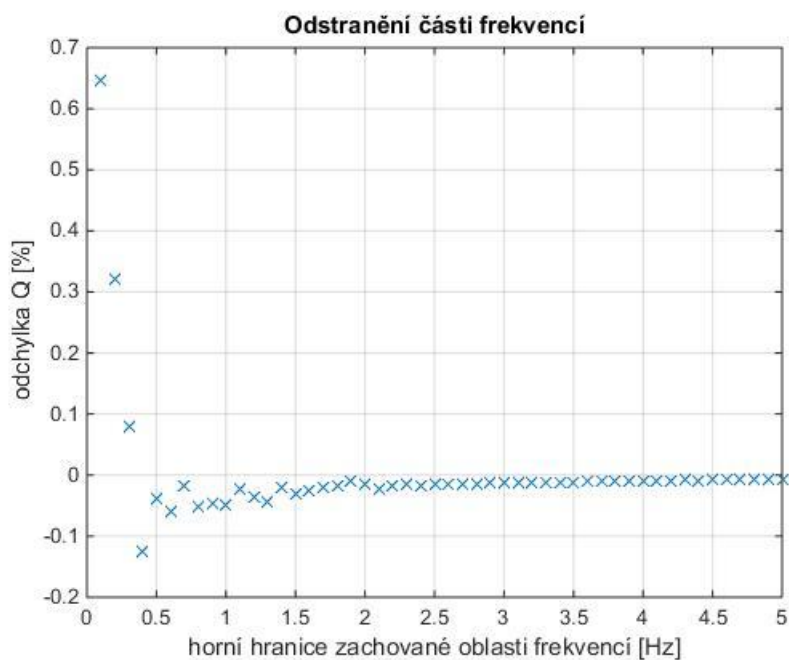
Zde byl použit filtr typu dolní propust, tedy byla odstraňována část vyšších frekvencí. V praxi se za tímto účelem běžně používají různé namodelované filtry, ale v tomto případě bylo pro zjednodušení využito následujícího postupu. Z FFT byla vždy odstraněna část frekvenčního pásma a to od zvolené hodnoty po maximální frekvenci, v tomto případě po 65 Hz. Odstranění bylo provedeno tak, že po FFT se zvolená část frekvencí položila rovna nule, poté se provedla zpětná FFT a s takto upraveným tlakovým signálem se znovu vyhodnotil průtok. Ten se porovnal s vyhodnoceným průtokem určeného s původním tlakovým signálem a jejich odchylka byla vynesena do grafu v závislosti na horní hranici ponechaných frekvencí.

Tato závislost je vykreslena v grafu (viz Graf 33), kde byly postupně odstraňovány všechny frekvence od 1 do 65 Hz s krokem 1 Hz. Není možné začít od nuly, protože pak by z tlakového signálu byly odstraněny veškeré informace potřebné pro vyhodnocení průtoku. Při odstranění vyšších frekvencí než 20 Hz se absolutní odchylka Q pohybuje ve velmi nízkých hodnotách, konkrétně do 0,001 %. V průběhu grafu nastal mírný skok kolem 49 Hz, což odpovídá frekvenci elektrické sítě. Pro hodnotu 65 Hz je odchylka Q nulová, protože z původního signálu nebyla odstraněna žádná frekvence.



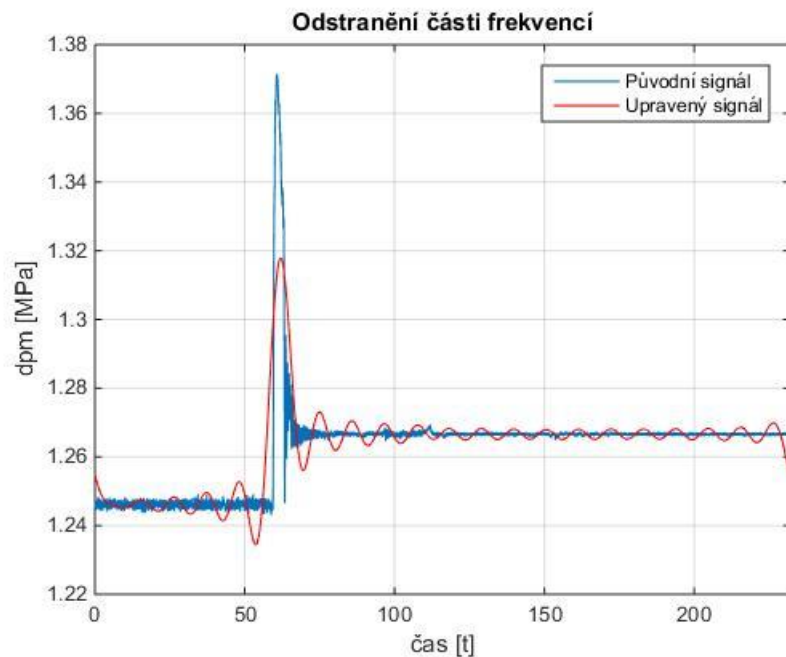
Graf 33 Odchylka Q v závislosti na horní hranici zachované oblasti frekvencí

