



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## VYUŽITÍ PROGRAMU LABVIEW PRO STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ

USING LABVIEW TO DETERMINE MEASUREMENT UNCERTAINTY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Hoferková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Studentka:** Kateřina Hoferková

**ID:** 200344

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### Využití programu LabVIEW pro stanovení nejistoty měření

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a tvorba programu v prostředí LabVIEW pro stanovení nejistoty měření.

- 1) Proveďte literární rešerši v oblasti stanovení nejistoty měření na základě postupu GUM a metodou Monte Carlo se zaměřením na využití dostupného softwarového vybavení pro výpočet.
- 2) Navrhněte metodiku stanovení nejistoty přímého měření pomocí obou metod v prostředí LabVIEW. Dále navrhněte postup stanovení nejistoty nepřímého měření pro jednoduché modely výpočtu výstupní veličin (součet, rozdíl, součin a podíl vstupních veličin)
- 3) Realizujte program v prostředí LabVIEW pro výpočet nejistoty měření metodou GUM i metodou Monte Carlo dle bodu č. 2 zadání. Uživatel programu má možnost zadávat vstupní naměřená data, uložit dosažené výsledky, provést srovnání vypočtených nejistot daného měření oběma metodami.
- 4) Ověřte funkčnost programu a program vhodným způsobem v práci dokumentujte.
- 5) Zhodnoťte dosažené výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Joint Committee for Guides in Metrology, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", Geneva, International Organization for Standardization, 1st edition, BIPM, Sevres-France, 2008.
- [2] Joint Committee for Guides in Metrology, Evaluation of Measurement Data - Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" - Propagation of Distribution Using a Monte Carlo Method" 1st edition, BIPM, Sevres-France, 2008.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

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

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

#### 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**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku stanovení nejistoty měření. Teoretické znalosti o postupech určování nejistoty měření jsou shrnuty v teoretické části, zatímco praktická část se zaměřuje na realizaci programu v prostředí LabVIEW 2017. Bakalářská práce rozebírá postupy určování nejistoty dle GUM, tedy standardní nejistotu typu A, standardní nejistotu typu B, kombinovanou nejistotu a rozšířenou nejistotu. Zaměřuje se kromě stanovení nejistoty přímého měření také na určování nejistot při nepřímých měřeních a na metodu Monte Carlo. Přiložený program v LabVIEW umožňuje uživateli zadávat vstupní data pro stanovení nejistoty měření. Program počítá nejistotu měření podle postupu GUM a také metodou Monte Carlo. Výsledky stanovení nejistoty měření je možné volitelně uložit do souboru pro lepší archivaci.

## **Klíčová slova**

Nejistota měření, GUM, metoda Monte Carlo, LabVIEW, software, standardní nejistota typu A, standardní nejistota typu B, kombinovaná nejistota, rozšířená nejistota

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on problematics of determining the measurement uncertainty. In the theoretical part of the thesis there is a theory of the procedure of determining the uncertainty of the measurement. The practical part of the thesis is focused on the realization of the program created in LabVIEW 2017. The bachelor thesis is about a determining the measurement uncertainty according to GUM, the standard uncertainty of type A, the standard uncertainty of type B, the combined uncertainty and the expanded uncertainty. The thesis is focused on determining the measurement uncertainty of direct measurements, indirect measurements and Monte Carlo method. The enclosed LabVIEW program enables to insert the data to determine the measurement uncertainty. The program determines the measurement uncertainty according to GUM and Monte Carlo method. The results of a calculation can be optionally saved to a file for an archiving.

## **Keywords**

Uncertainty of measurement, GUM, Monte Carlo method, LabVIEW, software, standard uncertainty of type A, standard uncertainty of type B, combined uncertainty, expanded uncertainty

## **Bibliografická citace:**

HOFERKOVÁ, Kateřina. *Využití programu LabVIEW pro stanovení nejistoty měření*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126796>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Využití programu LabVIEW pro stanovení nejistoty měření jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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: 6. června 2020

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

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

V Brně dne: 6. června 2020

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	12
2	Nejistoty měření podle GUM.....	13
2.1	Definice nejistoty měření .....	13
2.2	Standardní nejistota typu A.....	13
2.3	Standardní nejistota typu B .....	14
2.4	Kombinovaná nejistota.....	16
2.5	Rozšířená nejistota .....	16
2.6	Zápis nejistoty měření .....	17
2.7	Nejistoty při nepřímých měřeních.....	18
2.7.1	Nekorelované veličiny .....	18
2.7.2	Korelované veličiny .....	18
2.7.3	Určení kovariancí pomocí metody typu A.....	19
2.7.4	Určení kovariancí pomocí metody typu B.....	19
3	Nejistoty měření a metoda Monte Carlo .....	21
3.1	Postup při aplikaci metody Monte Carlo u stanovení nejistoty měření .....	22
4	LabVIEW a jeho využití při stanovení nejistot měření.....	25
4.1	Prostředí LabVIEW.....	25
4.2	Funkce a struktury podstatné pro stanovení nejistoty měření v LabVIEW .....	28
5	Program pro stanovení nejistot měření v LabVIEW .....	31
5.1	Návrh programu .....	31
5.2	VI pro výpočet nejistoty měření podle GUM .....	32
5.2.1	Výpočet standardní nejistoty typu A .....	32
5.2.2	Výpočet standardní nejistoty typu B.....	33
5.2.3	Výpočet kombinované nejistoty .....	34
5.2.4	Výpočet rozšířené nejistoty .....	34
5.2.5	Nejistota nepřímého měření pro čtyři modely výpočtu výstupní veličiny	35
5.2.5.1	Výpočet nejistoty pro součet dvou vstupních veličin.....	35
5.2.5.2	Výpočet nejistoty pro rozdíl dvou vstupních veličin.....	35
5.2.5.3	Výpočet nejistoty pro součin dvou vstupních veličin.....	35
5.2.5.4	Výpočet nejistoty pro podíl dvou vstupních veličin.....	36



5.3	VI pro výpočet nejistoty měření metodou Monte Carlo .....	36
5.3.1	VI pro generování náhodných čísel ve zvoleném rozdělení pravděpodobnosti.....	38
5.4	Načítání ze souboru a ukládání do souboru .....	39
6	Uživatelský návod k obsluze programu pro výpočet nejistot měření .....	40
6.1	Zadávání vstupních dat .....	40
6.1.1	Zadání údajů pro výpočet maximální chyby.....	42
6.1.2	Zadání maximální chyby .....	42
6.1.3	Zadání rozšířené nejistoty .....	42
6.2	Zobrazení dosažených výsledků .....	42
6.3	Nápověda k programu .....	43
6.4	Načítání dat ze souboru a ukládání výsledků do souboru .....	43
7	Testování programu pro výpočet nejistot měření v LabVIEW .....	46
7.1	Příklad 1 – přímé měření.....	46
7.2	Příklad 2 – nepřímé měření (podíl) .....	49
7.3	Příklad 3 – nepřímé měření (součet) .....	51
7.4	Zhodnocení dosažených výsledků.....	53
7.4.1	Zhodnocení 1. příkladu .....	53
7.4.2	Zhodnocení 2. příkladu .....	54
7.4.3	Zhodnocení 3. příkladu .....	55
8	Závěr .....	57

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Přehled rozložení pravděpodobnosti a hodnot koeficientu $k$ [4].....	15
Obrázek 2: Grafické znázornění nejistot měření [4].....	17
Obrázek 3: Bilanční tabulka [4].....	17
Obrázek 4: Srovnání přístupů GUM a metody Monte Carlo ke stanovení nejistoty měření [15].....	22
Obrázek 5: Schéma algoritmu pro stanovení nejistoty měření metodou Monte Carlo [17].....	23
Obrázek 6: Příklad blokového diagramu v LabVIEW pro metodu Monte Carlo [11] .....	24
Obrázek 7: Prázdný projekt v LabVIEW .....	25
Obrázek 8: Čelní panel v LabVIEW (prázdný) .....	26
Obrázek 9: Blokový diagram v LabVIEW (prázdný).....	26
Obrázek 10: Menu <i>Controls</i> a <i>Functions</i> .....	27
Obrázek 11: Konektor a ikona .....	27
Obrázek 12: Jednoduchý paralelní kód v LabVIEW .....	28
Obrázek 13: Jednoduchý stavový automat v LabVIEW.....	29
Obrázek 14: Ikona <i>Two button dialog</i> .....	29
Obrázek 15: Ikona <i>Continuous Random</i> .....	30
Obrázek 16: Ikona <i>Histogram</i> .....	30
Obrázek 17: Ikona <i>Standard Deviation and Variance</i> .....	30
Obrázek 18: Stav <i>Vypocet</i> , v němž dochází k volání VI pro stanovení nejistoty měření .....	32
Obrázek 19: Vynásobení standardní nejistoty typu A koeficientem $k$ pro $n = 3$ .....	33
Obrázek 20: <i>Case</i> struktura pro výpočet maximální chyby měřicího přístroje .....	34
Obrázek 21: Výpočet kombinované nejistoty.....	34
Obrázek 22: <i>Case</i> struktura pro výběr rozdělení pravděpodobnosti.....	37
Obrázek 23: <i>Case</i> struktura pro výběr modelu výpočtu pro metodu Monte Carlo... ..	37
Obrázek 24: Stanovení nejistoty měření podle metody Monte Carlo.....	38
Obrázek 25: SubVI pro generování náhodných čísel v normálním rozložení pravděpodobnosti.....	38
Obrázek 26: SubVI pro načítání dat ze souboru .....	39

