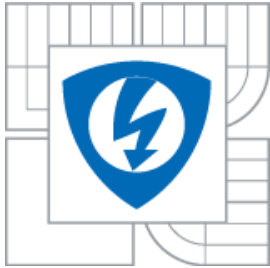




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NEJISTOTA NEPŘÍMÉHO MĚŘENÍ URČENÁ METODOU MONTE CARLO

UNCERTAINTY OF INDIRECT MEASUREMENT DETERMINED BY MONTE CARLO
METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK NOVOTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. SOŇA ŠEDIVÁ, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Marek Novotný

ID: 136565

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Nejistota nepřímého měření určená metodou Monte Carlo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte literární rešerši v oblasti stanovení nejistot měření s ohledem na nepřímá měření. Detailněji se zaměřte na výpočet nejistot měření pomocí metody Monte Carlo.
2. Navrhněte metodiku stanovení nejistoty nepřímého měření koeficientu víceotvorové rychlostní sondy určené pro měření průtoku (typ Annubar) tekutin metodou Monte Carlo.
3. Provedte experimentální měření průtoku vzduchu pomocí sondy Annubar a normalizované clony a stanovte nejistotu nepřímého měření koeficientu sondy Annubar klasickou metodou a metodou Monte Carlo.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

PALENČÁR, R. - VDOLEČEK, F. - HALAJ, M.: Nejistoty v měření I až V, soubor článků v časopise AUTOMA, č. 7-8/2001, č. 10/2001, č. 12/2001, č. 4/2002 a č. 5/2002

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá určováním nejistot měření, především s ohledem na nepřímá měření. Je zde teoreticky rozebrán a prakticky realizován výpočet nejistoty koeficientu víceotvorové rychlostní sondy Annubar 485 dvěma způsoby. Prvním způsobem je výpočet nejistoty klasickou metodou a druhým způsobem je stanovení nejistoty pomocí metody Monte Carlo.

Klíčová slova

Nepřímé měření, nejistota měření, metoda Monte Carlo, Annubar, koeficient

Abstract

This bachelor's thesis deals with determination of uncertainty in measurement, primarily with regard to the indirect measurement. There is theoretically analyzed and practically implemented calculate the uncertainty coefficient ent - speed multiple hole probe Annubar 485 in two ways. The first way is to calculate the uncertainty of the classical method and the second one is the uncertainty using the Monte Carlo.

Keywords

Indirect measurement, uncertainty measurement, Monte Carlo method, Annubar, coefficient

Bibliografická citace:

NOVOTNÝ, M. *Nejistota nepřímého měření určená metodou Monte Carlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 52s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Nejistota nepřímého měření určená metodou Monte Carlo jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23.5.2013**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne: **23.5.2013**

.....
podpis autora

Obsah

1	úvod.....	9
2	CHyby měření	10
3	Nejistoty měření	11
3.1	Zdroje nejistot měření.....	12
3.2	Nejistoty přímých měření	12
3.2.1	Standardní nejistota typu A	13
3.2.2	Standardní nejistota typu B	13
3.3	Základní pojmy v oblasti nejistot měření	13
3.4	Nejistoty nepřímých měření	14
3.4.1	Kovariance při určování celkových nejistot.....	15
4	Metoda Monte Carlo	18
4.1	Úvod do metody Monte Carlo	18
4.2	Generátory náhodných čísel	19
4.3	Výpočet nejistot pomocí metody Monte Carlo.....	19
5	Metodika stanovení koeficientu sondy annubar 485	21
5.1	Princip víceotvorové rychlostní sondy	21
5.2	Sonda Annubar 485	21
5.3	Měřicí trať.....	23
5.4	Vlastní měření a zpracování naměřených dat	23
5.4.1	Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 z katalogových hodnot.....	24
5.4.2	Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot.....	24
6	Stanovení nejistot koeficientu sondy Annubar 485 klasickou metodou.....	25
6.1	Stanovení dílčích a celkové nejistoty sondy Annubar 485 pro frekvenci ventilátoru 25Hz.....	25
6.2	Stanovení dílčích a celkové nejistoty sondy Annubar 485 pro frekvenci ventilátoru 50Hz.....	31
7	Metodika stanovení a výpočet nejistoty koeficientu víceotvorové rychlostní sondy pro měření průtoku tekutin metodou monte carlo	34
7.1	Výpočet nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí metody Monte Carlo pro frekvence ventilátoru 25Hz a 50Hz při zvažení jen části nejistot.	35
7.1.1	Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 25 Hz při zvažení jen části nejistot:	35

7.1.2	Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 50 Hz při zvážení jen části nejistot:	36
7.2	Výpočet nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí metody Monte Carlo pro frekvence ventilátoru 25Hz a 50Hz při zvážení všech známých nejistot.	37
7.2.1	Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 25 Hz při zvážení všech známých nejistot:	38
7.2.2	Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 50 Hz při zvážení všech známých nejistot:	38
8	Porovnání a zhodnocení dosažených výsledků.	40
8.1	Zhodnocení výpočtu koeficientu sondy Annubar 485.	40
8.2	Zhodnocení výpočtu celkové nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí klasické metody.	40
8.3	Zhodnocení výpočtu celkové nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí metody Monte Carlo.	41
9	Závěr.....	42
	Literatura.....	43
	Seznam příloh	44

1 ÚVOD

V dnešní době, kdy je ve výrobě požadována velká přesnost, především v odvětvích jako jsou strojírenství a elektrotechnika, kde už nedostačují starší metody k vyjádření výsledku měření. Z těchto důvodů se ustupuje od používání teorie chyb a začínají se využívat nové teorie nejistot měření. S rozšířením teorie nejistot a výpočetní techniky se začínají využívat i nové numerické metody, jako je například metoda Monte Carlo pro jejich snadné stanovení.

V této bakalářské práci budu poskytovat základní informace z problematiky chyb a nejistot měření s ohledem na nepřímá měření. V první části práce se budu zabývat základními teoretickými informacemi pro určení nejistot pomocí klasické metody nebo pomocí metody Monte Carlo.

V druhé části práce se budu zabývat praktickou ukázkou výpočtu koeficientu více-tvorové rychlostní sondy Annubar 485 i s výpočtem nejistot pomocí výše zmiňované klasické metody pro dvě různé frekvence ventilátoru v měřící trati. Dále zde nastíním základní metodiky výpočtu nejistot pomocí metody Monte Carlo a poté i výpočet koeficientu sondy a jeho nejistoty pro dvě různé frekvence ventilátoru v měřící trati pomocí metody Monte Carlo.

2 CHYBY MĚŘENÍ

Tato kapitola vychází ze zdrojů [1] a [3]. V dnešní době se velmi často setkáváme s pojmem určování chyb v měření. Je to dáno tím, že žádné měřicí zařízení, měřicí metoda ani měření není absolutně přesné. Při každém měření se naměřená hodnota pohybuje v určitém pásmu.

Základním dělením můžeme tyto chyby rozdělit na tři typy:

- Systematické chyby (jsou při stálých podmínkách také stálé jak velikostně, tak i znaménkem).
- Náhodné chyby (tyto chyby působí nahodile, nemají vždy stejnou hodnotu a nelze je z měření vyloučit).
- Omyly (tyto chyby jsou většinou způsobeny obsluhou).

Systematické chyby mají tu výhodu, že se dají snadno určit a jejich vliv zmenšit pomocí korekcí a kompenzací apod. Systematické chyby jsou způsobeny např. vlivem kmitočtu, teploty.

Náhodné chyby při opakovaném měření mění jak znaménko, tak i hodnotu. Pro určení jejich velikosti se provádí opakované měření s použitím statistických metod s patřičným pravděpodobnostním modelem.

Chyby můžeme také rozdělit na chyby:

- Absolutní chyba měření.
- Relativní chyba měření.

Absolutní chyba měření je dána rozdílem hodnoty námi naměřené a správné (skutečné) hodnoty. Absolutní chyba se uvádí v jednotkách měřené veličiny.

Relativní chyba měření je bezrozměrná a je dána podílem absolutní chyby a naměřené hodnoty. Relativní chyba se dá také vyjádřit procenty pokud podíl absolutní chyby a naměřené hodnoty vynásobíme stem.

Dalším významným dělení chyb je dělení podle zdrojů chyb:

- Chyby objektivní (jsou dány objektivními příčinami např. chybou použité metody).
- Chyby subjektivní (jsou dány chybami obsluhy přístroje).

3 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Tato kapitola vychází ze zdrojů [1], [2] a [3]. Zavádění nejistot v měření je spoutáno s mezinárodními normami. Především normami ISO 9000, ISO 10012, ISO/IEC 17025. Tyto a další normy přesně definují, jak nejistoty měření určovat a vyhodnocovat. Dodržováním norem je možné výsledky měření porovnávat s výsledky dosaženými jak v rámci laboratoře, tak v rámci jiných laboratoří nebo porovnávat výsledky s referenčními hodnotami.

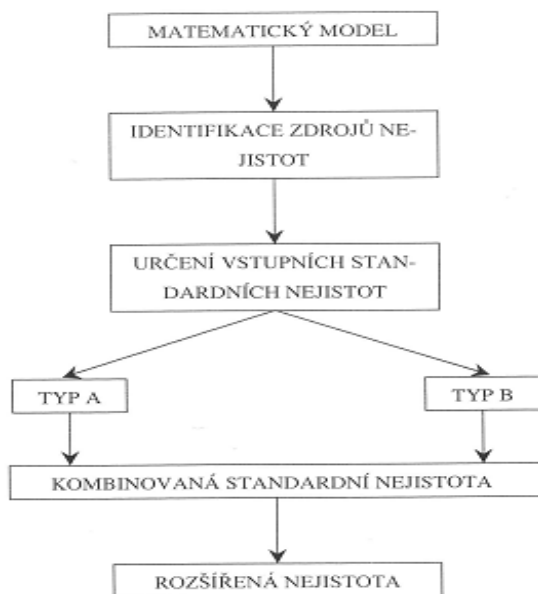
Například Evropská norma EN 45 001 v článku 5.4.3 pojednává o tom, že zpráva o zkouškách musí obsahovat prohlášení o nejistotě a současně musí být uveden spolu s vypočtenou nebo odhadnutou nejistotou.

Norma EN 17025 v článku 5.10.4.1 požaduje, aby kalibrační certifikát obsahoval hodnoty nejistot měření nebo prohlášení o souladu s uvedenou metrologickou specifikací nebo jejími články.

Z této kapitoly vyplývá, že v dnešní době je měření a určování nejistot pevně svázáno s normami. Bez dodržování těchto norem by nebylo možné získat např. protokol o kalibraci, laboratořím by nebylo umožněno získat akreditaci atd. Laboratoř také musí být schopna dokázat příslušnému orgánu, že nejistota byla správně vyhodnocena. Toho může dosáhnout pouze vedením úplné dokumentace výpočtů a předpokladů v souladu s příslušnými normami.