Detail tohoto grafu v oblasti nízkých frekvencí je vykreslen následovně (viz Graf 34). Zde je závislost odchylky Q vykreslena od 0,1 do 5 Hz po kroku 0,1 Hz. Odstraní-li se všechny frekvence nad hodnotu 0,5 Hz a níže, absolutní hodnota odchylky Q začne prudce narůstat.



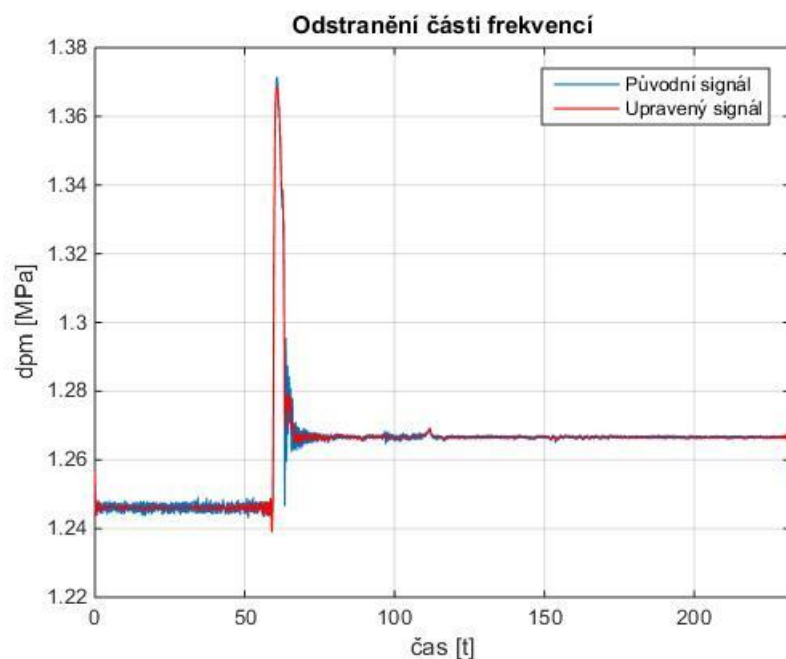
Graf 34 Detail závislosti odchylky Q na horní hranici zachované oblasti fr .

Graf 35 zobrazuje porovnání původního (modrá křivka) a upraveného (červená křivka) tlakového signálu po odstranění všech frekvencí nad hodnotu 0,1 Hz. Upravený tlakový signál je již zkreslený a v krajních bodech signálu se hodnoty tlaků značně vychylují. Také zde došlo k výraznému utlumení nárůstu tlaku způsobeného vodním rázem vyvolaným zavíráním rozvaděče. Vyhodnocený průtok s takto upraveným tlakovým signálem je o 0,6466 % větší než původní.