Obrázek 27: SubVI pro ukládání výsledků do souboru .....	39
Obrázek 28: Hlavní ovládací prvky programu mimo záložky .....	40
Obrázek 29: Výběr modelu výpočtu výstupní veličiny .....	40
Obrázek 30: Cluster pro zadání údajů pro výpočet standardní nejistoty typu B .....	41
Obrázek 31: Kolonky pro dosažené výsledky pomocí GUM a metody Monte Carlo .....	43
Obrázek 32: Dialogové okno pro načtení dat ze souboru .....	44
Obrázek 33: Kolonka pro výběr souboru pro načtení vstupních dat pro standardní nejistotu typu A .....	44
Obrázek 34: Dialogové okno pro ukládání výsledků do souboru .....	44
Obrázek 35: Zadávané údaje prvního zdroje nejistoty pro výpočet standardní nejistoty typu B u Příkladu 1 .....	47
Obrázek 36: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 1 podle GUM .....	48
Obrázek 37: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 1 podle metody Monte Carlo .....	49
Obrázek 38: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 2 podle GUM .....	50
Obrázek 39: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 2 podle metody Monte Carlo .....	51
Obrázek 40: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 3 pomocí GUM .....	52
Obrázek 41: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 3 pomocí metody Monte Carlo .....	53

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty rozšiřujícího koeficientu $k_A$ pro různé počty měření $n$ [5].....	14
Tabulka 2: Naměřené hodnoty průměru válečku k Příkladu 1 [4] .....	46
Tabulka 3: Naměřené hodnoty napětí k Příkladu 2 [14].....	50
Tabulka 4: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 1 pomocí GUM .....	54
Tabulka 5: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 1 pomocí metody Monte Carlo	54
Tabulka 6: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 2 pomocí GUM .....	55
Tabulka 7: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 2 pomocí metody Monte Carlo	55
Tabulka 8: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 3 pomocí GUM .....	56
Tabulka 9: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 3 pomocí metody Monte Carlo	56

# 1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se bude zabývat teoretickým i praktickým rozбором problematiky týkající se nejistot měření, a to přímých i nepřímých. Hlavním cílem bude následná realizace programu pro výpočet nejistot přímých měření v prostředí LabVIEW s pomocí směrnice GUM, celým názvem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [1]. Nejistota je důležitou součástí výsledku měření, protože žádný přístroj ani člověk nedokážou měřit absolutně přesně.

Aby se chyby, jež jsou součástí naměřených hodnot, komplexně odrazily do konečného výsledku, byl zaveden pojem nejistota měření. Tento systém, který podává informaci o tom, že se pravá hodnota nachází s danou pravděpodobností v určitém intervalu, nahradil dříve používaný koncept chyb měření, který se již stal nevyhovujícím.

V teoretické části této bakalářské práce bude blíže popsán systém stanovování nejistot měření, klasifikace typů nejistot a jejich definice dle GUM. V teoretické části bude také uvedena a popsána metoda Monte Carlo [10], která se též používá pro výpočet nejistot měření. Tyto dva přístupy ke stanovování nejistoty měření budou sloužit i jako podklad pro vytvoření programu pro výpočet nejistot měření v LabVIEW.

Realizace programu v LabVIEW bude součástí praktické části této bakalářské práce, kdy bude cílem vytvořit prostředí pro uživatele, který bude moci zadávat vstupní data přímého i nepřímého měření pro oba přístupy ve stanovování nejistoty měření. Dosažené výsledky bude možné po skončení výpočtu volitelně uložit do souboru pro lepší archivaci.

Program v LabVIEW bude obsahovat dvě hlavní VI (Virtual Instrument) – jedno pro stanovení nejistoty měření metodou Monte Carlo a druhé pro výpočet nejistoty měření pomocí postupů popsaných ve směrnici GUM.

V rámci bakalářské práce bude tedy popsáno využití LabVIEW pro vytvoření programu k výpočtu nejistoty měření, přiložen bude také návod pro uživatele k snadné obsluze vytvořeného programu. Nedílnou součástí bude i testování tohoto programu na ukázkových a již vypočítaných příkladech stanovení nejistoty měření.

V závěru bakalářské práce proběhne zhodnocení a shrnutí dosažených výsledků.

## 2 NEJISTOTY MĚŘENÍ PODLE GUM

V minulosti se stupňovala potřeba nové metodiky pro zpracovávání výsledků měření, protože žádné měření není úplně perfektní. Původní chyby měření se začaly ukazovat jako nedostačující koncept a Mezinárodní výbor pro váhy a míry začal pracovat na systému pro určování nejistot měření. Směrnice, podle které se určují nejistoty v měření, je Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement neboli zkráceně GUM [1]. Ta vyšla v platnost v roce 1993.

### 2.1 Definice nejistoty měření

Nejistota měření kvantitativně doplňuje výsledek měření údajem o jeho kvalitě, protože samotné měření není nikdy naprosto přesné [1]. To je dáno tím, že v reálném světě neexistuje přístroj ani člověk, kteří by mohli být dokonalí v určování výsledků. Nejistota měření určuje „rozsah hodnot, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině“ [2].

Samotných zdrojů nejistot je mnoho a v první řadě je podstatné zjistit, jak se projevují. Nejistoty měření se dělí na dva typy, jimiž jsou standardní nejistota typu A a standardní nejistota typu B. Některé zdroje se mohou více projevit v nejistotě typu A, jiné zase v typu B. Problém může nastat, když se zdroje projeví v obou typech nejistot a jedna ze složek je při výpočtech opomenuta [2].

Nejčastějšími zdroji nejistot může být nedokonalá realizace měřicího procesu či nedostatečná definice požadavků na test, osobní zvyky při odečítání z přístrojů, nedostatečné znalosti vlivů podmínek při měření, fluktuace okolních podmínek při měření, které nebyly zaznamenány, nebo například změny ve výkonu měřicího přístroje. Pokud je nějaká nejistota oproti jiným zastoupena velmi malou hodnotou, lze ji zanedbat a dále brát v úvahu pouze dominantní zdroje nejistot. Poměr zanedbané nejistoty vzhledem k dominantní by měl pak být nižší než 10 % [3].

### 2.2 Standardní nejistota typu A

Pro nejistotu vyhodnocovanou metodou A, která se značí jako  $u_A(x)$ , je důležité mít k dispozici několik opakovaných měření, podstatné pak je, aby všechna měření proběhla za totožných podmínek a také aby na sobě byla nezávislá. Nejistota vzniká tak, že výsledky v opakovaných měřeních kolísají a všechny získané hodnoty nejsou naprosto stejné [2]. Chyby v tomto typu nejistoty mají náhodný charakter [3].

Je dobré mít vyšší počet opakování měření, nejméně pak deset. Počet opakovaných měření označíme jako  $n$ , pokud je příliš malý, není určení této nejistoty příliš spolehlivé. Pokud nelze naměřit minimálně 10 hodnot, postupuje se podle rovnice (3) uvedené níže, pokud je známý průřezový rozptyl.

Při přímých měřeních se u této nejistoty jedná o běžné statistické zpracování naměřených dat. Výsledek měření několikrát po sobě se pak vyhodnotí jako aritmetický průměr [2] z rovnice (1). V tomto případě je  $n$  počet měření a  $x$  představuje hodnotu měřené veličiny.

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

Standardní nejistota typu A se pak rovná směrodatné odchylce aritmetického průměru [4]. V následující rovnici (2) je  $s_{\bar{x}}$  směrodatná odchylka aritmetického průměru,  $n$  počet měření a  $x$  hodnota dané měřené veličiny.

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

Pokud je počet měření  $n < 10$ , je nutné vypočítat nejistotu typu A s pomocí průřezového rozptylu podle vzorce (3), kde  $s_{pr}^2$  je průřezový rozptyl a  $n$  je počet měření [4].

$$u_A(x) = \frac{s_{pr}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Při menším počtu měření než 10, lze také využít vynásobení nejistoty měření rozšiřujícím koeficientem podle příslušného počtu měření. Pokud by nedošlo k vynásobení tímto koeficientem, tak se snižujícím se počtem měření klesá věrohodnost výsledné nejistoty měřené veličiny. Rozšiřující koeficient ale tento jev kompenzuje, jeho hodnoty jsou přehledně uvedeny v následující Tabulce 1, kde  $n$  je počet měření a  $k_A$  je rozšiřující koeficient [5].