Nejistota měření může být definována jako odhad přidaný k výsledku měření charakterizující určitý interval hodnot, o kterém můžeme s určitou pravděpodobností tvrdit, že uvnitř leží skutečná hodnota. Nejistoty měření se skládají z mnoha složek. Některé z těchto složek můžeme odhadnout na základě statického rozdělení výsledků měření a můžeme je charakterizovat směrodatnými odchylkami. Některé složky lze odhadnout pouze na základě zkušeností z předchozích měření, dokonalou znalostí dané měřicí metody nebo znalostí údajů od výrobců měřících zařízení. Základní postup při vyjadřování nejistot je znázorněn na obrázku 1. Výsledná nejistota měření se skládá ze dvou složek:

- Standardní nejistota typu A.
- Standardní nejistota typu B.



Obrázek 1 Základní postup při vyjadřování nejistot měření

3.1 Zdroje nejistot měření

Zdrojem nejistot je vše, co nějakým způsobem negativně ovlivňuje výsledek měření a vzdaluje naměřenou hodnotu od skutečné. Některé tyto zdroje ovlivňují nejistoty typu A, které zahrnují všechny složky nejistot určované statickým rozбором série měření. Nejistota typu B pak zahrnuje všechny složky nejistot určené jinými metodami. Některé zdroje mohou dokonce ovlivňovat oba typy těchto nejistot. Nejčastějšími zdroji nejistot jsou:

- neúplná definice měřené veličiny,
- nesprávný odběr vzorků,
- nevhodný výběr přístroje,
- nevhodný postup při měření,
- zaokrouhlování,
- linearizace, aproximace, extrapolace, interpolace,
- kolísání hodnot měřené veličiny při opakovaných měření za stejných podmínek,
- nepřesnost etalonů,
- neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí.

3.2 Nejistoty přímých měření

Přímá měření jsou měření, při kterých výsledná hodnota měření lze přímo odečíst z měřících přístrojů.

3.2.1 Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A (značená u_A) je stanovena z opakovaných měření statickou analýzou z určité série naměřených hodnot měřených za stejných podmínek. Příčiny této nejistoty se považují za neznámé a jejich velikost klesá úměrně s počtem měření. Standardní nejistota typu A je dána vztahem (1) a je rovna směrodatné odchylce aritmetického průměru naměřených hodnot.

$$u_A(x) = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

Kde n je počet měření, s je směrodatná odchylka, y_i je aktuální hodnota.

Pokud je počet měření menší jak deset a tím pádem není možné určit kvalifikovaný odhad, určí se korigovaná nejistota u_{Ak} pomocí vztahu:

$$u_{Ak}(x) = k \cdot s(\bar{y}) \quad (2)$$

3.2.2 Standardní nejistota typu B

Standardní nejistota typu B (značená u_B) je nejistota získaná jiným způsobem než pomocí statického zpracování výsledků opakovaného měření. Pro určení standardní nejistoty typu B je třeba znát všechny zdroje nejistot ovlivňující měření. Poté je možné vypočítat pomocí znalosti zákona šíření nejistot nejistotu $u_B(x)$ dle vztahu (3).

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} \quad (3)$$

kde u_{zj} jsou složky nejistot měřené veličiny.

3.3 Základní pojmy v oblasti nejistot měření

- **Aritmetický průměr** – Součet hodnot podělený počtem hodnot.
- **Koeficient pokrytí** – Faktor, kterým se násobí nejistota měření pro zjištění rozšířené nejistoty měření.
- **Korelace** – Vztah mezi větším počtem náhodných veličin v rámci rozdělení většího počtu náhodných veličin.
- **Měřená veličina** – Veličina, která je předmětem daného měření.
- **Náhodná veličina** – Veličina, která nabývá jakékoliv hodnoty z určité množiny hodnot a je charakterizována rozdělením pravděpodobnosti.

- **Skutečná hodnota veličiny** – Hodnota, která byla získána naprosto přesným měřením.
- **Vstupní odhad** – Tato hodnota je užívána při vyhodnocování výsledku měření.
- **Výstupní odhad** – Výsledek měření vypočtený ze vstupních odhadů a funkce modelu měření.
- **Výstupní veličina** – Veličina, které při konečném vyhodnocování měření představuje námi měřenou veličinu.
- **Relativní standardní nejistota měření** – Hodnota je dána jako standardní nejistota veličiny podělená odhadem veličiny.
- **Rozptyl** – Rozptyl je dán jako střední hodnota druhé mocniny odchylky náhodné veličiny od její střední hodnoty.
- **Rozšířená nejistota** – Rozšířená nejistota udává interval kolem výsledku měření, který obsahuje velkou část rozdělení hodnot, které je možné přidat k měřené veličině.
- **Směrodatná odchylka** – Směrodatná odchylka je dána jako druhá odmocnina rozptylu.
- **Standardní nejistota měření** – Nejistota měření vyjádřena jako směrodatná odchylka.

3.4 Nejistoty nepřímých měření

Nepřímé měření je takové měření, při kterém je výsledná hodnota dána funkčním vztahem vstupních hodnot, které jsou odečítány přímo z měřicích přístrojů. Námi hledanou hodnotu zjistíme tak, že dosadíme naměřené hodnoty do výpočetního vztahu. Vypočtené hodnota ale obsahuje chybu, která je dána všemi námi měřenými hodnotami vstupujícími do funkce.

Výstupní veličina Y , která je předmětem zájmu je dána funkcí f vstupních veličin X_1, X_2, \dots, X_m . Tyto vstupní veličiny jsou přímo změřitelné nebo jejich odhady, kovariance a nejistoty známe z jiných zdrojů. Tedy:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (4)$$

Odhad y výstupní veličiny Y je dán funkčním vztahem:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (5)$$

kde x_1, x_2, \dots, x_m jsou odhady vstupních veličin X_1, X_2, \dots, X_m .

V případě, že odhady x_1, x_2, \dots, x_m jsou nekorelované se nejistota určí pomocí vztahu:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) \quad (6)$$

Pro koeficienty citlivosti (převodové koeficienty) A_i platí:

$$A_i = \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1, \dots, X_m=x_m} \quad (7)$$

V případě, že odhady x_1, x_2, \dots, x_m budou korelované musíme brát v potaz kovariance mezi jednotlivými odhady, které jsou dalšími složkami nejistoty. Vztah pro výpočet nejistoty výstupní veličiny pro korelované vstupní veličiny je tedy:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(x_i, x_j) \quad (8)$$

Přičemž $u(x_i, x_j)$ ze vztahu (8) je kovariance mezi navzájem korelovanými odhady x_i, x_j , což jsou dvě vzájemně závislé různé veličiny nebo dvě hodnoty stejné veličiny, které mají mezi sebou jistou korelační vazbu.

V některých případech je výhodnější určit nejistoty odhadu y výstupní veličiny Y samostatně metodou A a samostatně metodou B. V tomto případě celkovou standardní nejistotu určíme podle vztahu:

$$u_c(y) = \sqrt{u_A^2(y) + u_B^2(y)} \quad (9)$$

3.4.1 Kovariance při určování celkových nejistot

Kovariance mezi odhady jednotlivých zdrojů nám říkají, jak jsou odhady navzájem ovlivněny společnými zdroji nejistot. Tyto společné zdroje jsou brány v potaz z důvodů jejich zohlednění ve výsledné nejistotě. Kovariance mohou výslednou nejistotu jak zmenšit, tak i zvětšit. Závisí to na charakteru kovariance (zdroje mohou působit souhlasně nebo proti sobě na dva odhady) a na tvaru funkce, kterou jsou vázány na výstupní veličinu.

Tyto kovariance se určují metodou typu A, která je založena na statickém zpracování údajů, nebo metodou typu B.

3.4.1.1 Stanovení kovariance $u(x_i, x_j)$ pomocí metody typu A

Podobně jako u stanovení standardní nejistoty typu A užíváme tuto metodu pokud máme k dispozici n naměřených hodnot od obou veličin $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ a $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}$. Pokud jsou x_i a x_j aritmetickými průměry, vypočítáme kovarianci určenou metodou typu A dle vztahu (10).

$$u_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (10)$$

3.4.1.2 Stanovení kovariance $u(x_i, x_j)$ pomocí metody typu B

Kovariance $u_B(x_i, x_j)$ určená metodou typu B, která je odlišná od metod vycházejících ze statistické analýzy naměřených hodnot můžeme určit buď čtením z literatury, certifikátů přístrojů nebo výpočtem.

Výpočet touto metodou se řídí podle pěti základních kroků. V prvním kroku zjistíme jednotlivé zdroje korelací. Poté odhadneme korelační koeficient $r(x_i, x_j)$, který vyjadřuje míru závislosti mezi jednotlivými odhady. Tento koeficient může nabývat hodnot od -1 do +1. Hodnotu kovariance určíme ze vztahu (11).

$$u_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j)u_B(x_i)u_B(x_j) \quad (11)$$

Pokud dvě vstupní veličiny X_1, X_2 jsou funkcemi nezávislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_n pak můžeme vyjádřit vztahy (12).

$$\begin{aligned} X_1 &= g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \\ X_2 &= g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \end{aligned} \quad (12)$$

Kovariance mezi odhady x_1, x_2 se určí ze vztahu (13).

$$u_B(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) \quad (13)$$

kde A_{1i}, A_{2i} jsou koeficienty citlivosti pro funkce g_1 a g_2 .

Pokud dvě vstupní veličiny X_1, X_2 jsou funkcemi závislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_n , pak platí vztah (14).

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j) \quad (14)$$

kde $u_B(z_i, z_j)$ je kovariance mezi odhady z_i a z_j .

Jestliže nejde určit korelační koeficient a ani se vyhnout korelacím, měl by se určit maximální vliv korelace na výslednou nejistotu pomocí horní hranice odhadu standardní nejistoty. Pro užití tohoto výpočtu musíme předpokládat, že vstupní veličiny X_1, X_2 jsou korelované a také že stupeň korelace neznáme. Ostatní vstupní veličiny korelované nejsou poté platí vztah (15).

$$\begin{aligned}
 u_B^2(y) &\leq \left[|A_1 u_B(x_1)| + |A_2 u_B(x_2)| \right]^2 + \sum_{i=3}^m A_i^2 u_B^2(x_i) = A_1^2 u_B^2(x_1) + A_2^2 u_B^2(x_2) + \\
 &+ 2|A_1 A_2| u_B(x_1) u_B(x_2) + \sum_{i=3}^m A_i^2 u_B^2(x_i) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u_B^2(x_i) + 2|A_1 A_2| u_B(x_1) u_B(x_2)
 \end{aligned} \tag{15}$$

Jak je patrné nemáme dostatek informací pro zjištění kovariancí a proto nemůžeme ani zjistit přesnou hodnotu výsledné nejistoty, tak uvádíme alespoň horní hranici nejistoty.

4 METODA MONTE CARLO

Tato kapitola vychází ze zdrojů [4] a [5].

4.1 Úvod do metody Monte Carlo

Metoda Monte Carlo byla formulována před více než šedesáti lety. Byla sestavena a poprvé hojně využívána během druhé světové války ve Spojených státech amerických vědci Johnem von Neumannem a Stanislavem Ulmanem při výzkumu chování neutronů. Název této metody je odvozen od oblíbené lokality strýčka jednoho z vědců.

Metoda byla zpočátku aplikovaná především na řešení složitých fyzikálních problémů. S vývojem výpočetní techniky a rozvojem teorie modelování bylo zjištěno, že touto metodou se dají řešit problémy oborů jako jsou ekonomika, doprava, matematika a také pro nás důležitý obor elektrotechnika.