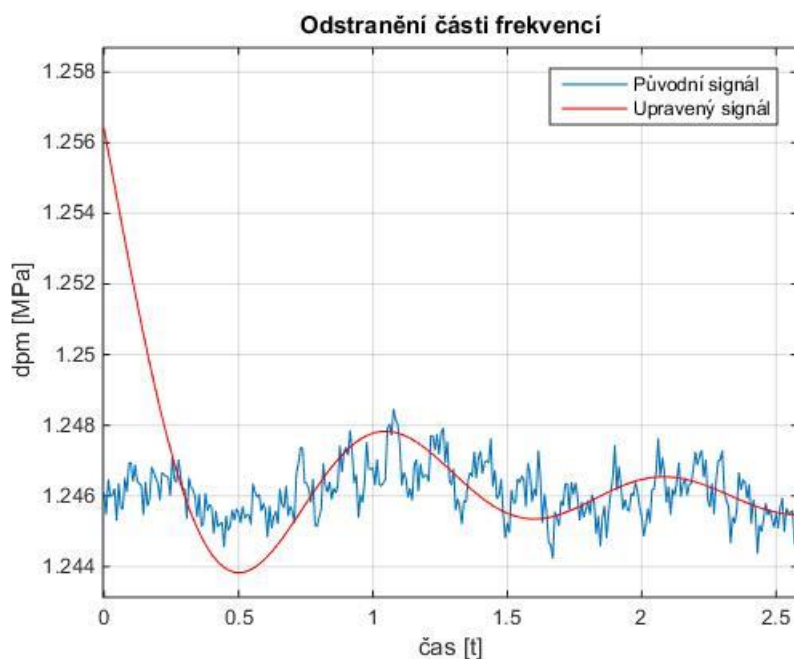
Graf 35 Porovnání tlak. signálů – odstranění všech frekvencí nad 0,1 Hz, odchylka $Q=0,6466\%$

Graf 36 zobrazuje stejný případ, jen se odstraní všechny frekvence nad 1 Hz. Prudký nárůst tlaku při zavření rozvaděče zde již zůstal zachován.



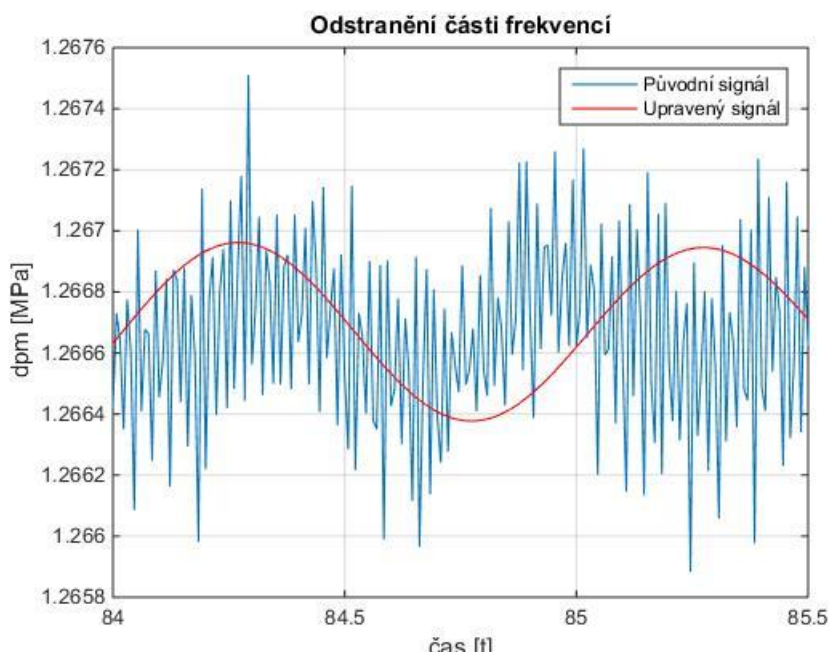
Graf 36 Porovnání tlak. signálů – odstranění všech frekvencí nad 1 Hz, odchylka $Q=-0,0494\%$

V tomto případě je odchýlení krajních hodnot tlakového signálu již o něco menší, jak je vidět v grafu (viz Graf 37). Tedy čím vyšší je dolní hranice odstraněných frekvencí, tím menší toto odchýlení je. Aby se zabránilo nepřesnosti při vyhodnocování průtoku, upravila se krajní hodnota časového intervalu pro určení tlakové diference a vyhodnocení průtoku z 0–50 s na 0,5–50 s jak pro vyhodnocování upraveného tlakového signálu, tak původního. Vyhodnocený průtok s původním signálem je potom $31,6033 \text{ m}^3/\text{s}$, tedy pouze o 0,0003 % menší než s původním intervalem.