**Tabulka 1: Hodnoty rozšiřujícího koeficientu  $k_A$  pro různé počty měření  $n$  [5]**

$n$	10	9	8	7	6	5	4	3	2
$k_A$	1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

## 2.3 Standardní nejistota typu B

Nejistota typu B je založena na jiném principu, než je statistické zpracování u nejistoty typu A. Pro určení této nejistoty je třeba uvažovat údaje, které udává výrobce daného měřicího přístroje, poté také vlastní či cizí zkušenosti z měření prováděných v minulosti [2]. Chyby v nejistotě vyhodnocené metodou B mají charakter systematický, tedy soustavný [3].

Tato nejistota se skládá dohromady z několika různých zdrojů (jejich počet označíme jako  $j$ ), které ji ovlivňují. Pomocí maximální odchylky daného zdroje nejistoty  $Z_{jmax}$  se v rovnici (4) vydělením součinitelem  $k$  získá nejistota typu B daného zdroje.

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (4)$$

Součinitel  $k$  se určí podle rozdělení pravděpodobnosti, které je třeba znát. Někdy výrobce měřicího přístroje už udává přímo danou nejistotu B, takže výpočet není nutný [2].

Rozdílná rozdělení pravděpodobnosti se používají v různých případech podle toho, jaký má uživatel záměr. Aproximace **normálním** (Gaussovým) rozdělením se využije, pokud se mohou častěji objevit malé odchylky od jmenovité hodnoty. Pokud jsou odchylky větší, jejich pravděpodobnost výskytu je při tomto rozdělení menší [4]. Například pro normální rozdělení se součinitel  $k$  rovná 2, popřípadě 3 [2].

**Rovnoměrné** rozdělení se používá v případě, že je pravděpodobnost objevu výchylky v celém intervalu stejná a také pokud o výskytu odchylek nejsou dostačující informace, což se v praxi stává. Jedná se tedy o rozdělení, které je v reálném provozu (i konkrétně v elektrotechnice) velmi často používáno [4].

Rozdělení pravděpodobnosti **trojúhelníkové** je svým tvarem podobné rozdělení normálnímu a **bimodální** rozdělení se používá u měřicích zařízení, které mají dány jisté třídy přesnosti [4]. Hodnoty součinitele  $k$  pro různá pravděpodobnostní rozdělení je možné vidět v následujícím přehledovém Obrázku 1, který obsahuje i grafické zobrazení rozložení pravděpodobnosti.

Rozdělení	$z_{max}$	$k$	Rozdělení	$z_{max}$	$k$
normální (Gaussovo) 	$a$	3	rovnoměrné - pravoúhlé 	$a$	$\sqrt{3}$ 1,73
trojúhelníkové (Simpsonovo) 	$a$	$\sqrt{6}$ 2,45	bimodální (trojúhelníkové) 	$a$	$\sqrt{2}$ 1,41
lichoběžníkové 	$a$	2,32 při $b = \frac{a}{3}$	bimodální (Diracovo) 	$a$	1
	$a$	2,19 při $b = \frac{a}{2}$			
	$a$	2,04 při $b = \frac{2a}{3}$			

Obrázek 1: Přehled rozložení pravděpodobnosti a hodnot koeficientu  $k$  [4]



Přesný postup pro určení tohoto typu nejistoty začíná odhadem zdrojů nejistot. Informace jsou k dispozici z nejrůznějších katalogových listů k přístrojům, z technické dokumentace, tabulek nebo také z odhadů provedených na základě znalostí a zkušeností technika. Důležité je neopomenout vztah mezi jednotlivými zdroji nejistot, vše se zkompletuje do nejistoty typu B podle následujícího vzorce (5), kde  $u_{Bj}$  jsou nejistoty jednotlivých zdrojů, jejichž počet je označen jako index  $j$  [4].

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{Bj}^2} \quad (5)$$

V případě, že je potřeba vypočítat maximální odchylku daného zdroje nejistoty  $z_{jmax}$  z chyby z hodnoty a chyby z rozsahu, za  $z_{jmax}$  se dosadí vztah z následující rovnice (6), kde  $X_m$  je měřená hodnota (její průměr),  $\delta_m$  je chyba z hodnoty v procentech,  $X_r$  je rozsah měřicího přístroje a  $\delta_r$  je chyba z rozsahu v procentech [7].

$$z_{jmax} = \frac{\delta_m * X_m + \delta_r * X_r}{100} \quad (6)$$

## 2.4 Kombinovaná nejistota

Tato nejistota se jednoduše vypočítá ze standardní nejistoty typu A a ze standardní nejistoty typu B a definuje pravou hodnotu měřené veličiny s pravděpodobností asi 60 %. Vznikne z geometrického součtu nejistot typu A a B a výsledné číslo tedy společně vyjadřuje standardní nejistotu typu A i typu B. Vzorec (7) vypadá následovně,  $u_A(x)$  a  $u_B(x)$  v něm představují standardní nejistoty typu A a B pro měřenou veličinu  $x$  [4].

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (7)$$

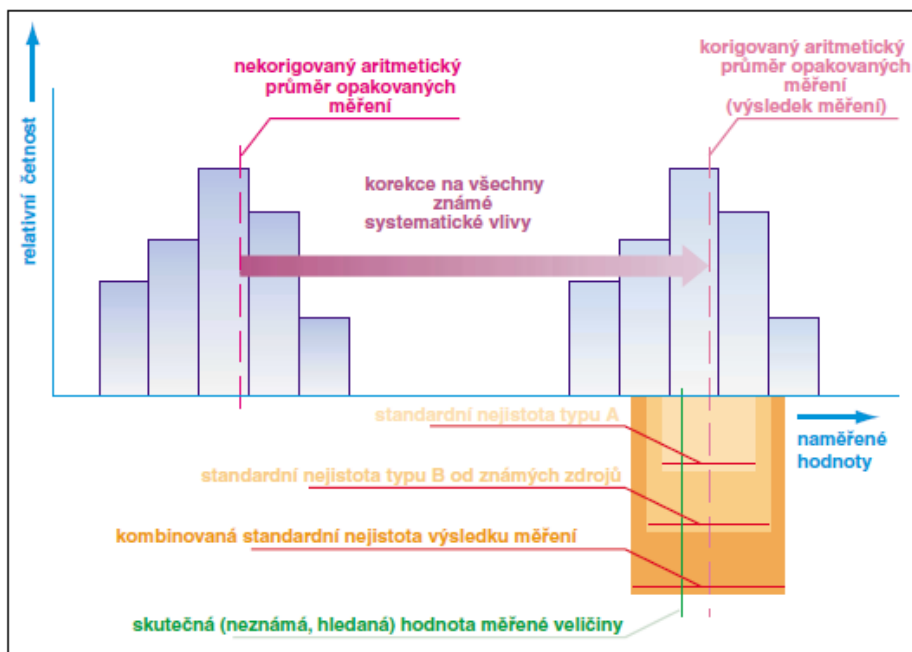
## 2.5 Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota je určená pro případy, kdy už nestačí jen standardní nejistoty, protože kombinovaná nejistota definuje pravou hodnotu měřené veličiny s nevysokou pravděpodobností [4].

K vytvoření rozšířené nejistoty používáme takzvaný koeficient rozšíření  $k_r$ . Interval se zvětší, čímž dojde k tomu, že se zvýší pravděpodobnost určení až k hodnotám více se přibližujícím 100 %. Význam koeficientu  $k_r$  je stejný jako význam kvantilů u normálního Gaussova rozložení – pro  $k_r = 2$  je rozšíření pravděpodobnosti určení nejistoty na 95 %, pro  $k_r = 3$  je to už 99,7 % [2]. Vztah pro výpočet této rozšířené nejistoty je následující (8) a dochází v něm k vynásobení kombinované nejistoty  $u_C$  koeficientem rozšíření  $k_r$ .

$$U = k_r u_C \quad (8)$$

Reálně se v praxi využívají různé koeficienty rozšíření, jejich výběr se odráží především v požadované hodnotě pravděpodobnosti [4]. Grafické zobrazení nejistoty měření je možné vidět na Obrázku 2.



Obrázek 2: Grafické znázornění nejistot měření [4]

## 2.6 Zápis nejistoty měření

Zápis výsledné rozšířené nejistoty  $U$  k odhadu výsledku měření  $y$  se provádí následujícím způsobem z rovnice (9), nejistota se vždy uvádí v jednotkách měřené veličiny  $Y$ .

$$Y = y \pm U \quad (9)$$

Kromě použití rozšířené nejistoty lze obdobným způsobem k zapsání výsledku využít i standardní kombinovanou nejistotu, pro větší a celkový přehled se volí takzvaná bilanční tabulka z Obrázku 3.