Pod pojmem metoda Monte Carlo se obecně rozumí všechny postupy numerického řešení fyzikálních a dalších různých problémů, které jsou realizované pomocí opakovaných náhodných pokusů. Odhady námi hledané veličiny mají pravděpodobnostní charakter. Označíme odhady

$$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n \tag{16}$$

Tyto odhady získáme statistickým zpracováním materiálu, který jsme získaly jako výsledek opakovaných náhodných pokusů. Naším cílem je, aby veličina ϕ_n , kde n je počet pokusů, která je veličinou náhodnou konvergovala při $n \rightarrow \infty$ k námi hledané hodnotě ϕ . Musí být tedy splněno, aby pro libovolně malé $\varepsilon > 0$ platil vztah (17).

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\phi_n - \phi| < \varepsilon) = 1 \tag{17}$$

Výběr našeho odhadu ϕ_n je samozřejmě podmíněn typem námi řešené úlohy. Hodnota ϕ může být vykládána jako střední hodnota náhodné veličiny, pravděpodobnost náhodného jevu, zjednodušeně řečeno nějaký statistický parametr. Veličiny ϕ_n jsou statistické odhady a mají souvislost s hledanou veličinou ϕ prostřednictvím pravděpodobnostních zákonů.

Velkou výhodou této metody je, že nemusíme znát vnitřní vztahy mezi výsledky jednotlivých experimentů. Postačí pouze vyjasnit soubor podmínek, při jejichž realizaci má místo vnější souvislost. Úspěch výpočtu metodou Monte Carlo je dán třemi základními faktory:

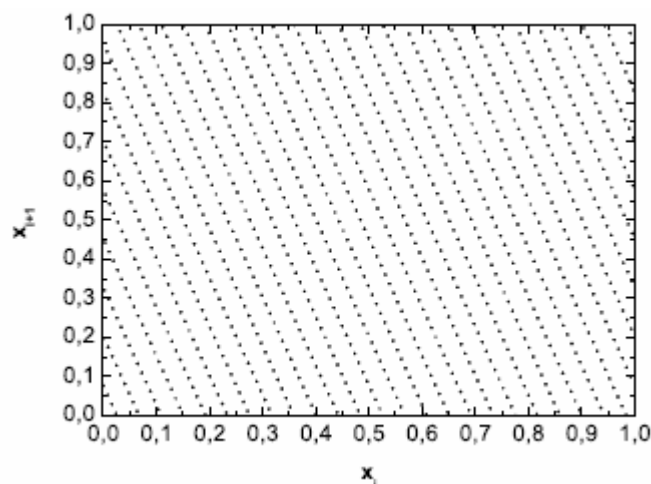
- Kvalitou generátoru náhodných čísel.
- Výběrem správného algoritmu výpočtu.
- Kontrolou přesnosti získaného výsledku.

4.2 Generátory náhodných čísel

K užití opravdu náhodných čísel v simulaci na PC je třeba nějaký hardwarový generátor, který je založen na určitých náhodných fyzikálních pokusech. Například měření šumu polovodičového přechodu. Tato metoda spočívá v digitalizaci náhodných šumů na polovodičovém přechodu. Šumy jsou zcela náhodné a po nahrání do PC je získán soubor zcela náhodných dat.

Pro testování těchto generátorů se užívají různé metody jakou jsou frekvenční test, test náhodnosti výskytu. Například grafický test spočívá v generování náhodných dvojic čísel, které jsou graficky vynášeny a z jejich rozložení je možné stanovit náhodnost děje.

Pro simulace lze také užít generátor pseudonáhodných čísel. Tyto generátory generují čísla vytvářející posloupnost, která se jeví jako náhodná. Ve skutečnosti tyto generátory využívají pro generování deterministický algoritmus. Posloupnost vygenerovaných čísel je periodická, po určité době se cyklus začne opakovat, což je možné vidět na obrázku 2.



Obrázek 2 Výsledek generace pseudonáhodných čísel.

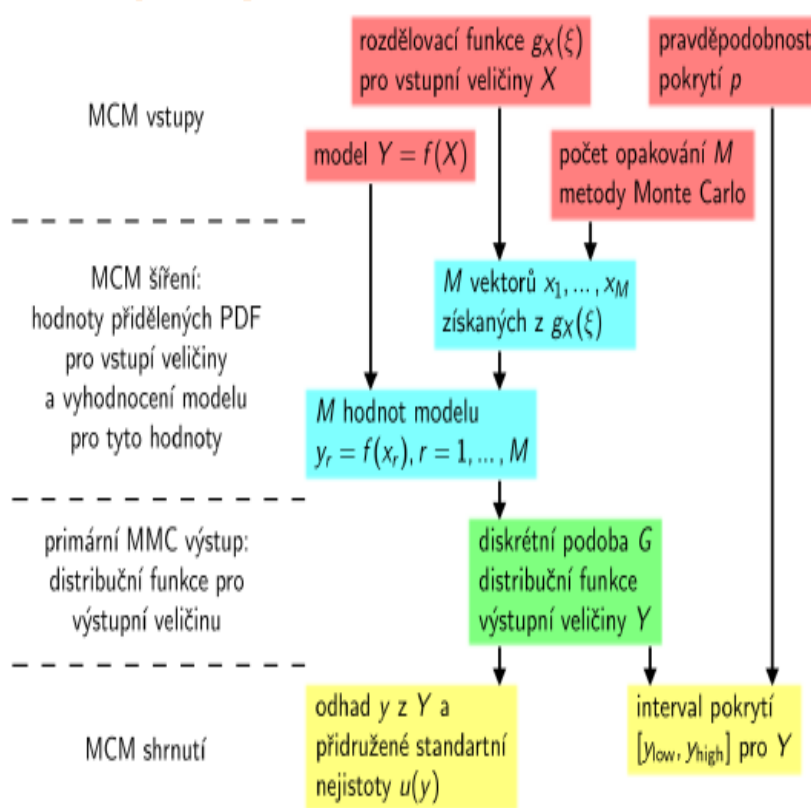
4.3 Výpočet nejistot pomocí metody Monte Carlo

Jedno z možných využití metody Monte Carlo je k stanovení nejistot měření. Při určování nejistot touto metodou je třeba vytvořit přesný matematický model měřeného děje. Po vytvoření tohoto modelu je třeba stanovit hustotu pravděpodobnosti vstupních veličin. Po určení hustoty pravděpodobnosti je třeba provést dostatečný počet simulací. Dalším krokem je zpracování vypočtených hodnot pomocí stochastických metod. Na závěr se určí nejpravděpodobnější hodnoty a nejistoty.

Výhodami využití této metody ke stanovení nejistot měření je, že můžeme počítat i s velmi složitými rozděleními a komplexními čísly. V této metodě není třeba derivovat a také není třeba počítat stupně volnosti.

Naopak nevýhodou této metody je, že je třeba mít kvalitní generátor náhodných čísel a také výkonné PC s kvalitním a vhodným softwarem. Další nevýhodou se jeví to, že tato metoda nelze počítat ručně na papír.

Metodu Monte Carlo je vhodné užít v případě, že vstupní veličiny mají tzv. divoké rozložení nebo když jsou citlivostní koeficienty nulové.



Obrázek 3 Schéma metody Monte Carlo [4]

5 METODIKA STANOVENÍ KOEFIICIENTU SONDY ANNUBAR 485

Tato kapitola vychází ze zdrojů [6] a [7].

5.1 Princip víceotvorové rychlostní sondy

Víceotvorové sondy vycházejí s principu Pitotovy trubice. Pitotova trubice je jedna z nejstarších rychlostních sond pro měření průtoku kapalin. Základním prvkem této trubice je úzká trubice otočená ústím proti proudění tekutiny. Vyhodnocuje se rozdíl snímaných tlaků (celkový tlak, statický tlak). Při znalosti hustoty kapaliny jsme schopni určit rychlost proudění kapaliny. Pitotova trubice je vhodná používat především pro měření průtoku plynů nebo čistých kapalin, kde nehrozí zanesení otvorů trubice nečistotami.

5.2 Sonda Annubar 485

Sonda Annubar 485 je víceotvorová sonda vyráběná firmou Rosemount. Je kompletně zhotovena z nerezové oceli. Její průřez nabývá tvaru T. Tlak na náplavové straně sondy se neodebírá v jednotlivých bodech, ale ve dvou obdélníkových průřezích umístěných nad sebou ve středu sondy. Tlak v úplavu se odebírá z otvorů po obou stranách sondy. Sonda také obsahuje teploměrovou jímku, která je určena pro snímač teploty. Velkou výhodou těchto sond je snadná montáž, velmi malé nároky na údržbu, malé provozní náklady. Naopak značnou nevýhodou sondy Annubar 485 je to, že může být užita pouze v zcela zaplněném potrubí.

K výpočtu koeficientu sondy Annubar 485 pomocí katalogových hodnot je třeba znát hodnoty experimentálně zjištěných konstant C_1 a C_2 , které jsou obsaženy v katalogovém listu sondy [7] a koeficient bloku B . Koeficient sondy lze vypočítat ze vztahu (18) a koeficient bloku ze vztahu (19).



Obrázek 4 Sonda
Annubar 485

$$k = \frac{(1 - C_2 B)}{\sqrt{1 - C_1 (1 - C_2 B)^2}} \quad [-] \quad (18)$$

$$B = \frac{4d}{\pi D} \quad [-] \quad (19)$$

kde d je šířka použité sondy v potrubí a D je vnitřní průměr potrubí.

Pro výpočet koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot je třeba znát objemový průtok vypočtený z výstupu normalizované clony DN80. Pro objemový průtok platí vztah (20). Po vypočtení objemového průtoku pro koeficient sondy platí vztah (22).

$$Q_v = \frac{1}{\rho} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p_c} \rho \quad [m^3 / s] \quad (20)$$

kde:

ρ - hustota vzduchu,

β - poměr průměru clony ku průměru potrubí,

d - průměr otvoru clony,

ε - součinitel expanze,

Δp_c - diferenční tlak na výstupu clony,

C - součinitel průtoku.

Jelikož hustota vzduchu není konstantní při změně teploty je nutné do vztahu (20) za ρ dosadit vztah (21).

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad [\text{Pa}] \quad (21)$$

Kde R je plynová konstanta vzduchu [J/kgK], p je atmosférický tlak [Pa] a T je teplota [K].

Při znalosti objemového průtoku vypočteného z normalizované clony DN80 (20) je možné psát vztah pro výpočet koeficientu sondy (23) odvozeného z rovnice objemového průtoku.

$$Q_v = S.k.\sqrt{2.\frac{\Delta p_s}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad (22)$$

Kde S je průřez potrubí [m²], ρ je hustota vzduchu [kg/m³] a Δp_s je diferenční tlak na výstupu sondy [Pa]. Pro potrubí v měřící trati, na níž bylo prováděno měření je $S = 7,854.10^{-3} \text{ m}^2$

$$k = \sqrt{\frac{Q_v^2 \rho}{2S^2 \Delta p_s}} \quad [-] \quad (23)$$

5.3 Měřicí trať

Vlastní měření bylo provedeno na měřicí trati na ústavu Automatizace a měřicích technologiích. Trať je určena pro měření víceotvorových rychlostních sond pro průměr potrubí 100 mm. Na této trati se dají sledovat tlakové ztráty, vliv pootočení sondy vzhledem ke směru proudění vzduchu, porovnávat vlastnosti různých průtokoměrů s vlastnostmi etalonů.