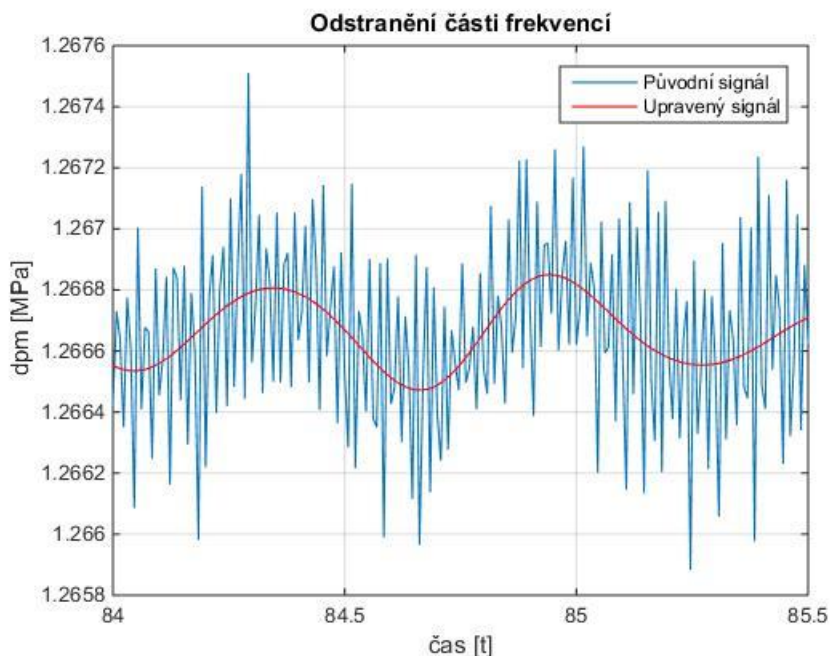
Graf 37 Odchýlení krajních hodnot upraveného tlakového signálu

Vyhodnocený průtok s odstraněním všech frekvencí nad 1 Hz z tlakového signálu je o 0,0494 % menší než původní průtok. Detail tohoto signálu je zobrazen v grafu (viz Graf 38).



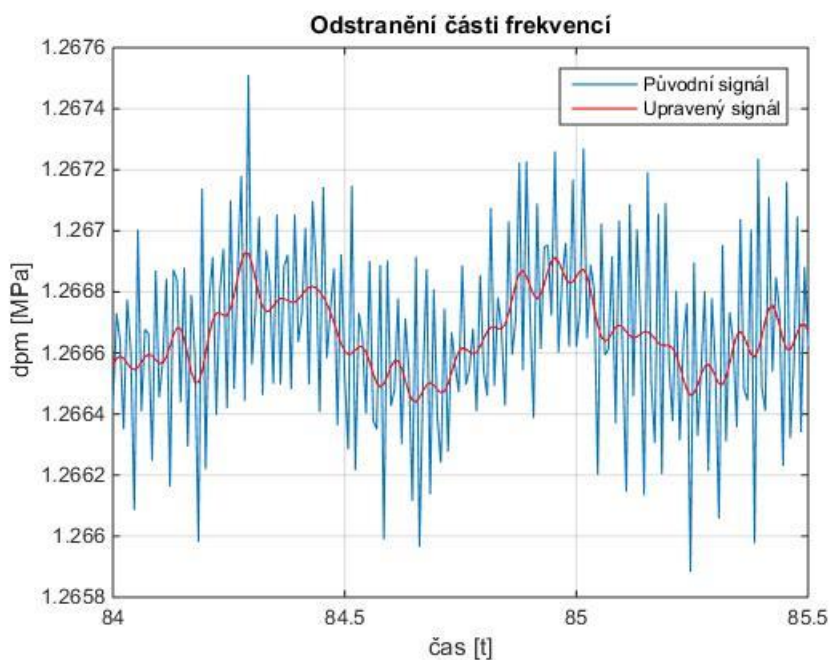
Graf 38 Odstranění všech frekvencí nad 1 Hz, odchylka $Q = -0,0494 \%$

Následující dva grafy zobrazují stejný detail tlakového signálu, ale pro odstranění všech frekvencí nad hodnoty 3 Hz a 15 Hz. Při odstranění všech frekvencí nad 3 Hz je vyhodnocený průtok o 0,0134 % menší než původní (Graf 39).