Veličina $X_q; Y$	Odhad $x_q; y$	Standardní nejistota $u_q(x)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti $A_q$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_q(y)$ ; nejistota $u(y)$
$X_1$	$x_1$	$u_1(x)$	podle situace	$A_1$	$u_1(y)$
$X_2$	$x_2$	$u_2(x)$		$A_2$	$u_2(y)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$X_q$	$x_q$	$u_q(x)$		$A_q$	$u_q(y)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$X_m$	$x_m$	$u_m(x)$		$A_m$	$u_m(y)$
$Y$	$y$	-	-	-	$u(y)$

Obrázek 3: Bilanční tabulka [4]

Při zaokrouhlování nejistoty měření je nutné dbát na to, aby se počet desetinných míst dané nejistoty shodoval s počtem desetinných míst samotného naměřeného výsledku [4]. Často se ale stává, že údaj z měřicího přístroje má jiný počet desetinných míst než

odpovídající hodnota nejistoty měření. Zaokrouhlování hodnoty z měřicího přístroje (odhadu výsledku) probíhá standardně podle číslice, která je o jeden řád nižší. Pokud je tato číslice od 0 do 4, zaokrouhluje se dolů, pokud je od 5 výše, zaokrouhluje se předchozí číslice nahoru. U hodnoty intervalu nejistoty se zaokrouhluje nahoru na jednu platnou číslici, existuje ale výjimka, pokud interval začíná číslicí 1 nebo 2, zaokrouhluje se nahoru na dvě platné číslice. Pokud nemá odhad výsledku dostatečný počet desetinných čísel, aby se počet desetinných míst shodoval s intervalem nejistoty, je nutné doplnit nuly [6].

## 2.7 Nejistoty při nepřímých měřeních

Nepřímé měření je takové měření, při němž se měří zástupná veličina, ze které se odvodí či vypočte hodnota jiné požadované veličiny, již třeba nelze snadno změřit. U nepřímých měření se někdy objevuje korelace mezi měřenými veličinami, a proto vznikají složitější příklady, které mají více komplikovaný postup, než tomu je u určování nejistot přímých měření. V některých případech lze korelační vlivy i zanedbat [7].

Každé měření má **vstupní veličiny**, což jsou přímo měřené veličiny a také ty, jejichž hodnoty známe (např. konstanty). Obvykle se značí  $X$  a jejich odhad se pak označuje jako  $x$ . **Výstupní veličiny** je třeba ze vstupních veličiny stanovit podle (10), značeny bývají obvykle jako  $Y$  a jejich odhad  $y$  [7]. Obecný zápis matematického modelu výpočtu výstupní veličiny je na následující rovnici (10).

$$Y = f(X_1, \dots, X_N) \quad (10)$$

### 2.7.1 Nekorelované veličiny

Pro zjištění výstupní veličiny označené jako  $Y$  je třeba provést odhad  $y$  výstupní veličiny, který je funkcí odhadů  $x$  vstupních veličin  $X$  [7]. Nejistota odhadu  $y$  se definuje podle následujícího vzorce (11).

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) \quad (11)$$

Kde  $A_i$  je koeficient citlivosti neboli také převodový koeficient určený podle níže uvedeného vztahu (12).

$$A_i = \left. \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_m=x_m} \quad (12)$$

### 2.7.2 Korelované veličiny

Když jsou veličiny korelované, tzn. vyskytují se korelační vlivy, musíme zvážit i kovariance mezi různými odhady. To jsou pak další složky nejistoty, která se vypočítá z následujícího vztahu (13).

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(x_i, x_j) \quad (13)$$

U výše uvedeného vzorce je  $u(x_i, x_j)$  kovariance mezi odhady  $x_i, x_j$ .

Kovariance lze určit pomocí dvou přístupů, a to metodou typu A nebo metodou typu B. Celková kombinovaná nejistota se pak standardně určí pomocí rovnice (7) v kapitole 2.4.

Kovariance mají za následek, že vlivy různých zdrojů nejistot jsou na sebe vzájemně navázané. Některé zdroje nejistot jsou tak na sobě závislé, je tedy nutné zvážit, že kvůli tomuto vzniklému vztahu přispějí do výsledné celkové nejistoty buď více, nebo méně, takže nejistota může být vyšší, nebo nižší po zohlednění vlivu těchto zdrojů [7].

### 2.7.3 Určení kovariancí pomocí metody typu A

Odhady jsou demonstrovány aritmetickým průměrem, který je vypočítaný z několika opakovaných měření každé z veličin. Kovariance se pak pro odhady  $x_i$  a  $x_j$  vypočítá pomocí metody typu A následovně (14), kdy  $n$  je počet měření a  $\bar{x}_j$  a  $\bar{x}_i$  aritmetické průměry [7].

$$u_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (14)$$

### 2.7.4 Určení kovariancí pomocí metody typu B

Kovariance se v tomto případě dají zjistit z literárních zdrojů nebo například z materiálů přiložených k přístrojům a poskytovaných výrobcem.

Existuje také výpočet (15), pro který se nejdříve musí určit zdroje korelací. U nich se provede odhad korelačního koeficientu  $r(x_i, x_j)$ . Tento koeficient nabývá hodnot od -1 do +1 a čím blíže jsou čísla k absolutní hodnotě 1, tím se jedná o silnější závislost.

$$u_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j)u_B(x_i)u_B(x_j) \quad (15)$$

Pokud se jedná o navzájem nezávislé veličiny, kovariance se určí ze vztahu (16) níže, kde  $A_{1i}$  je citlivostní koeficient první veličiny a  $A_{2i}$  je citlivostní koeficient druhé veličiny a  $u_B^2(z_i)$  je kvadrát nejistoty zdroje  $z_i$ .

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i}A_{2i}u_B^2(z_i) \quad (16)$$

Pokud se naopak jedná o veličiny, které jsou závislé, kovariance mezi odhady jsou definované podle následujícího vztahu (17), jednotlivé členy jsou již známé z předchozí rovnice (16).

$$\begin{aligned}
u_B(x_1, x_2) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B(z_i, z_j) \\
&= \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) \\
&\quad + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m A_{1i} A_{2i} u_B(z_i, z_j)
\end{aligned} \tag{17}$$

Mohou nastat i případy, kdy korelační koeficient není možné určit. V takové situaci se dá korelace obejít pomocí vytvoření modelu, který spočívá v určení maximální hodnoty, kterou má korelace na výslednou nejistotu díky horní hranici odhadu nejistoty.

Korelace mohou mít různé zdroje a je třeba při určování kovariancí mezi různými zdroji dbát zvýšené pozornosti, protože na kovariance lze narazit i tam, kde by se to na první pohled nezdálo jako pravděpodobné. Kovariance mohou například vzniknout mezi měřeními, která jsou provozována jedním přístrojem za stejných podmínek. Tato kovariance se pak určí pomocí čtverce nejistoty měřicího přístroje. Pokud se jedná o různé měřicí přístroje, které byly vyrobeny různými technologiemi, kovariance by se mezi jejich chybami neměly vyskytovat, korelovat by mohly pouze stejné podmínky měření, pokud jsou v daném měření podstatné a je třeba je uvažovat [7].

### 3 NEJISTOTY MĚŘENÍ A METODA MONTE CARLO

Metoda Monte Carlo (zkráceně MCM z anglického Monte Carlo method) je další metodou, pomocí níž se lze dopracovat k výsledku nejistoty měření. Jedná se o numerickou metodu, která využívá pravděpodobnost a náhodné veličiny. K její realizaci je nutná výpočetní technika, takže se použití metody rozvinulo až s nástupem počítačů na konci minulého století. K její realizaci je totiž potřeba generování náhodných čísel na základě pravděpodobnostního rozdělení, a tedy i software s vhodným generátorem náhodných (pseudonáhodných) čísel.

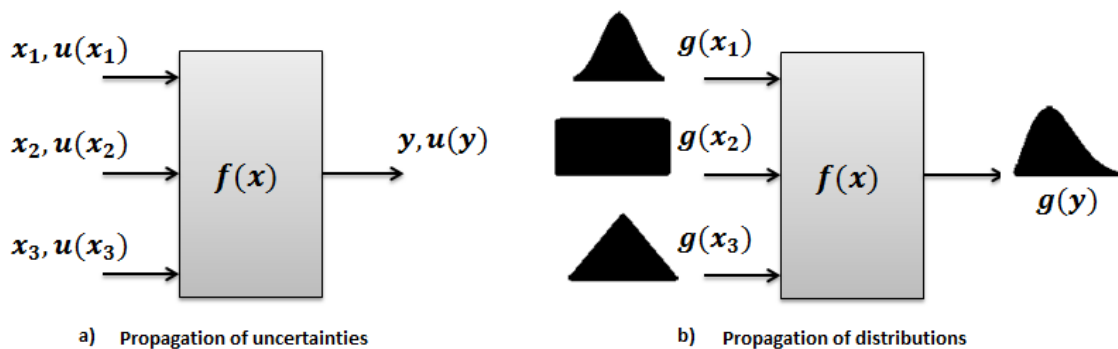
Metoda Monte Carlo se objevila již v první polovině minulého století a její algoritmy našly své využití především v době 2. světové války, kdy docházelo k rozmachu výpočetní techniky.