Trať sestává z ocelového potrubí o průměru 200 mm. V části, kde se provádí měření je průměr potrubí 100 mm. V části s průměrem potrubí 80 mm se nachází zabudovaný etalon. V našem případě je etalonem normalizovaná clona DN80. K určení teploty proudícího vzduchu slouží teploměr Pt100. Tlak proudícího vzduchu v potrubí není možné snímat, ale experimentálně bylo ověřeno, že se zásadně neliší od okolního tlaku, proto je možné pro výpočty užít hodnotu atmosférického tlaku. Rychlost proudícího vzduchu se zajišťuje středotlakým ventilátorem RSH PK 123227 a frekvenčním měničem. Rychlost je možné nastavovat v rozsahu 0-20 m.s⁻¹. Důkladnější popis této měřicí trati se nachází ve zdroji [6].

5.4 Vlastní měření a zpracování naměřených dat

Měření bylo provedeno na měřicí trati viz. kapitola 5.3. Během měření byla teplota vzduchu v místnosti 23 °C a hodnota atmosférického tlaku byla 1009 hPa.

Použité přístroje:

- multimetr METEX M-3890D v.č. CI 856820,
- multimetr METEX M-3890D v.č. CI 856854,
- multimetr Hung Chang M-3640D,
- frekvenční měnič COMMANDER SE 23400400,
- teploměr 9607 PT100,
- tlakoměr Rosemount 3051 v.č. 7079598/1297,
- tlakoměr Rosemount 3051, v.č. 7059597/1297
- stabilizovaný zdroj 881918-AUL310,
- zdroj 755732062.

5.4.1 Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 z katalogových hodnot

Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 je proveden pomocí vztahů uvedených v kapitole 5.2. V měřicí trati se nachází sonda velikosti 1 a tomu odpovídají experimentálně zjištěné konstanty $C_1 = -1,515$ a $C_2 = 1,4229$. Více informací k výpočtu se nachází ve zdroji[7].

$$B = \frac{4d}{\pi D} = \frac{4 \cdot 14,986}{\pi \cdot 100} = 0,1908 \quad (24)$$

kde $d = 14,986\text{mm}$ a $D = 100\text{mm}$.

$$k = \frac{(1 - C_2 B)}{\sqrt{1 - C_1 (1 - C_2 B)^2}} = \frac{(1 - 1,4229 \cdot 0,1908)}{\sqrt{1 - (-1,515)(1 - 1,4229 \cdot 0,1908)^2}} = 0,542 \quad (25)$$

5.4.2 Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot

Pro výpočet koeficientu sondy Annubar 485 pomocí naměřených hodnot jsou použity vztahy uvedené v kapitole 5.2. Jelikož je výpočet koeficientu sondy velice závislý na objemovém průtoku, tak se určí jako průměr z vypočtených hodnot koeficientu z jednotlivých naměřených údajů.

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} \quad (26)$$

Pro měření o frekvenci měniče 25Hz vyšel průměrný koeficient sondy Annubar 485:

$$\bar{k} = 0,582$$

Pro měření o frekvenci měniče 50Hz vyšel průměrný koeficient sondy Annubar 485:

$$\bar{k} = 0,580$$

6 STANOVENÍ NEJISTOT KOEFICIENTU SONDY ANNUBAR 485 KLASICKOU METODOU.

Tato kapitola vychází ze zdrojů [2], [3] a [8]. Ke stanovení celkové nejistoty měření klasickou metodou je třeba spočítat několik dílčích nejistot.

- Nejistota typu A
- Nejistota typu B
- Celková nejistota
- Rozšířená nejistota

6.1 Stanovení dílčích a celkové nejistoty sondy Annubar 485 pro frekvenci ventilátoru 25Hz

Nejistota typu A musí být stanovena pro diferenční tlak sondy, diferenční tlak clony a teplotu. Poté se nejistota typu A určí dle vztahu (1). Výpočet vychází z naměřených hodnot uvedených v příloze 1.

Nejistota typu A měření teploty:

$$u_A(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \overline{T})^2}{n(n-1)}} = 0,070^\circ\text{C} \quad (27)$$

Nejistota typu A měření diferenčního tlaku sondy:

$$u_A(\Delta p_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{si} - \overline{\Delta p_s})^2}{n(n-1)}} = 0,252\text{Pa} \quad (28)$$

Nejistota typu A měření diferenčního tlaku clony:

$$u_A(\Delta p_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{ci} - \overline{\Delta p_c})^2}{n(n-1)}} = 0,241\text{Pa} \quad (29)$$

Nejistota typu B převodníku diferenčního tlaku clony na elektrický proud:

V katalogovém listu výrobce uvádí chybu převodníku jako 0,075% z rozsahu. Rozsah převodníku je 0-3,6kPa. Také je předpokládáno rovnoměrné rozložení pravděpodobnosti, tedy $k = \sqrt{3}$ a maximální odchylka z_{max} je 2,7Pa. Pak se nejistota diferenčního tlaku clony vypočte dle vztahu (30).

$$u_B(p_c) = \frac{z_{max}}{k} = \frac{2,7}{\sqrt{3}} = 1,56Pa \quad (30)$$

Nejistota typu B převodníku diferenčního tlaku sondy na elektrický proud:

Pro převod diferenčního tlaku sondy na elektrický proud je použit stejný převodník jako v případě diferenčního tlaku sondy. Rozsah převodníku je nastaven na 0-800Pa. Maximální odchylka převodníku z_{max} je 0,6Pa. Nejistotu diferenčního tlaku sondy určíme ze vztahu (31).

$$u_B(p_s) = \frac{z_{max}}{k} = \frac{0,6}{\sqrt{3}} = 0,35Pa \quad (31)$$

Nejistota typu B převodníku signálu z čidla Pt100:

Tento převodník je umístěn v hlavici snímače teploty. Meze základní chyby jsou 0,3% a jeho rozsah je nastaven na 0-150°C. Maximální odchylka převodníku z_{max} je 0,45°C. Nejistotu převodníku poté vypočteme ze vztahu (32).

$$u_B(p_T) = \frac{z_{max}}{\sqrt{3}} = \frac{0,35}{\sqrt{3}} = 0,36^\circ C \quad (32)$$

Nejistota typu B multimetru Metex M-3890D pro měření diferenčního tlaku sondy:

Průměrná hodnota naměřená na multimetru při měření diferenčního tlaku byla 7,41mA. V katalogovém listu výrobce udává chybu přístroje ($\pm 1,2\%+2dgt$ s). Při znalosti těchto údajů můžeme nejistotu vypočítat ze vztahu (33) a poté nejistotu v mA podle vztahu (34) převést na nejistotu v Pa.

$$u_B(M_{\Delta ps}) = \frac{p\% z \text{ nam. hodnot} + n \text{ dgts}}{k} = \frac{0.012 \cdot 7,41 + 2 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} = 0,063mA \quad (33)$$

$$u_B(M_{\Delta ps}) = \frac{u_B(M_{\Delta ps}) \cdot \text{rozsah}}{16} = \frac{0,063 \cdot 800}{16} = 3,144Pa \quad (34)$$

Nejistota typu B multimetru Metex M-3890D pro měření teploty:

Pro měření teploty byl použit multimetr se stejnými parametry jako multimetr pro měření diferenčního tlaku sondy. Průměrná naměřená hodnota byla 7,07mA. Nejistota přístroje se vypočte stejným způsobem jako v předchozím případě.

$$u_B(M_T) = \frac{0,012 \cdot 7,07 + 2,0,01}{\sqrt{3}} = 0,061mA \quad (35)$$

$$u_B(M_T) = \frac{0,061 \cdot 150}{16} = 0,567^\circ C \quad (36)$$

Nejistota typu B multimetru Hung Chang pro měření diferenčního tlaku clo-ny:

Průměrná hodnota naměřená multimetrem Hung chang byla 7,60mA. Výrobce v katalogu uvádí chybu přístroje jako ($\pm 1,2\%+1dgt$ s). Nejistota se vypočte obdobně jako v předchozích případech.

$$u_B(M_{\Delta pc}) = \frac{0,012 \cdot 7,60 + 0,01}{\sqrt{3}} = 0,058mA \quad (37)$$

$$u_b(M_{\Delta pc}) = \frac{0,058 \cdot 3600}{16} = 13,146Pa \quad (38)$$

Celková nejistota diferenčního tlaku sondy:

Celková nejistota se určí jako součet čtverců dílčí nejistoty typu A a celkové nejistoty typu B.

$$u_B(\Delta p_s) = \sqrt{u_B(M_{\Delta ps})^2 + u_B(p_s)^2} = \sqrt{3,144^2 + 0,35^2} = 3,164Pa \quad (39)$$

$$u_C(\Delta p_s) = \sqrt{u_A(\Delta p_s)^2 + u_B(\Delta p_s)^2} = \sqrt{0,252^2 + 3,164^2} = 3,174Pa \quad (40)$$

Tabulka 1: Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak sondy

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_C(\Delta p_s)$
Δp_s	170,33Pa	0,252Pa	rovnoměrné	1	0,252Pa
Převodník		0,35Pa	rovnoměrné	1	0,35Pa
Metex M-3890D		3,144Pa	rovnoměrné	1	3,144Pa
Δp_s	170,33Pa				3,174Pa

Celková nejistota diferenčního tlaku clony:

$$u_B(\Delta p_c) = \sqrt{u_B(M_{\Delta p_c})^2 + u_B(p_c)^2} = \sqrt{13,146^2 + 1,56^2} = 13,239 \text{ Pa} \quad (41)$$

$$u_C(\Delta p_c) = \sqrt{u_A(\Delta p_c)^2 + u_B(\Delta p_c)^2} = \sqrt{0,241^2 + 13,239^2} = 13,241 \text{ Pa} \quad (42)$$

Tabulka 2: Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak clony

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
Δp_c	810,45 Pa	0,241 Pa	rovnoměrné	1	0,241 Pa
Převodník		1,56 Pa	rovnoměrné	1	1,56 Pa
Hung Chang		13,146 Pa	rovnoměrné	1	13,146 Pa
Δp_c	810,45 Pa				13,241 Pa

Celková nejistota teploty:

$$u_B(T) = \sqrt{u_B(M_T)^2 + u_B(p_T)^2} = \sqrt{0,567^2 + 0,36^2} = 0,624^\circ\text{C} \quad (43)$$

$$u_C(T) = \sqrt{u_A(T)^2 + u_B(T)^2} = \sqrt{0,070^2 + 0,624^2} = 0,628^\circ\text{C} \quad (44)$$

Tabulka 3: Bilanční tabulka nejistot teploty

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
T	28,76°C	0,070°C	rovnoměrné	1	0,070°C
Převodník		0,36°C	rovnoměrné	1	0,36°C
Metex M-3890D		0,567°C	rovnoměrné	1	0,567°C
T	28,76°C				0,628°C

Celková nejistota koeficientu sondy Anubar 485:

Při určování hustoty a objemového průtoku nejsou kovariance mezi odhady vstupních veličin, tak se k výpočtu užije vzorec (6).