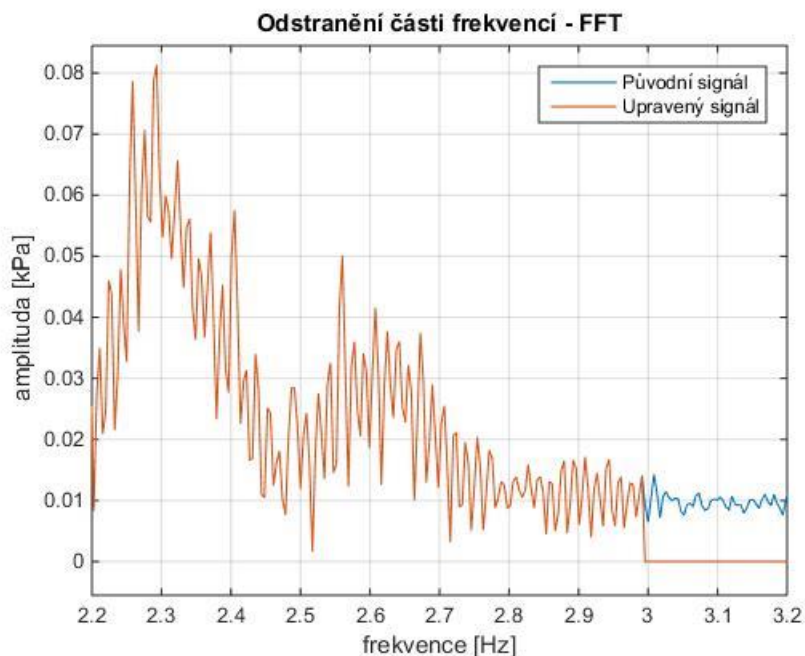
Graf 39 Odstranění všech frekvencí nad 3 Hz, odchylka $Q = -0,0134 \%$

Při odstranění všech frekvencí nad 15 Hz je vyhodnocený průtok jen o 0,0013 % menší než původní (viz Graf 40). Zde ještě nedošlo k úplnému vyhlazení signálu.



Graf 40 Odstranění všech frekvencí nad 15 Hz, odchylka $Q=-0,0013\%$

Porovnání FFT původního a upraveného tlakového signálu s odstraněním části frekvencí vyšlo dle očekávání. Tedy po odstranění všech frekvencí například nad hodnotu 3 Hz byly všechny amplitudy nad tuto hodnotu nulové, jak zobrazuje Graf 41.



Graf 41 Porovnání FFT – odstranění všech frekvencí nad 3 Hz, odchylka $Q=-0,0134\%$

ZÁVĚR

Celá diplomová práce byla rozdělena do 4 částí, které odpovídají zadání práce. Cílem první části bylo provést literární rešerši metody tlak-čas. Tato metoda je jednou ze dvou metod použitelných pro měření průtoku na velkých vodních dílech v souladu s normou IEC 60041. Metoda tlak-čas je ekonomicky velmi výhodná, protože nevyžaduje zdlouhavé odstávky vodních elektráren. V ČR je tato metoda použitelná například na VE Lipno, PVE Dalešice či PVE Dlouhé stráně. Rešerše byla zaměřena na odvození výpočtu této metody, který vychází z rovnice rovnováhy makroskopické částice, a na všeobecné požadavky, které při měření touto metodou musí být splněny a jsou předepsány normou. Metoda je založena na časové integraci měřené tlakové diference, proto byl také uveden přehled používaných tlakových snímačů s krátkým popisem jejich principu. Tlak je obvykle měřen ve dvou průřezích potrubí, přičemž v každém průřezu jsou rovnoměrně rozmístěny 4 tlakové snímače.

V následující části bylo cílem stanovení průtoku na již změřených datech. Výpočty byly prováděny v programu *MS Excel* a postup vyhodnocení průtoku byl podrobně popsán na datech naměřených na VE Lipno I.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo stanovení citlivosti vyhodnoceného průtoku, které je obsaženo ve zbývajících dvou částích. To bylo nejprve provedeno na váhy jednotlivých tlakových snímačů a následně na numerické zatlumení měřených tlaků.