Metoda Monte Carlo nese své pojmenování podle slavného města, protože autoři Stanisław Marcin Ulam a John von Neumann se nechali inspirovat hazardní hrou ruleta, při které náhodně padají čísla z určitého intervalu.

Metoda má široké spektrum využití, které rozhodně nekončí jen u výpočtu nejistot měření. Zakladatelé této metody ji původně používali k zjišťování chování neutronů při průchodu odlišnými materiály, konkrétně ke zkoumání, jako množství jich pronikne na druhou stranu, což je založené právě na pravděpodobnosti [8].

V dnešní době se metoda Monte Carlo využívá v mnoha různých oblastech, které vyžadují k vytvoření správného řešení mnoho náhodných pokusů provedených za sebou, přičemž je nutné vědět, jaké rozdělení pravděpodobnosti je třeba v dané situaci použít. Monte Carlo se kromě matematiky, fyziky a chemie využívá pro předpovědi počasí nebo při renderování ve 3D modelech v grafických programech. Neobejdou se tedy bez ní některé počítačové hry nebo filmová studia [9].

V roce 2008 se usnesl Společný výbor pro návody v metrologii (anglická zkratka JCGM) na Dodatku 1 ke směrnici GUM [10]. Tento dodatek poskytuje díky metodě Monte Carlo přidanou hodnotu k postupům podle GUM. Na následujícím Obrázku 4 jsou graficky zobrazeny odlišnosti přístupů při stanovování nejistoty měření podle GUM (a) a podle metody Monte Carlo (b).



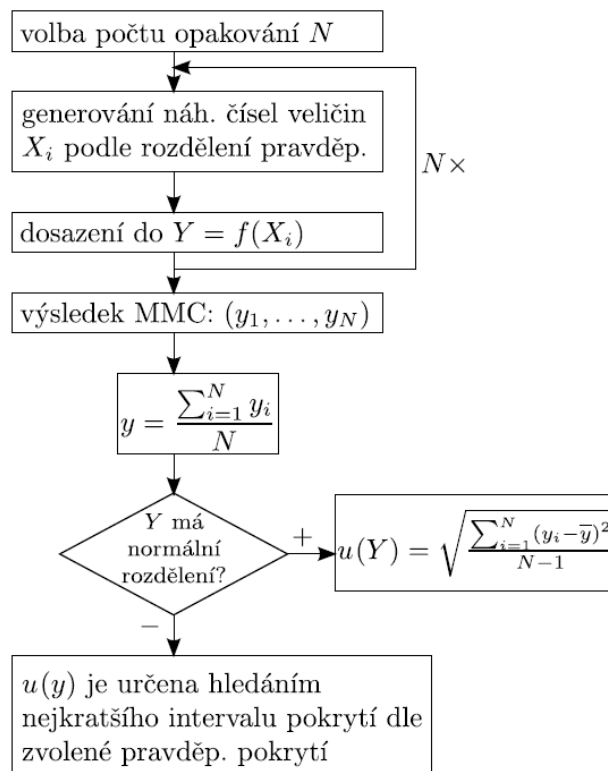
**Obrázek 4: Srovnání přístupů GUM a metody Monte Carlo ke stanovení nejistoty měření [15]**

K metodě Monte Carlo je nutné použití vhodného programovacího softwaru, v této bakalářské práci úlohu bude zastávat LabVIEW 2017.

Právě LabVIEW díky svému přehlednému a intuitivnímu grafickému programování a také generátoru náhodných čísel umožní efektivní počítání nejistot měření s pomocí metody Monte Carlo [11]. Generátor náhodných čísel v LabVIEW je vyhovující podle diplomové práce Ing. M. Novotného [16].

### 3.1 Postup při aplikaci metody Monte Carlo u stanovení nejistoty měření

Metoda Monte Carlo může být realizována díky znalosti pravděpodobnostních rozložení jednotlivých vstupních veličin. S jejich pomocí se pak určí výsledné rozložení pravděpodobnosti pro výstupní veličinu. Metoda se dá rozdělit do několika částí postupu při realizování algoritmu, které jsou popsány v této kapitole [11] [15]. Schéma algoritmu výpočtu nejistoty měření metodou Monte Carlo je zobrazeno na následujícím Obrázku 5.



**Obrázek 5: Schéma algoritmu pro stanovení nejistoty měření metodou Monte Carlo [17]**

V první fázi je třeba vytvořit model měření vyjadřující vztah výstupní veličiny  $Y$  a vstupních veličin  $X$  jako následující závislost (18).

$$Y = f(X_1, \dots, X_N) \quad (18)$$

Náhodná veličina  $Y$  s možnou hodnotou  $\eta$  má střední hodnotu  $y$  a hustotu pravděpodobnosti  $g(\eta)$ , náhodná veličina  $X$  s možnou hodnotou  $\zeta$  má zase střední hodnotu  $x_i$  a hustotu pravděpodobnosti  $g(\zeta_i)$  [10] [11].

V dalším kroku je na základě zkušeností vybráno rozdělení pravděpodobnosti, například Gaussovo neboli normální rozložení. Určí se také číslo  $M$  značící počet pokusů Monte Carlo, kolikrát se bude metoda opakovat, a také pravděpodobnost pokrytí  $p$ .

Generuje se  $M$  náhodných vektorů pro každou vstupní veličinu podle hustoty rozdělení. Vygeneruje se tak počet vektorů  $M$  násobeno počtem vstupních veličin. Podle [11] je vhodné metodu Monte Carlo provádět pro  $M = 1\,000\,000$  pokusů.

Dále přichází na řadu dosazení vygenerovaných hodnot vstupních veličin do modelu měření, kdy se získá  $M$  hodnot tohoto modelu, v následující rovnici (19)  $r = 1, \dots, M$ .

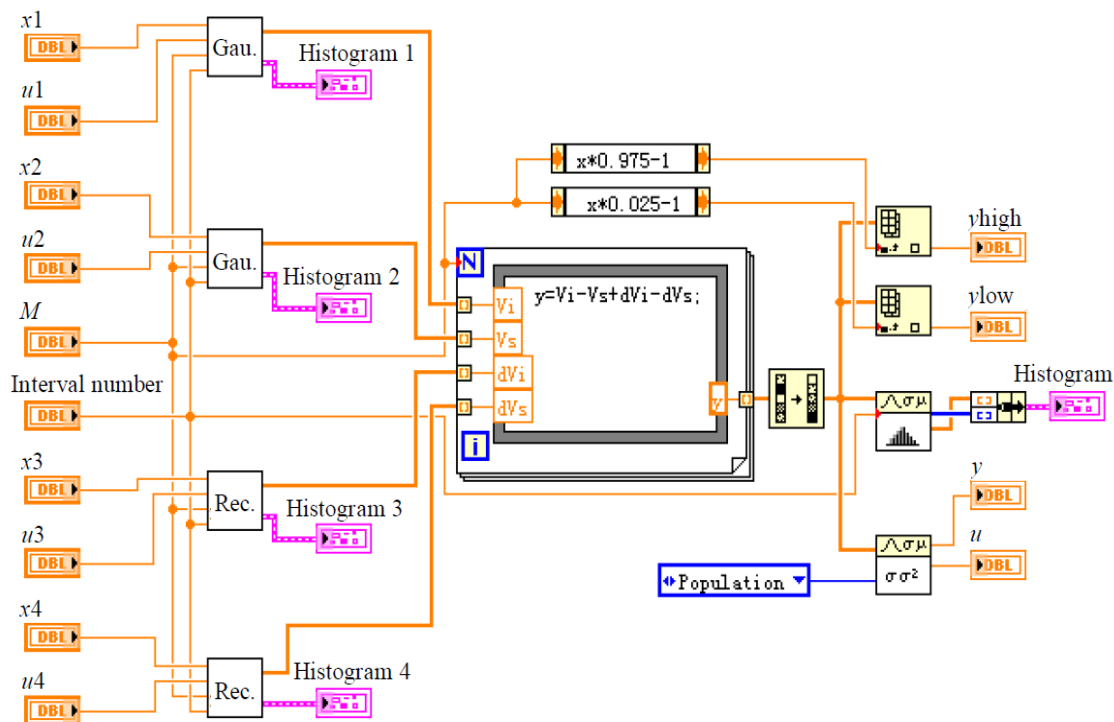
$$y_r = f(x_r) \quad (19)$$

Realizuje se seřazení  $M$  hodnot stanovené výstupní veličiny dle velikosti od nejmenší po největší hodnotu. Toto seřazení vede k určení diskrétní distribuční funkce  $G_Y(\eta)$  z takto vzniklého souboru.