Celková nejistota hustoty:

Zdrojem této nejistoty je teplota. Koeficient citlivosti určíme pomocí vztahu (7). Průměrná teplota při měření byla 28,76°C.

$$A_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{p}{RT^2} = -\frac{100900}{287,13 \cdot (273,15 + 28,76)^2} = -3,897 \cdot 10^{-3} \quad (45)$$

$$u_c(\rho) = \sqrt{A_T^2 \cdot u_c^2(T)} = \sqrt{(-3,897 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0,628)^2} = 2,448 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \quad (46)$$

Tabulka 4: Bilanční tabulka nejistoty výpočtu hustoty

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
T	28,76°C	0,628°C	rovnoměrné	-3,897.10 ⁻³	2,448.10 ⁻³ kg/m ³
ρ	1,164kg/m ³				2,448.10 ⁻³ kg/m ³

Celková nejistota objemového průtoku clony Q_{vc} :

Zdroji nejistot jsou hustota a diferenční tlak. Průměrná hodnota naměřeného diferenčního tlaku clony je 810,45Pa. Průměrná hodnota vypočtené hustoty je 1,164kg/m³. Koeficient A_ρ se spočte jako derivace vztahu (20) podle ρ . Koeficient $A_{\Delta pc}$ se spočte rovněž jako derivace vztahu (20) podle Δpc .

$$A_\rho = \frac{\partial Q_V}{\partial \rho} = -\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\Delta p_c}{\rho^2 \sqrt{2\Delta p_c \rho}} =$$

$$= \frac{-0,6021}{\sqrt{1-0,7491^4}} \cdot 0,9947 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,06105^2 \cdot \frac{810,45}{1,164^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 810,45 \cdot 1,164}} = -29,17 \cdot 10^{-3} \quad (47)$$

$$A_{\Delta pc} = \frac{\partial Q_V}{\partial \Delta p_c} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{1}{\sqrt{2\Delta p_c \rho}} =$$

$$= \frac{0,6021}{\sqrt{1-0,7491^4}} \cdot 0,9947 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,06105^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 810,45 \cdot 1,164}} = 4,876 \cdot 10^{-5} \quad (48)$$

$$u_c(Q_V) = \sqrt{A_\rho^2 u_c^2(\rho) + A_{\Delta pc}^2 u_c^2(\Delta p_c)} =$$

$$= \sqrt{(-29,17 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (2,448 \cdot 10^{-3})^2 + (4,876 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (13,241)^2} = 6,496 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} \quad (49)$$

Tabulka 5: Bilanční tabulka nejistot objemového průtoku

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
Δp_c	810,45Pa	13,241Pa	rovnoměrné	-29,17.10 ⁻³	6,456.10 ⁻⁴ m ³ /s
ρ	1,164kg/m ³	2,448.10 ⁻³ kg/m ³	rovnoměrné	4,875.10 ⁻⁵	7,141.10 ⁻⁵ kg/m ³
Q_V	0,079 m ³ /s				6,496.10 ⁻⁴ m ³ /s

Při výpočtu nejistoty koeficientu uvažují, že veličiny objemový průtok a hustota jsou korelované. Hodnota stupně korelace není známa, proto určím maximální hodnotu nejistoty (53) ze vztahu (15). Průměrné hodnoty hustoty a objemového průtoku byly $\rho = 1,164 \text{ kg/m}^3$ a $Q_v = 0,079 \text{ m}^3/\text{s}$. Koeficienty citlivosti jsou určeny jako derivace vztahu (23) podle příslušných veličin.

$$A_\rho = \frac{\partial k}{\partial \rho} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot Q_v}{4 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{170,33} \cdot 0,079}{4 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,164} \cdot 170,33} = 0,253 \quad (50)$$

$$A_{\Delta p_s} = \frac{\partial k}{\partial \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot Q_v \cdot \rho}{4 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s^2} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{170,33} \cdot 0,079 \cdot 1,164}{4 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,164} \cdot 170,33^2} = -1,726 \cdot 10^{-3} \quad (51)$$

$$A_{Q_v} = \frac{\partial k}{\partial Q_v} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot \rho}{2 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{170,33} \cdot 1,164}{2 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,164} \cdot 170,33} = 7,441 \quad (52)$$

$$\begin{aligned} u_c(k) &= \sqrt{A_{\Delta p_s}^2 \cdot u_c^2(\Delta p_s) + A_\rho^2 \cdot u_c^2(\rho) + A_{Q_v}^2 \cdot u_c^2(Q_v) + 2 \cdot A_\rho \cdot A_{Q_v} \cdot u_c(\rho) \cdot u_c(Q_v)} = \\ &= \sqrt{(-1,726 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3,174^2 + 0,253^2 \cdot (2,448 \cdot 10^{-3})^2 + 7,441^2 \cdot (6,496 \cdot 10^{-4})^2 +} \\ &= \sqrt{2 \cdot (-1,726 \cdot 10^{-3}) \cdot 7,441 \cdot 2,448 \cdot 10^{-3} \cdot 6,496 \cdot 10^{-4}} = (53) \\ &= 7,729 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Rozšířená nejistota koeficientu sondy Annubar 485:

Pokud je požadován interval, kde se žádaná hodnota nachází s 95% pravděpodobností výskytu musí se celková nejistota $u_c(k)$ rozšířit pomocí koeficientu k_r . Pokud bude zachováno normální rozložení, tak koeficient k_r bude nabývat hodnoty 2. A rozšířená nejistota se vypočte dle vztahu (54).

$$U(k) = k_r \cdot u_c(k) = 2 \cdot 7,729 \cdot 10^{-3} = 0,0155 \quad (54)$$

Výsledná hodnota koeficientu sondy Annubar 485 je při frekvenci ventilátoru 25Hz v měřicí trati $k = 0,582 \pm 0,016$.

6.2 Stanovení dílčích a celkové nejistoty sondy Annubar 485 pro frekvenci ventilátoru 50Hz

Výpočet všech nejistot jak typu A, typu B a celkových nejistot je naprosto totožné jako v kapitole 6.1 s tím rozdílem, že hodnoty jsou počítány pro frekvenci ventilátoru v měřící trati 50Hz. Z tohoto důvodu jsou zde uvedeny pouze bilanční tabulky jednotlivých nejistot a výpočet celkové a rozšířené nejistoty. Vypočtené a naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 2.

Tabulka 6: Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak sondy

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
Δp_s	723,07 Pa	0,813 Pa	rovnoměrné	1	0,813 Pa
Převodník		0,35 Pa	rovnoměrné	1	0,35 Pa
Metex M-3890D		6,972 Pa	rovnoměrné	1	6,972 Pa
Δp_s	723,07 Pa				7,028 Pa

Tabulka 7: Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak clony

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
Δp_c	3350,25 Pa	2,129 Pa	rovnoměrné	1	2,129 Pa
Převodník		1,56 Pa	rovnoměrné	1	1,56 Pa
Hung Chang		30,670 Pa	rovnoměrné	1	30,670 Pa
Δp_c	3350,25 Pa				30,812 Pa

Tabulka 8: Bilanční tabulka nejistot pro teplotu

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
T	27,99°C	0,227°C	rovnoměrné	1	0,227°C
Převodník		0,36°C	rovnoměrné	1	0,36°C
Metex M-3890D		1,926°C	rovnoměrné	1	1,926°C
T	27,99°C				1,957°C

Tabulka 9: Bilanční tabulka nejistot k výpočtu hustoty

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
T	27,99°C	0,628°C	rovnoměrné	$6,013 \cdot 10^{-6}$	$1,177 \cdot 10^{-5} \text{kg/m}^3$
ρ	$1,170 \text{kg/m}^3$				$1,177 \cdot 10^{-5} \text{kg/m}^3$

Tabulka 10: Bilanční tabulka nejistot pro výpočet objemového průtoku

Veličina	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě; nejistota $u_s(\Delta p_s)$
Δp_c	3350,25 Pa	2,129 Pa	rovnoměrné	$2,395 \cdot 10^{-5}$	$7,379 \text{ m}^3/\text{s}$
ρ	$1,170 \text{ kg/m}^3$	$2,448 \cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3$	rovnoměrné	-0,059	$6,944 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^3$
Q_v	$0,160 \text{ m}^3/\text{s}$				$7,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Celková nejistota koeficientu sondy Annubar 485:

$$A_\rho = \frac{\partial k}{\partial \rho} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot Q_v}{4 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{723,07} \cdot 0,160}{4 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,170} \cdot 723,07} = 0,250 \quad (55)$$

$$A_{\Delta p_s} = \frac{\partial k}{\partial \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot Q_v \cdot \rho}{4 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s^2} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{723,07} \cdot 0,160 \cdot 1,170}{4 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,170} \cdot 723,07^2} = 4,03 \cdot 10^{-4} \quad (56)$$

$$A_{Q_v} = \frac{\partial k}{\partial Q_v} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot \rho}{2 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{723,07} \cdot 1,170}{2 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,170} \cdot 723,07} = 3,617 \quad (57)$$

$$\begin{aligned} u_c(k) &= \sqrt{A_{\Delta p_s}^2 \cdot u_c^2(\Delta p_s) + A_\rho^2 \cdot u_c^2(\rho) + A_{Q_v}^2 \cdot u_c^2(Q_v) + 2 \cdot A_\rho \cdot A_{Q_v} \cdot u_c(\rho) \cdot u_c(Q_v)} = \\ &= \sqrt{(4,03 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 7,028^2 + 0,250^2 \cdot (1,177 \cdot 10^{-5})^2 + 3,617^2 \cdot (7,38 \cdot 10^{-4})^2 +} \\ &= \sqrt{+ 2 \cdot (4,03 \cdot 10^{-4}) \cdot 3,617 \cdot 1,177 \cdot 10^{-5} \cdot 7,38 \cdot 10^{-4}} = \\ &= 3,894 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (58)$$

Rozšířená nejistota koeficientu sondy Annubar 485:

$$U(k) = k_r \cdot u_c(k) = 3,894 \cdot 10^{-3} = 0,011$$

Výsledná hodnota koeficientu sondy Annubar 485 při frekvenci ventilátoru 50Hz je $k = 0,580 \pm 0,011$.

7 METODIKA STANOVENÍ A VÝPOČET NEJISTOTY KOEFICIENTU VÍCEOTVOROVÉ RYCHLOSTNÍ SONDY PRO MĚŘENÍ PRŮTOKU TEKUTIN METODOU MONTE CARLO

Tato kapitola vychází ze zdrojů [4], [5], [7] a [9]. Pro simulaci metody Monte Carlo na PC je použit program Matlab 2010b, ve kterém se budou generátory náhodných čísel generovat hodnoty jednotlivých složek působících na výsledný koeficient k . K simulaci každé složky se využije generátor náhodných čísel, kterým se vygeneruje minimálně 10^6 hodnot z důvodu zajištění dostatečně přesné simulace. Při zvolení menšího počtu hodnot, by mohlo dojít k nepřesnostem simulace. Při větším počtu hodnot může docházet u starších typů PC k problémům s pamětí. Model pro výpočet nejistot vychází ze vztahu pro výpočet koeficientu sondy Annubar 485 (23). Po dosazení všech známých vztahů (22), (21) dostáváme výsledný vztah (59) pro určení působících nejistot.

$$k = \sqrt{\frac{Q_v^2 \rho}{2S^2 \Delta p_s}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{RT} \cdot \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2\Delta p_c} \cdot \frac{p}{RT} \right)^2 \cdot \frac{p}{RT}}{2S^2 \Delta p_s}} \quad (59)$$

Ze vzorce je patrné, že pro simulaci je nutné brát v potaz řadu nejistot. Tyto nejistoty jsou způsobeny chybami měřicích multimetrů jak pro diferenční tlaky sondy a clony, tak i multimetrem pro měření teploty. Dále chybami jednotlivých převodníků fyzikálních veličin na elektrický proud. Uplatní se zde i nejistoty součinitelů průtoku, expanse a průměrů clony a potrubí. Souhrn jednotlivých nejistot je uveden níže.