Vzhledem k tomu, že tlakové snímače se na vnitřní stěny přiváděcích potrubí instalují při ročních odstávkách vodní elektrárny, bývá k těmto snímačům velmi obtížný přístup v případě nutnosti jejich výměny nebo opravy. Proto, dojde-li k poruše nějakého snímače, je při vyhodnocování průtoku tento snímač vynechán. Z tohoto důvodu je stanovení citlivosti na váhy jednotlivých tlakových snímačů velkým přínosem. Při zjišťování citlivosti byl průtok vyhodnocován vždy jen s jedním snímačem v dolním průřezu měření. Takto vyhodnocené průtoky byly porovnány s původním průtokem (se všemi 4 snímači). Bylo tak při různých velikostech průtoku zjištěno, o kolik se průtok vyhodnocený s určitým tlakovým snímačem liší od původního průtoku. V některých případech odchylka přesáhla dokonce 1 %. Následně byly porovnány naměřené tlakové diference jednotlivých tlakových snímačů (rozdíl tlaku před a po uzavření rozvaděče). Byla tak zjištěna odchylka jednoho snímače, která mohla být pravděpodobně způsobena lineární konstantou snímače. Dalším krokem bylo stanovení nejistoty typu A vyhodnocených průtoků s jednotlivými snímači a se všemi snímači.

Druhá část stanovení citlivosti vyhodnoceného průtoku byla zaměřena na numerické zatlumení měřených tlaků. Bylo tedy zkoumáno, jaký vliv na vyhodnocený průtok má, pokud dojde k vyhlazení tlakového signálu, tlakové snímače s měřeným tlakovým signálem zaznamenají okolní šum, dojde k časovému posunutí tlakových signálů mezi horním a dolním průřezem měření nebo se ze signálu nechají odstranit vyšší frekvence. V každém případě byl naměřený tlakový signál určitým způsobem upraven a následně byl znovu vyhodnocen průtok, který byl porovnán s průtokem s původním tlakovým signálem. Odchylka těchto průtoků byla v závislosti na daném zásahu do signálu vynesena do grafu. Veškerá vyhodnocení byla prováděna v programu *Matlab*.

Prvním případem tedy bylo vyhlazení tlakového signálu pomocí klouzavého průměru. Ten umožňuje eliminovat krátkodobé výkyvy a naopak zvýrazňovat dlouhodobé trendy, slouží k částečnému odstranění náhodného šumu. Intenzita vyhlazení roste s délkou klouzavé části (velikosti okna). Tuto velikost lze nadefinovat v čase v souvislosti se vzorkovací frekvencí, tedy 1 s odpovídá vzorkovací frekvenci. Odchylka průtoků tak byla porovnáвана v závislosti na časové konstantě. S nízkými hodnotami časové konstanty (malá velikost okna) je vyhodnocený průtok s takto upraveným signálem větší než původní. Při vyšších hodnotách časové konstanty průtok klesá. Odchylka se pohybuje v setinách až desetínách procenta. Porovnáním Fourierovy transformace (FFT) bylo ověřeno, že došlo k utlumení vyšších frekvencí.

V dalším případě byl zkoumán vliv okolního šumu. Ten byl nasimulován tak, že se k původnímu tlakovému signálu nechala přičítat náhodně vygenerovaná čísla z určitého intervalu hodnot. Tak vznikl šum odpovídající bílému šumu, který má ploché frekvenční spektrum. V prvním kroku byla porovnáвана velikost tohoto šumu, neboli vygenerovaná čísla byla vždy stejná. Velikost odpovídá maximální hodnotě rozsahu přičítaných tlaků v kPa. Absolutní odchylka průtoků s touto zvyšující se hodnotou roste. V dalším kroku byl porovnáván vliv různého šumu, tedy tentokrát byla generována vždy nová náhodná čísla. Rozdělení pravděpodobnosti vygenerovaných náhodných čísel má obdélníkový tvar, kdežto rozdělení pravděpodobnosti odchylky Q odpovídá normálnímu neboli Gaussovu rozdělení pravděpodobnosti. Rozšířená nejistota typu A odchylky Q lineárně roste v závislosti na horní hranici rozsahu přičítaného tlaku. Také bylo zjištěno, že šum na frekvenční spektrum nemá významný vliv.

Následujícím případem bylo zpoždění tlakového signálu mezi horním a dolním průřezem měření, ke kterému může docházet, pokud tyto signály není možné měřit na jednom počítači a může se tak vyskytnout problém s jejich synchronizací. Časové zpoždění bylo simulováno posouváním horního tlakového signálu do kladných i záporných hodnot. Tímto posouváním došlo k rozkmitání tlakového signálu. Ať už byl horní tlakový signál posouván na jakoukoliv stranu, vyhodnocený průtok s takto upraveným signálem vycházel vždy větší než původní. Při měření na vodních dílech toto zpoždění prakticky téměř nikdy nepřesáhne 1 s, tedy odchylka Q se pohybuje v desetínách %.