Následně dojde k vypočtení průměru  $\bar{y}$  a z něj pak směrodatné odchylky  $s(\bar{y})$ . Distribuční funkce  $G$  se tedy použije na stanovení odhadu  $y$  z  $Y$  a standardní nejistotu  $u(y)$  spojenou s  $y$  [11].

Nakonec se definuje interval pokrytí  $[y_{low}, y_{high}]$  pro  $Y$  určený z  $G$  [10]. Příklad blokového diagramu programu realizujícího metodu Monte Carlo v LabVIEW může vypadat následovně (Obrázek 6).



**Obrázek 6: Příklad blokového diagramu v LabVIEW pro metodu Monte Carlo [11]**

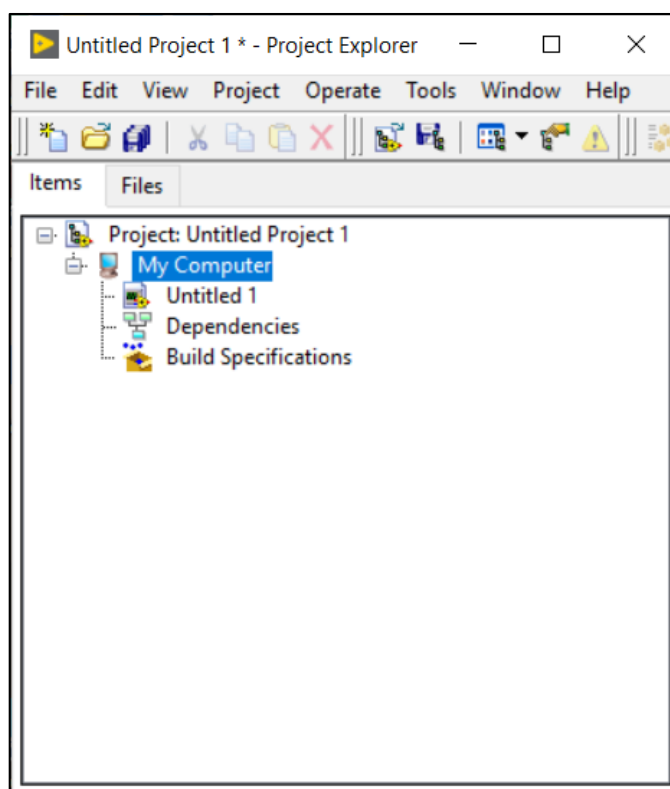
## 4 LABVIEW A JEHO VYUŽITÍ PŘI STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ

LabVIEW je software firmy National Instruments, který se používá jako nástroj virtuální instrumentace. Vývoj prostředí započal už v roce 1983 a od té doby si LabVIEW prošlo mnoha vylepšeními, aby se dnes mohlo představit jako skutečně rozsáhlý a komplexní systém nabízející právě grafický programovací jazyk.

Prostředí LabVIEW (celým názvem Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) má široké pole své použitelnosti. Je vhodné pro analýzu signálů, ale také třeba pro programování nejrůznějších systémů pro robotiku. V této práci bude LabVIEW využito k vytvoření programu pro stanovení nejistoty měření [12].

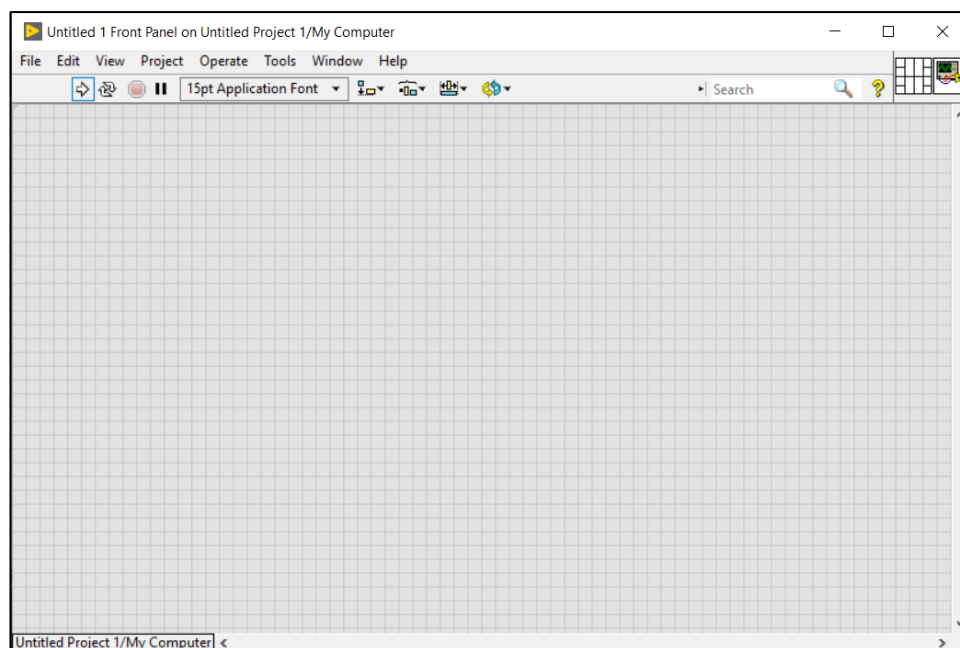
### 4.1 Prostředí LabVIEW

Program v LabVIEW se skládá z několika částí. Tou nejzákladnější je samotný projekt, který zpřehledňuje tvorbu programu, pro samotnou tvorbu VI ale není nutné ho zakládat.



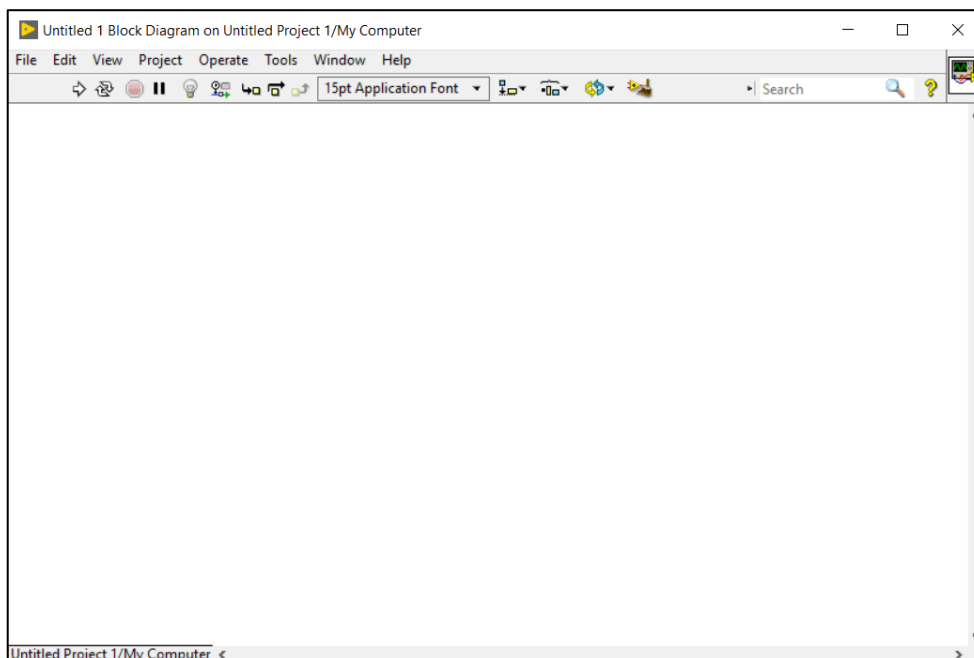
Obrázek 7: Prázdný projekt v LabVIEW

V projektu na Obrázku 7 je následně nutné založit nové VI neboli Virtual Instrument. Každé VI se skládá z několika částí. Viditelná část pro uživatele je tzv. čelní panel (angl. front panel), na němž se zobrazují vstupy a výstupy z aplikace (viz Obrázek 8).