Tabulka 11: Souhrn působících nejistot pro výpočet koeficientu sondy Annubar 485 pomocí metody Monte Carlo při frekvenci ventilátoru 25Hz

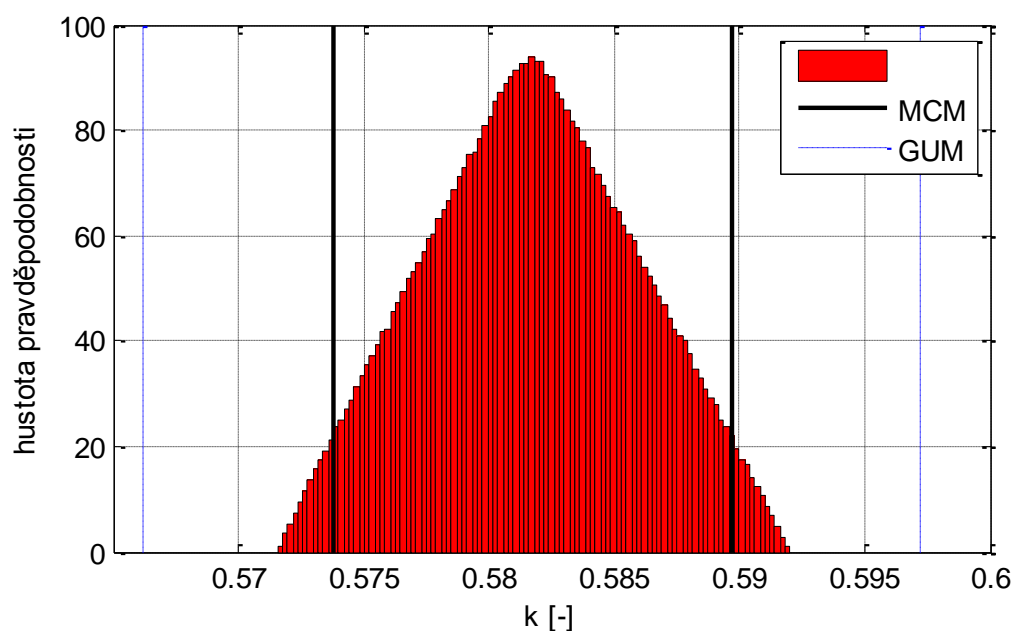
Typ nejistoty	Typ rozdělení	Celková velikost
nejistota multimetru Hung Chang M-3640D pro měření Δp_c	rovnoměrné	13,15 Pa
nejistota multimetru Metex m-3890D pro měření teploty	rovnoměrné	0,57 °C
nejistota multimetru Metex m-3890D pro měření Δp_s	rovnoměrné	3,14 Pa
nejistota převodníku diferenčního tlaku clony na el. Proud	rovnoměrné	1,56 Pa
nejistota převodníku diferenčního tlaku sondy na el. Proud	rovnoměrné	0,35 Pa
nejistota dvou vodičového převodníku výstupního signálu Pt100 na el. proud	rovnoměrné	0,36 °C
nejistota součinitele průtoku		$4,52 \cdot 10^{-3}$
nejistota součinitele expanse		$5,97 \cdot 10^{-4}$
nejistota průměru clony		$4,95 \cdot 10^{-4}$
nejistota průměru potrubí		$4,27 \cdot 10^{-5}$

7.1 Výpočet nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí metody Monte Carlo pro frekvence ventilátoru 25Hz a 50Hz při zvážení jen části nejistot.

V této kapitole budu vycházet z předpokladu že na výsledný koeficient sondy působí nejistoty multimetrů Hung Chang M-3640D reprezentující diferenční tlak clony, Metex m-3890D reprezentující měření teploty, Metex M-3890D reprezentující diferenční tlak sondy a dále nejistoty převodníků diferenčního tlaku clony na el. proud, diferenčního tlaku sondy na el. proud, dvou vodičového převodníku výstupního signálu Pt100 na el. proud. U všech těchto nejistot předpokládám rovnoměrné rozložení.

7.1.1 Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 25 Hz při zvážení jen části nejistot:

Pro výše uvedené nejistoty jsem pomocí programu Matlab 2010b vygeneroval generátorem náhodných čísel 10^6 čísel. Tato náhodná čísla jsem poté dosadil do vztahu (59), čímž jsem získal výslednou hodnotu koeficientu. Poté jsem vypočetl směrodatnou odchylku (což je druhá odmocnina rozptylu) a interval ve kterém výsledná hodnota leží s 95% pravděpodobností výskytu. Výsledný histogram a dosažený výsledek je uveden níže.

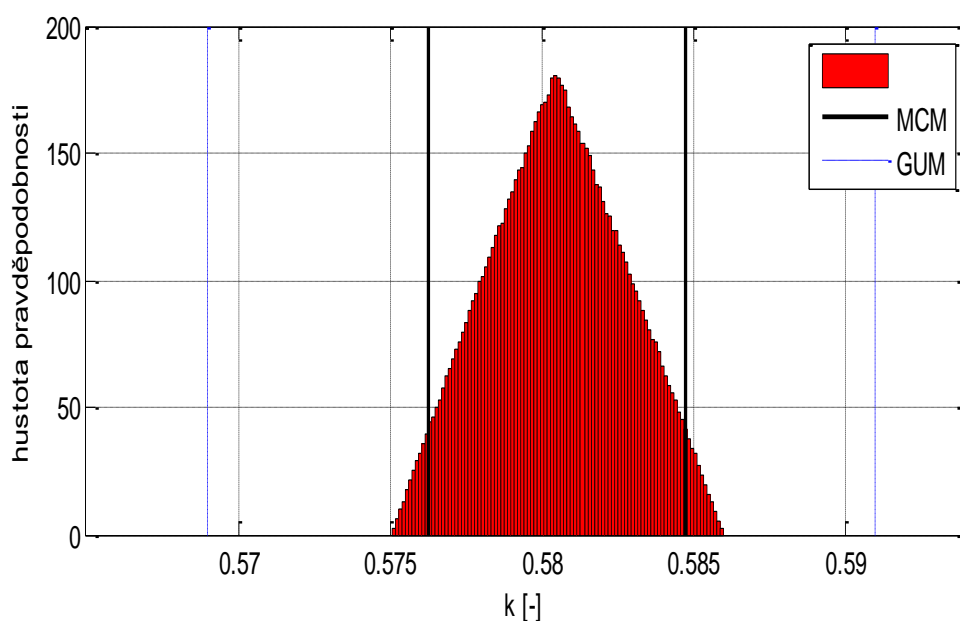


Obrázek 5 Výsledný histogram koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 25 Hz

Po provedení simulace jsem zjistil, že výsledný koeficient sondy Annubar 485 při frekvenci ventilátoru 25 Hz je $k = 0,5817 \pm 0,008$.

7.1.2 Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 50 Hz při zvážení jen části nejistot:

Výpočet nejistoty koeficientu pro frekvenci ventilátoru 50 Hz jsem provedl totožným způsobem jako pro frekvenci ventilátoru 25 Hz s tím rozdílem, že jsem použil hodnoty naměřené a vypočtené pro frekvenci 50 Hz. Výsledný histogram simulace a vypočtená hodnota koeficientu je uvedena níže.



Obrázek 6 Výsledný histogram koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 50 Hz

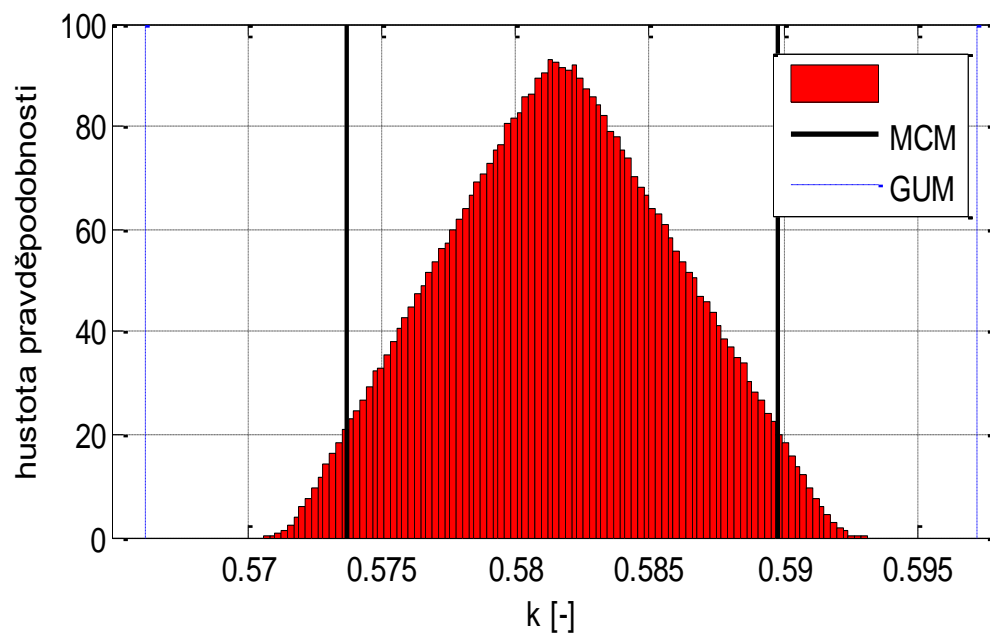
Po provedení simulace jsem opět získal výsledný koeficient sondy Annubar 485 a jeho nejistotu při frekvenci ventilátoru 50 Hz, který je $k = 0,5805 \pm 0,0043$.

7.2 Výpočet nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí metody Monte Carlo pro frekvence ventilátoru 25Hz a 50Hz při zvážení všech známých nejistot.

V této kapitole jsem předpokládal fakt, že ve vztahu (59) pro výpočet koeficientu více-
 tvorové rychlostní sondy působí kromě nejistot uvedených v podkapitole 7.2 i další nejistoty. Jsou to nejistoty od jednotlivých parametrů normalizované clony jako jsou součinitel expanse ε , součinitel průtoku C , poměr průměrů β a průměr otvoru clony d . U těchto nejistot udávaných výrobcem jsem předpokládal rovnoměrné rozložení, protože by mělo tyto nejistoty zahrnovat.

7.2.1 Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 25 Hz při zvažení všech známých nejistot:

V této simulaci jsem vygeneroval 10^6 náhodných čísel pro další nejistoty působící ve vztahu (59) viz. první odstavec kapitoly 7.3, které jsem poté do tohoto vztahu dosadil. Zbytek simulace je naprosto totožný se simulací v kapitole 7.2. Výsledný histogram simulace a dosažený výsledek je uveden níže.