Poslední případ byl zaměřen na filtraci, která se používá k oddělení užitečné a rušivé složky signálu. Mění se tak frekvenční složení zpracovávaných datových řad a jsou tlumeny nežádoucí harmonické složky. V tomto případě byl použit filtr typu dolní propust, tedy odstraňována byla část vyšších frekvencí. To bylo provedeno tak, že po FFT se část frekvencí položila rovna nule a následně se provedla zpětná FFT, čímž se získal zafiltrovaný tlakový signál, se kterým byl opět vyhodnocen průtok a následně porovnán. Výrazná odchylka průtoků se projevila až při odstraňování nižších frekvencí, kdy docházelo ke ztrátě informací potřebných pro vyhodnocení průtoků, například k výraznému utlumení nárůstu tlaku způsobeného vodním rázem vyvolaným zavíráním rozvaděče. Při odstraňování vyšších frekvencí je tlakový signál zbaven všech rušivých složek a téměř vyhlazen, ale vyhodnocený průtok se přesto změnil jen v setinách procent.

V této diplomové práci *Citlivostní analýza metody tlak-čas na nepřesnosti měření* jsou uvedeny výsledky a citlivostní analýza na různé poruchy, které mohou při měření tlakové



diference vzniknout. Hlavním přínosem práce je ale postup použitelný při numerickém ověření pro další měření, kde bude možno takto změřená data a vyhodnocené průtoky kontrolovat pomocí vytipovaných možných nepřesností měření.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ČSN EN 60041: *Přejímací zkoušky na díle pro určení hydraulických charakteristik vodních turbín, akumulčních čerpadel a čerpadlových turbín* (mod IEC 41:1991), 1996.
- [2] HABÁN, V.; ŠEVČÍK, P. *Využití metody tlak-čas pro měření průtoku na velkých vodních dílech*. In HYDROTURBO 2001. Podbanské - Slovenská republika: Slovenské elektrárne, a.s. - VE Trenčín, o.z., 2001. s. 365 (s.)
- [3] MACH, Richard. *Experimentální zjišťování parametrů velkých hydraulických strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1999. 134 s. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Šrutka, CSc.
- [4] *New Calibration Equation for the Winter-Kennedy Piezometer System*. HydroWorld [online]. 2013 [cit. 2019-02-06] Dostupné z: <https://www.hydroworld.com/articles/hr/print/volume-32/issue-8/articles/new-calibration-equation-for-the-winter-kennedy-piezometer-system.html>
- [5] *Winter-Kennedy method in hydraulic discharge measurement: Problems and Challenges* [online]. 2016 [cit. 2019-02-06] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/307173383_Winter-Kennedy_method_in_hydraulic_discharge_measurement_Problems_and_Challenges
- [6] IEC 62006: *Hydraulic machines – Acceptance tests of small hydroelectric installations*, 2007.
- [7] RAMDAL, J.: *Efficiency measurements in low head hydro power plants*, PhD thesis NTNU, Trondheim 2011.
- [8] HRUBÝ, E. *Metoda tlak-čas pro stanovení průtoku na velkých vodních dílech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 72 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.
- [9] L. Bejček, J. Vaculík: *Snímače tlaku*, FEKT VUT Brno, BHV senzory, [online]. 2011 [cit. 2019-02-15] Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf
- [10] VŠCHT Praha, Ústav počítačové a řídicí techniky: *4.2 Měření tlaku*, [online]. © 2019 [cit. 2019-02-15] Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/f4/f4k42-tlak.htm>
- [11] VŠCHT Praha, Ústav počítačové a řídicí techniky: *Měřicí a řídicí technika pro 1. roč. magisterského studia FPBT, Měření technologických veličin*, [online]. © 2019 [cit. 2019-02-15] Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/MRT/predn/txt-Mgr/2-FPBT09-Tlak.pdf>
- [12] *Vodní elektrárna Lipno: Lipno I* [online]. ČEZ, 2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/lipno.html#elektrarna_lipno