**Obrázek 8: Čelní panel v LabVIEW (prázdný)**

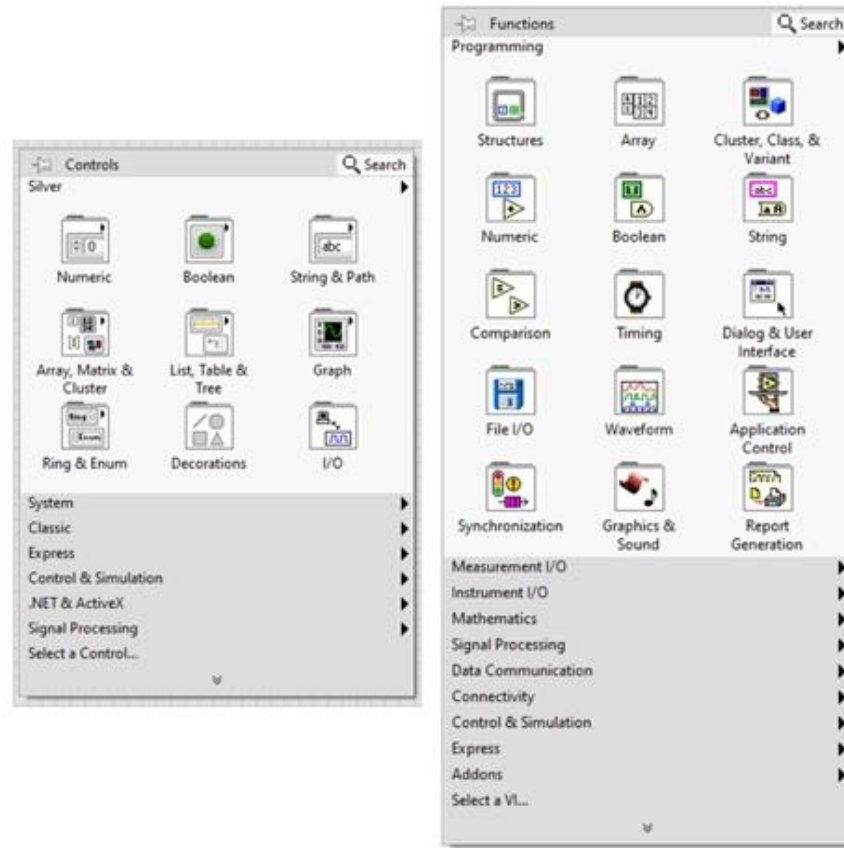
Další částí, ve které se bude ukrývat samotný kód naprogramovaný v grafickém jazyku, je blokový diagram (angl. block diagram). V blokovém diagramu (na Obrázku 9) se využívají konstanty, funkce a propojení virtuálními dráty, podle nichž výsledný program funguje.



**Obrázek 9: Blokový diagram v LabVIEW (prázdný)**

Na čelním panelu se po stisknutí pravého tlačítka myši objeví menu, ve kterém se skrývá nabídka *Controls*. V ní lze nalézt prvky pro vstup, výstup nebo jiné zpracování

či zobrazování (například grafy či kontrolní světla a další). Na blokovém diagramu se při stejném postupu zobrazí menu *Functions*. V něm se nachází různé funkce (například cykly *for* a *while*, logické funkce, aritmetické operace apod.). Menu *Controls* a *Functions* je možné vidět na Obrázku 10.



**Obrázek 10: Menu *Controls* a *Functions***

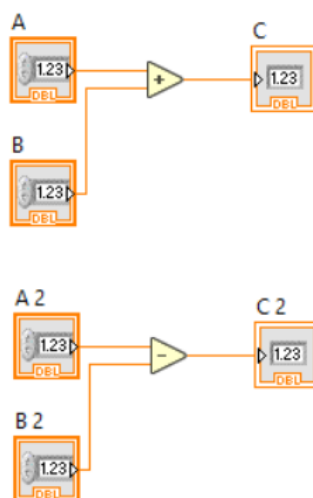
Důležitou součástí každého VI je i ikona a konektor z Obrázku 11. Ikona plní informační a rozlišovací funkci, protože obsahuje malý náhledový obrázek či znak, který má symbolizovat funkci kódu v daném VI a je užitečný při další práci s VI. To se může hodit, pokud je VI použito jako SubVI v jiné aplikaci.

Konektor zase umožňuje do VI definovat přípojná místa pro vstupní a také pro výstupní data [12].



**Obrázek 11: Konektor a ikona**

Typickým znakem pro LabVIEW je také propojování terminálů (vstupy a výstupy) a uzlů (funkce nebo operace) pomocí spojů, které vytvářejí tok dat. Zároveň je možný i paralelismus, takže oba kódy na Obrázku 12 se budou v jednom VI vykonávat paralelně.



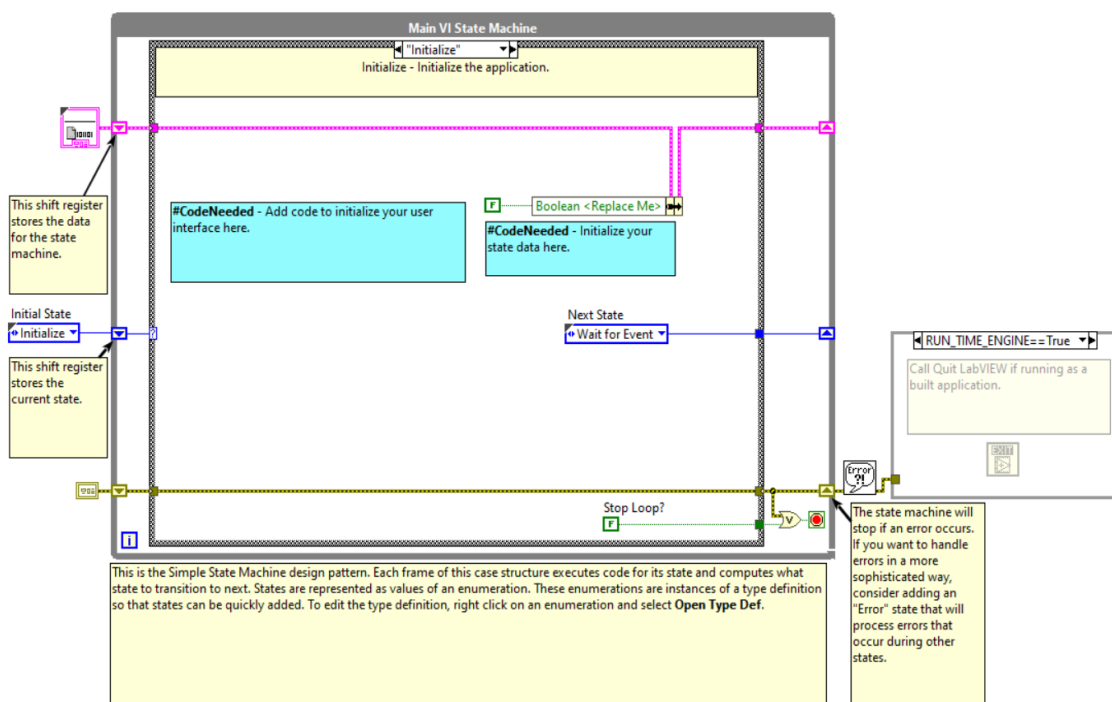
**Obrázek 12: Jednoduchý paralelní kód v LabVIEW**

Více informací o softwaru LabVIEW je možné najít například v literatuře [12]. Podrobněji bude funkčnost tohoto prostředí probrána také v kapitole 5, která se již zabývá samotnou realizací použití LabVIEW pro výpočet nejistot měření dle GUM a metodou Monte Carlo.

## 4.2 Funkce a struktury podstatné pro stanovení nejistoty měření v LabVIEW

V předchozí kapitole bylo popsáno prostředí LabVIEW obecně, tato kapitola se zaměří konkrétně na důležité funkce a struktury, které prostředí LabVIEW 2017 nabízí a které jsou zapotřebí k tvorbě programu, jež je součástí této bakalářské práce.

Jako struktura pro část programu ovládanou uživatelem je zvolen stavový automat, který zajistí rozdělení programu do jednotlivých stavů, mezi nimiž přechází. Ten má v LabVIEW svou specifickou formu zobrazenou na následujícím Obrázku 13.



**Obrázek 13: Jednoduchý stavový automat v LabVIEW**

Tento vzor návrhu programu má výhodné vlastnosti pro vytvoření uživatelského prostředí, z tohoto důvodu byl použit i v rámci této bakalářské práce.

Stavový automat se skládá z několika částí – z *while* cyklu, který se vykonává, dokud je splněna podmínka (v tomto případě nestisknutí tlačítka pro zastavení programu a žádné chybové hlášení v podobě erroru).

Druhou podstatnou částí stavového automatu je *case* struktura, která umožňuje v programu vybírat jednotlivé stavy podle vstupní podmínky.

Součástí tohoto návrhového vzoru jsou i tři *shift registry*, které slouží k přenosu dat mezi jednotlivými stavy automatu, k přenosu chybových hlášení a k ukládání současného stavu stavového automatu.

Pro zpřehlednění uživatelského prostředí je v programu využita i funkce *Two button dialog* z Obrázku 14, která zajišťuje vyskakovací dialogové okno, kde se může uživatel rozhodnout ohledně dalšího postupu.



**Obrázek 14: Ikona *Two button dialog***

Pro stanovení nejistoty měření podle GUM byly využity především funkce ze skupiny *Numeric* pro různé aritmetické operace. To vychází z principů metodiky stanovování nejistoty měření podle směrnice GUM.