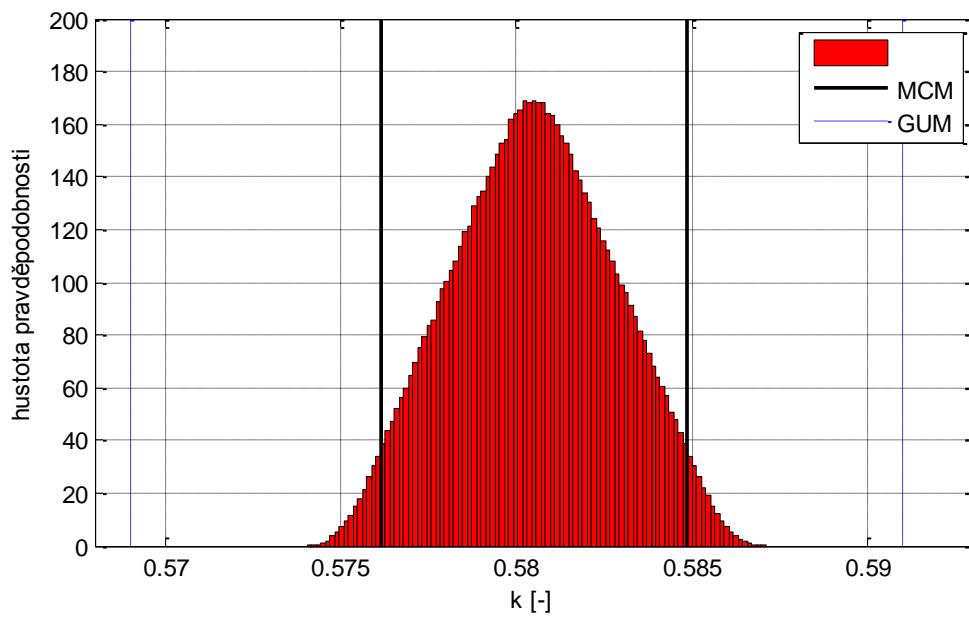


Obrázek 7 Výsledný histogram koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 25 Hz

Ze simulace jsem získal hodnotu výsledného koeficientu a jeho nejistotu, která činila $k = 0,5817 \pm 0,0081$ při zvažení všech známých nejistot a frekvenci ventilátoru 25 Hz.

7.2.2 Výpočet nejistoty koeficientu pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci ventilátoru 50 Hz při zvažení všech známých nejistot:

Simulaci jsem provedl totožným způsobem jako pro frekvenci ventilátoru 25 Hz. Jediným rozdílem je užití naměřených hodnot pro frekvenci ventilátoru 50 Hz. Výsledný histogram simulace a dosažený výsledek je uveden níže.



Obrázek 8 Výsledný histogram koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 50 Hz

Opět jsem ze simulace získal hodnotu výsledného koeficientu a jeho nejistotu, která činila $k = 0,581 \pm 0,0044$ při uvažování všech známých nejistot a frekvenci ventilátoru 50 Hz.

8 POROVNÁNÍ A ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.

V této kapitole budu uvádět dosažené výsledky z mnou provedených výpočtů. Dále zde uvedu vzájemné porovnání a vyhodnocení těchto výsledků.

8.1 Zhodnocení výpočtu koeficientu sondy Annubar 485.

Výpočet koeficientu víceotvorové rychlostní sondy Annubar 485 jsem provedl dvěma způsoby. U prvního způsobu výpočtu jsem použil vztah (18), který vychází z katalogových hodnot. Výpočet druhým způsobem jsem realizoval pomocí vztahu (23) s použitím naměřených hodnot. Dosažené výsledky z obou způsobů výpočtů jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 Vypočtené koeficienty sondy Annubar 485.

koeficient k [-] vypočtený z katalogových hodnot	0,542
koeficient k [-] vypočtený z naměřených hodnot při frekvenci ventilátoru 25 Hz	0,582
koeficient k [-] vypočtený z naměřených hodnot při frekvenci ventilátoru 50 Hz	0,580

Jak je patrné z tabulky 12, koeficient vypočtený z katalogových hodnot se liší oproti koeficientu který je vypočtený z naměřených hodnot jak u frekvence ventilátoru 25 Hz, tak i u frekvence ventilátoru 50 Hz. Tento rozdíl je důsledkem nedostatečné teploty v potrubí při měření.

8.2 Zhodnocení výpočtu celkové nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí klasické metody.

Výpočet celkové nejistoty koeficientu pro frekvence ventilátoru 25 Hz a 50 Hz je uveden v kapitole 6. Po provedení výpočtu jsem získal hodnoty uvedené v tabulce 13.

Tabulka 13 Vypočtené celkové nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot.

celková nejistota koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 25 Hz [-]	0,016
celková nejistota koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 50 Hz [-]	0,011

Z tabulky 13 vyplývá, že nejistoty pro obě frekvence ventilátoru v měřící trati vyšly řádově stejně.

8.3 Zhodnocení výpočtu celkové nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pomocí metody Monte Carlo.

Výpočet celkové nejistoty koeficientu pro frekvence ventilátoru 25 Hz a 50 Hz je uveden v kapitole 7. Po provedení výpočtů a simulací jsem získal hodnoty uvedené v tabulkách 14 a 15.

Tabulka 14 Vypočtené celkové nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot při zvážení jen části nejistot.

celková nejistota koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 25 Hz [-]	0,0080
celková nejistota koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 50 Hz [-]	0,0043

Tabulka 15 Vypočtené celkové nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot při zvážení všech působících nejistot.

celková nejistota koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 25 Hz [-]	0,0081
celková nejistota koeficientu k pro frekvenci ventilátoru 50 Hz [-]	0,0044

Při zvážení všech nejistot působících na vztah (59) je celková nejistota koeficientu větší, což je způsobeno zařazením nejistot konstant do simulace a výpočtu.

9 ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce byl vytvořen základní teoretický rozbor nejistot měření a rozbor stanovení těchto nejistot. Byly zde popsány základní typy nejistot jak u přímých, tak u nepřímých měření. Dále zde byly uvedeny matematické vztahy pro jejich stanovení, viz kapitola 3 a základní charakteristika metody Monte Carlo v kapitole 4. U této metody byly popsány základní principy a způsoby využití především v elektrotechnice.

V praktické části bakalářské práce jsem se zabýval stanovením koeficientu víceotvorné rychlostní sondy Anubar 485 a stanovením celkové nejistoty tohoto koeficientu. Koeficient jsem vypočetl pomocí katalogových hodnot a pomocí naměřených hodnot pro dvě různé frekvence ventilátoru v měřicí trati. Celkovou nejistotu koeficientu jsem stanovil pomocí výpočtu klasickou metodou a metodou Monte Carlo pomocí simulací na PC.

Koeficient sondy vypočtený z katalogových hodnot udávaných výrobcem má hodnotu $k = 0,542$. Koeficient vypočtený pomocí naměřených hodnot má pro frekvenci ventilátoru 25 Hz hodnotu $k = 0,582$ a pro frekvenci ventilátoru 50 Hz hodnotu $k = 0,580$. Důvodem rozdílných výsledků koeficientu vypočteného z katalogových hodnot a koeficientu vypočteného z naměřených hodnot je nedostatečná teplota v měřicí trati během měření.

Celkové nejistoty koeficientu sondy stanovené klasickou metodou pro obě frekvence ventilátoru mají hodnoty $k = 0,582 \pm 0,016$ pro 25 Hz a $k = 0,580 \pm 0,011$ při frekvenci 50 Hz. Hodnota celkové nejistoty stanovená simulací pomocí metody Monte Carlo za předpokladu působení pouze nejistot multimetrů a převodníků je $k = 0,582 \pm 0,008$ při frekvenci 25 Hz a $k = 0,5800 \pm 0,0043$ při frekvenci 50 Hz. Za předpokladu působení i nejistot jednotlivých konstant vyskytujících se ve vztahu (59) jsou hodnoty celkových nejistot $k = 0,5821 \pm 0,0081$ při frekvenci 25 Hz a $k = 0,5800 \pm 0,0044$ při frekvenci 50 Hz. Výsledné histogramy ze simulací pro metodu Monte Carlo jsou na obrázcích 5 až 8.

Je patrné, že celkové nejistoty vypočtené klasickou metodou vyšly vyšší než nejistoty stanovené pomocí metody Monte Carlo. Rozdílné výsledky jsou dány tím, že u metody Monte Carlo počítám pouze s nejistotami měřicích multimetrů, převodníků a konstant oproti klasické metodě, kde se vyskytuje mnohem více vlivů. Dalším důvodem je výpočet prováděný pomocí PC, který také zpřesňuje daný výsledek. Z obrázků 5 a 7 je patrné, že při působení nejistot multimetrů a převodníků se výsledný histogram blíží trojúhelníku, zatímco při působení všech známých nejistot se výsledný histogram deformuje.

LITERATURA

- [1] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. AUTOMA*. 2001, 7, s. 50-54.
- [2] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: *Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. AUTOMA*. 2001, 12, s. 28-33.
- [3] HRUŠKA, K., BRADÍK, J. *Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1656-1.
- [4] FABIAN, F. *Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění*. Praha: Prospektrum, 1998. ISBN 80-7175-058-1.
- [5] KLVAŇA, J. *Principy a aplikace metody Monte Carlo*. Praha: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03587-5.
- [6] ŠEDIVÁ, S., BEJČEK, L. Zkušební měřicí trať průtoku úamnt fekt vut Brno. In *Průtok 2003: sborník ze semináře*. 1. vyd. 2003. ISBN 80-86742-01-6.
- [7] ROSEMOUNT. Rosemount 485 Annubar Flow Handbook [online]. Poslední revise 18.5.2006 [cit.2012-11-7]. Dostupné z:
<<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20documents/00809-0100-1191.pdf>>.
- [8] JCGM. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement [online]. [cit.2012-12-7]. Dostupné z:
<http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf>.
- [9] JCGM. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method [online]. [cit.2013-5-7]. Dostupné z:
<http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf>.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 při frekvenci ventilátoru 25Hz.

Příloha 2. Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 při frekvenci ventilátoru 50Hz.

Příloha 3. Vybrané parametry normalizované clony.

Příloha 4. Simulační skript pro výpočet nejistot pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci 25 Hz při předpokladu působení nejistot multimetrů a převodníků.

Příloha 5. Simulační skript pro výpočet nejistot pomocí metody Monte Carlo pro frekvenci 50 Hz při předpokladu působení nejistot multimetrů, převodníků i konstant.

Příloha 6. CD s elektronickou verzí bakalářské práce.