- [13] *Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice* [online]. ČEZ, 2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dalesice.html>
- [14] *Office: CONCATENATE (funkce)* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://support.office.com/cs-cz/article/concatenate-funkce-8f8ae884-2ca8-4f7a-b093-75d702bea31d>
- [15] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV. 4.*, přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [16] *Rozptyl, směrodatná odchylka a variační koeficient* [online]. Měsíčník českého statistického úřadu, 2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.statistikaamy.cz/2017/01/rozptyl-smerodatna-odchylka-a-variacni-koeficient/nejistoty>
- [17] TROJAN, M. *Standardní nejistoty měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 85 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marie Havlíková.
- [18] *Vyjadřování nejistot: Vyjadřování nejistot měření při kalibracích* [online]. PALSTAT, 2002 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://micki.hofyland.cz/vut/bmva/nejistota.pdf>
- [19] *Číslíkové zpracování signálu a Fourierova analýza* [online]. KME ZCU [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/kmet/exm/download/EXM_PREDNASKA_08.pdf
- [20] *(Diskrétní) Fourierova transformace* [online]. 2003 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>
- [21] *MathWorks: Support* [online]. Switzerland, 2019 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://ch.mathworks.com/help/curvefit/smooth.html>
- [22] ŠKUTKOVÁ, H. *Akustický generátor pro buzení evokovaných potenciálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 76 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milan Chmelař, CSc
- [23] *Analýza a modelování dynamických biologických dat: Lineární filtrace – princip* [online]. MUNI IS [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: https://is.muni.cz/www/98951/41610771/43823411/43823458/Analyza_a_modelo/44257487/Bi0440-Schwarz-VJ03.pdf
- [24] SUCHÁNEK T. *Kmitočtový filtr*. Brno: VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav Telekomunikací, 2009. 44s. Vedoucí práce Ing. Ladislav Káňa

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|---------------|---------------------------------------|---|
| $S_{\bar{x}}$ | | Směrodatná odchylka střední hodnoty |
| \bar{x} | [-] | Aritmetický průměr |
| Π_{ij} | [Pa] | Nevratný tenzor napětí |
| δ_{ij} | [-] | Kroneckerovo delta |
| σ_{ij} | [Pa] | Složky tenzoru napětí |
| dp | [Pa] | Celkový tlakový rozdíl |
| f | [Hz] | Frekvence |
| f_{vz} | [Hz] | Vzorkovací frekvence |
| g | [m·s ⁻²] | Gravitační zrychlení |
| Gx | | Název souboru dat |
| k | [-] | Kvantil |
| L | [m] | Délka potrubí |
| n | [s ⁻¹] | Otáčky |
| N | [-] | Počet vzorků |
| p | [Pa] | Tlak |
| $p1Gi$ | [Pa] | Tlakový signál na i-tém snímači v horním průřezu měření |
| $p2Gi$ | [Pa] | Tlakový signál na i-tém snímači v dolním průřezu měření |
| P_f | [m ⁻¹] | Penstock faktor |
| p_{max} | [Pa] | Maximální hodnota tlaku |
| Q | [m ³ ·s ⁻¹] | Průtok |
| Q_0 | [m ³ ·s ⁻¹] | Počáteční průtok |
| R | [Pa·s ² ·m ⁻⁶] | Odporový součinitel |
| S | [m ²] | Průřez potrubí |
| $s^2(x)$ | | Rozptyl |
| s_x | | Směrodatná odchylka |
| t | [s] | Čas |
| T | [s] | Časová konstanta |
| $U(x)$ | | Rozšířená standardní nejistota |
| $u_A(x)$ | | Standardní nejistota typu A |
| $u_B(x)$ | | Standardní nejistota typu B |
| $u_C(x)$ | | Celková standardní nejistota |
| v | [m·s ⁻¹] | Rychlost proudění |



| | | |
|--------------|------------------------|----------------------------|
| V | [m ³] | Objem kapaliny |
| x | [m] | Poloha |
| α | [%] | Hladina významnosti |
| Δp | [Pa] | Tlaková diference |
| Δp_m | [Pa] | Naměřená tlaková diference |
| Δp_s | [Pa] | Statický tlak |
| Δt | [s] | Časový interval |
| ρ | [kg·m ⁻³] | Hustota kapaliny |
| ω | [rad·s ⁻¹] | Úhlová rychlost |



SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

Gibson + FFT

Klouzavý průměr = vyhlazení signálu

Odstranění části frekvenčního pásma

Zašuměný signál

Zpoždění tlakového signálu