Příloha 1

Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 při frekvenci ventilátoru 50Hz									
n	I_c [mA]	I_s [mA]	I_t [mA]	T [°C]	Δp_s [Pa]	Δp_c [Pa]	ρ [kg/m ³]	Q_v [m ³ /s]	k [-]
1	18,96	18,54	6,76	25,88	727,00	3366,00	1,175	0,160	0,580
2	18,94	18,42	6,80	26,25	721,00	3361,50	1,174	0,160	0,582
3	18,92	18,48	6,84	26,63	724,00	3357,00	1,172	0,160	0,581
4	18,92	18,46	6,88	27,00	723,00	3357,00	1,171	0,160	0,581
5	18,93	18,54	6,92	27,38	727,00	3359,25	1,169	0,161	0,580
6	18,88	18,44	6,94	27,56	722,00	3348,00	1,169	0,160	0,581
7	18,90	18,56	6,96	27,75	728,00	3352,50	1,168	0,160	0,579
8	18,89	18,50	6,98	27,94	725,00	3350,25	1,167	0,160	0,580
9	18,88	18,36	7,00	28,13	718,00	3348,00	1,166	0,160	0,582
10	18,86	18,40	7,02	28,31	720,00	3343,50	1,166	0,160	0,581
11	18,86	18,50	7,04	28,50	725,00	3343,50	1,165	0,160	0,579
12	18,86	18,42	7,06	28,69	721,00	3343,50	1,164	0,161	0,581
13	18,85	18,50	7,08	28,88	725,00	3341,25	1,164	0,161	0,579
14	18,86	18,36	7,08	28,88	718,00	3343,50	1,164	0,161	0,582
15	18,84	18,44	7,10	29,06	722,00	3339,00	1,163	0,161	0,580
	průměr:			27,79	723,07	3350,25	1,17	0,160	0,580

Příloha 2

Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 při frekvenci ventilátoru 50Hz									
n	I_c [mA]	I_s [mA]	I_t [mA]	T [°C]	Δp_s [Pa]	Δp_c [Pa]	ρ [kg/m ³]	Q_v [m ³ /s]	k [-]
1	18,96	18,54	6,76	25,88	727,00	3366,00	1,175	0,160	0,580
2	18,94	18,42	6,80	26,25	721,00	3361,50	1,174	0,160	0,582
3	18,92	18,48	6,84	26,63	724,00	3357,00	1,172	0,160	0,581
4	18,92	18,46	6,88	27,00	723,00	3357,00	1,171	0,160	0,581
5	18,93	18,54	6,92	27,38	727,00	3359,25	1,169	0,161	0,580
6	18,88	18,44	6,94	27,56	722,00	3348,00	1,169	0,160	0,581
7	18,90	18,56	6,96	27,75	728,00	3352,50	1,168	0,160	0,579
8	18,89	18,50	6,98	27,94	725,00	3350,25	1,167	0,160	0,580
9	18,88	18,36	7,00	28,13	718,00	3348,00	1,166	0,160	0,582
10	18,86	18,40	7,02	28,31	720,00	3343,50	1,166	0,160	0,581
11	18,86	18,50	7,04	28,50	725,00	3343,50	1,165	0,160	0,579
12	18,86	18,42	7,06	28,69	721,00	3343,50	1,164	0,161	0,581
13	18,85	18,50	7,08	28,88	725,00	3341,25	1,164	0,161	0,579
14	18,86	18,36	7,08	28,88	718,00	3343,50	1,164	0,161	0,582
15	18,84	18,44	7,10	29,06	722,00	3339,00	1,163	0,161	0,580
	průměr:			27,79	723,07	3350,25	1,17	0,160	0,580

Příloha 3

Parametry normalizované clony	
Typ	hodnota
Součinitel průtoku C	0,6021
Součinitel expanse ε	0,9947
Poměr průměrů β	0,7491
Průměr otvoru clony d při prov. podmínkách	61,0500

Nejistoty parametrů normalizované clony	
Typ	hodnota
Součinitel průtoku C [%]	0,75
Součinitel expanse ε [%]	0,06
Poměr průměrů β [%]	0,40
Průměr clony d [%]	0,07

Příloha 4

```
clear all;
clc;

%pocet opakovani metody
M = 1000000;

%vygenerovani nahodnych hodnot pro diferencni tlak sondy
Isondy = 170.33; %prumerna hodnota dif. tlaku sondy
dIsondy = 3.164; %nejistota sondy
nahIsondy = Isondy-dIsondy + (2*dIsondy).*rand(1,M); %vygenerovani nahodnych cisel pro diferencni tlak sondy

%vygenerovani nahodnych hodnot pro diferencni tlak clony
Iclony = 792.44; %prumerna hodnota dif. tlaku clony
dIclony = 13.239; %nejistota clony
nahIclony = Iclony-dIclony + (2*dIclony).*rand(1,M); %vygenerovani nahodnych cisel pro diferencni tlak clony

%vygenerovani nahodnych hodnot pro teplotu v merici trati
Iteploty = 28.76; %prumerna hodnota teplota
dIteploty = 0.624; %nejistota teploty
nahIteploty = Iteploty-dIteploty + (2*dIteploty).*rand(1,M); %vygenerovani nah. hodnot pro teplotu v mer. trati

nahIteploty=nahIteploty+273.15; %prevod teploty na kelviny
ro=100900./(287.13.*nahIteploty); %vypocet hustoty vzduchu
Qv=(1./ro).*((0.6021)/sqrt(1-0.7491^4))*(0.9947)*(pi/4)*(0.06105^2).*(sqrt(2*nahIclony.*ro)); %vypocet obje-
moveho prutoku
f=((Qv.^2.*ro)./((2*0.007854^2).*nahIsondy));
k=sqrt(f); %vypcet koeficientu
prumer=mean(k); %vypocet prumerne hodnoty koeficientu
```



```

% smerodatna odchylka
soucet=0;
for i=1:M
soucet=soucet+(k(i)-prumer)^2;
end
odchylka=sqrt(1/(M-1)*soucet);
% vypočet intervalu
prav=0.95;
q=prav*M;
r=(M-q)/2;
k=sort(k);
dolni = k(r);
horni = k(r+q);
format long g
nejistota = horni - prumer;
figure(1);
[F,X]=ecdf(nahIsondy);
ecdfhist(F,X,100)
figure(2);
[F,X]=ecdf(nahIclony);
ecdfhist(F,X,100)
figure(3);
[F,X]=ecdf(nahIteploty);
ecdfhist(F,X,100)
figure(4);
[F,X]=ecdf(k);
ecdfhist(F,X,100)
% vykreslení jednotlivých intervalu pro GUM i MMC
line([dolni dolni],[0 100],'Color','k','LineWidth',2)
hold on
legend('','MCM')
line([0.5817+0.0155 0.5817+0.0155],[0 100],'Color','k','LineStyle','--','LineWidth',1)
legend('','MCM','GUM')
hold on
line([horni horni],[0 100],'Color','k','LineWidth',2)
hold on
line([0.5817-0.0155 0.5817-0.0155],[0 100],'Color','k','LineStyle','--','LineWidth',1)

```

Příloha 5

```
clear all;
clc;

%pocet opakovani metody
M = 1000000;

%vygenerovani nahodnych hodnot pro diferencni tlak sondy
Isondy = 723.07; %prumerna hodnota dif. tlaku sondy
dIsondy = 6.981; %nejistota sondy
nahIsondy = Isondy-dIsondy + (2*dIsondy).*rand(1,M); %vygenerovani nah. cisel pro diferencni tlak sondy

%vygenerovani nahodnych hodnot pro diferencni tlak clony
Iclony = 3350.25; %prumerna hodnota dif tlaku clony
dIclony = 30.738; %nejistota clony
nahIclony = Iclony-dIclony + (2*dIclony).*rand(1,M); %vygenerovani nah. cisel pro diferencni tlak clony

%vygenerovani nahodnych hodnot pro teplotu v merici trati
Iteploty = 27.79; %prumerna hodnota teplota
dIteploty = 1.944; %nejistota teploty
nahIteploty = Iteploty-dIteploty + (2*dIteploty).*rand(1,M); %vygen. nah. hodnot pro teplotu v merici trati

%vygenerovani nahodnych hodnot pro soucinitel expanze
Ieps= 0.9947; %hodnota eps
dIeps = 0.000597; %nejistota eps
nahIeps = Ieps-dIeps + (2*dIeps).*rand(1,M); %vygenerovani nahodnych hodnot pro eps

%vygenerovani nahodnych hodnot pro soucinitel prutoku C
IC= 0.6021; %hodnota C
dIC = 0.004516; %nejistota C
nahIC = IC-dIC + (2*dIC).*rand(1,M); %vygenerovani nahodnych hodnot pro C
```

```

%vygenerovani nahodnych hodnot pro pomer prumeru beta
IB= 0.7491; %hodnota beta
dIB = 0.000495; %nejistota beta
nahIB = IB-dIB + (2*dIB).*rand(1,M); %vygenerovani nahodnych hodnot beta

%vygenerovani nahodnych hodnot pro prumer otvoru clony d
IO= 0.06105; %hodnota d
dIO = 0.0000427; %nejistota d
nahIO = IO-dIO + (2*dIO).*rand(1,M); %vygenerovani nahodnych hodnot d

nahIteploty=nahIteploty+273.15; %prevod teploty na kelviny
ro=100900./(287.13.*nahIteploty); % vypočet hustoty vzduchu
Qv=(1./ro).*((nahIC)/sqrt(1-nahIB.^4)).*(nahIeps).*(pi/4).*(nahIO.^2).*(sqrt(2*nahIclony.*ro)); % vypočet ob-
jemoveho prutoku
f=(Qv.^2.*ro)./((2*0.007854^2).*nahIsondy));
k=sqrt(f); %vypočet koeficientu
prumer=mean(k); %vypočet prumerne hodnoty koeficientu

figure(1); %vykresleni histogramu pro diferencni tlak sondy
[F,X]=ecdf(nahIsondy);
ecdfhist(F,X,100)
figure(2); %vykresleni histogramu pro diferencni tlak clony
[F,X]=ecdf(nahIclony);
ecdfhist(F,X,100)
figure(3); %vykresleni histogramu teploty
[F,X]=ecdf(nahIteploty);
ecdfhist(F,X,100)
figure(4); %vykresleni histogramu soucinitele expanse
[F,X]=ecdf(nahIeps);
ecdfhist(F,X,100)
figure(5); %vykresleni histogramu soucinitele prutoku C
[F,X]=ecdf(nahIC);
ecdfhist(F,X,100)
figure(6); %vykresleni histogramu pomeru prumeru beta
[F,X]=ecdf(nahIB);

```

```

ecdfhist(F,X,100)
figure(7);
[F,X]=ecdf(nahIO);
ecdfhist(F,X,100)
figure(8);
[F,X]=ecdf(k);
ecdfhist(F,X,100)
grid on
hold on

% smerodatna odchylka
soucet=0;
for i=1:M
    soucet=soucet+(k(i)-prumer)^2;
end
odchylka=sqrt(1/(M-1)*soucet);
% vypocet intervalu vyskytu
p=0.95;
q=p*M;
r=(M-q)/2;
k=sort(k);
dolni = k(r);
horni = k(r+q);
format long g
nejistota = horni - prumer;
%% vykresleni intervalu vyskytu pro metodu Monte carlo a GUM
line([dolni dolni],[0 200],'Color','k','LineWidth',2)
hold on
legend('','MCM')
line([0.580+0.011 0.580+0.011],[0 200],'Color','k','LineStyle','--','LineWidth',1)
legend('','MCM','GUM')
hold on
line([horni horni],[0 200],'Color','k','LineWidth',2)
hold on
line([0.580-0.011 0.580-0.011],[0 200],'Color','k','LineStyle','--','LineWidth',1)

```

% vykresleni histogramu d

% vykresleni histogramu koeficientu