Naopak pro realizaci metody Monte Carlo se v programu využívají některé specifické funkce, mezi nejdůležitější patří generování náhodných čísel v daném rozložení pravděpodobnosti. K tomu slouží VI *Continuous Random*, které je zobrazeno na Obrázku 15 a je určeno ke generování náhodných čísel. Výběr rozložení pravděpodobnosti je třeba udělat manuálně pomocí menu nacházejícího se pod ikonou.



**Obrázek 15: Ikona *Continuous Random***

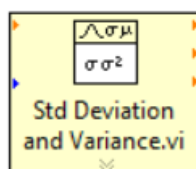
Pro zobrazení takových vygenerovaných hodnot náhodných čísel je třeba VI s názvem *Histogram*. To zajistí zobrazení výsledných hodnot v přehledném histogramu, v němž lze i názorně vidět rozložení pravděpodobnosti. Ikona VI *Histogram* se nachází na Obrázku 16.



**Obrázek 16: Ikona *Histogram***

Vygenerované hodnoty je žádoucí také seřadit vzestupně, k tomu poslouží funkce *Sort 1D Array*, která je součástí funkcí pro operaci s polem hodnot.

Pro určení průměru z hodnot a také směrodatné odchylky je určená funkce *Standard Deviation and Variance*, která tyto položky počítá. Funkce je zobrazena na Obrázku 17.



**Obrázek 17: Ikona *Standard Deviation and Variance***

# 5 PROGRAM PRO STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ V LABVIEW

Postupy pro stanovení nejistoty měření jsou shrnuty v dokumentu Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [1]. Metodika ve směrnici popsána je v rámci této bakalářské práce aplikována do programu v prostředí LabVIEW 2017. Program, který je přílohou této bakalářské práce sestává ze dvou hlavních částí – VI pro výpočet nejistoty měření podle GUM a VI pro stanovení nejistoty měření pomocí metody Monte Carlo.

Pro realizaci bylo zvoleno rozdělení dvou metod do samostatných VI, aby byl software snadněji přenositelný a VI se případně mohly používat i samostatně bez společného uživatelského prostředí.

## 5.1 Návrh programu

Program v prostředí LabVIEW je navržen tak, aby umožňoval uživateli načítat vstupní naměřená data ze souboru nebo je zadávat ručně, srovnávat dosažené výsledky a ukládat je do souboru. Nejistota měření je počítána podle postupů GUM a také metodou Monte Carlo.

Program, v němž jsou dvě různá VI pro výpočet nejistoty měření volána, je realizován jako stavový automat. Výhoda tohoto návrhu je přehlednost jednotlivých fází výpočtu, dobrá transformovatelnost a snadné ovládání uživatelem, kdy na základě vstupů z tlačítek čelního panelu přechází program do požadovaných stavů.

Stavový automat má v tomto případě pět stavů. Jsou jimi:

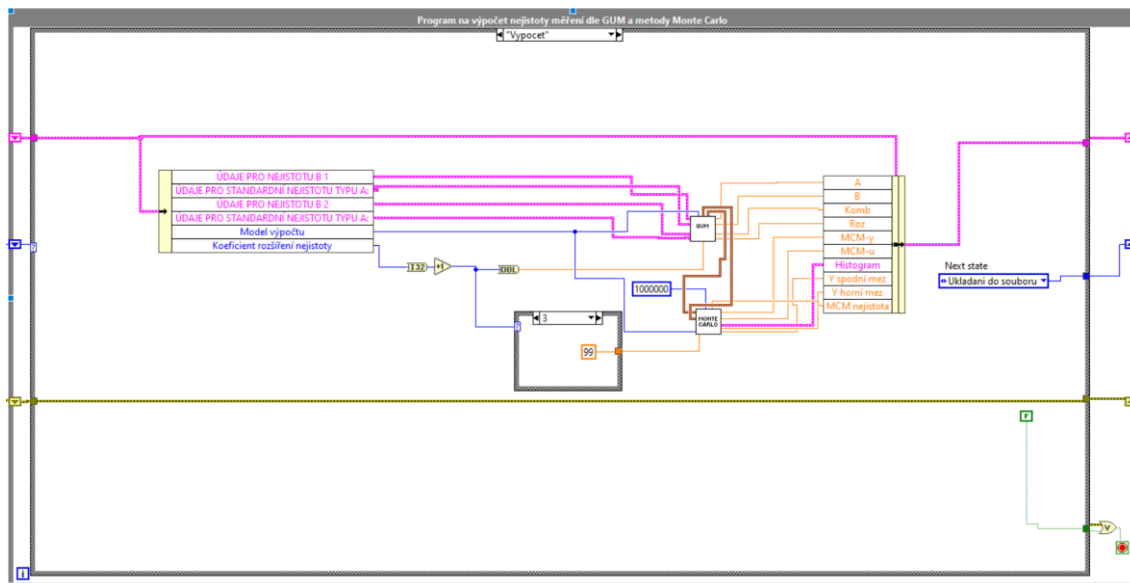
- *Inicializace* – v tomto stavu se program připraví pro zadávání vstupních dat, inicializují se kolonky pro zadávání hodnot.
- *Spusteni/Nacteni* – v tomto stavu dochází k načítání zadaných dat a ke spuštění výpočtu.
- *Vypocet* – tento stav obsahuje dvě VI pro výpočet nejistoty měření podle GUM a metodou Monte Carlo.
- *Ukladani do souboru* – v tomto stavu dochází k volitelnému ukládání dosažených výsledků do souboru.
- *Konec* – tímto stavem se program ukončí.

Při spuštění programu tlačítkem *Start* automat plynule přechází z jednoho stavu do druhého, při zmáčknutí tlačítka *Stop* rovnou přeskočí do posledního stavu *Konec*, kde se program ukončí.

Realizace stavového automatu z Obrázku 18 je v LabVIEW provedena pomocí smyčky *while*, jež se kontinuálně vykonává, v ní vložené *case* struktury pro výběr stavů automatu a *shift registerů*, které jsou určeny pro přenos dat mezi jednotlivými stavy.



Vykonávání cyklu *while* je přerušeno v posledním stavu *Konec*, do nějž je možné se dostat i po stisku tlačítka *Stop*.



**Obrázek 18: Stav *Vypocet*, v němž dochází k volání VI pro stanovení nejistoty měření**

Veškeré části kódu se nacházejí v adresáři projektu *nejistoty-mereni.lvproj*, samotný program pro koncového uživatele se nachází ve VI *nejistoty\_mereni\_MAIN.vi*. V této kapitole se nachází pouze technický popis programu a realizace, uživatelský návod je uveden v kapitole 6.

V následujících podkapitolách bude detailněji popsána realizace programu a principy, na kterých jednotlivé metody v prostředí LabVIEW 2017 fungují. Čelní panel programu je možné nalézt v Příloze 1 a 2 této bakalářské práce.

## 5.2 VI pro výpočet nejistoty měření podle GUM

V této podkapitole je konkrétně popsána realizace části programu, která ke stanovení nejistoty měření využívá postupů uvedených v GUM. VI je schopné řešit jak nejistotu přímého měření, tak i čtyři jednoduché modely pro měření nepřímé.

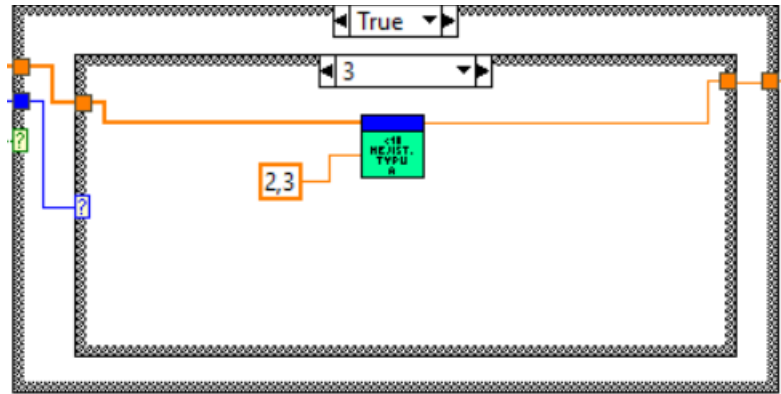
Uživatel může zvolit výpočet nejistoty pro nepřímé měření, kde je výstupní veličina tvořena součtem dvou vstupních veličin, rozdílem dvou vstupních veličin, podílem dvou vstupních veličin nebo součinem dvou vstupních veličin.

### 5.2.1 Výpočet standardní nejistoty typu A

Součástí VI pro výpočet nejistoty měření dle GUM je kód pro výpočet standardní nejistoty typu A. K výpočtu jsou potřeba vstupní naměřená data, která může zadat do příslušného pole přímo uživatel, nebo která mohou být načtena z textového souboru. Formát textového souboru je uveden v kapitole 6.4.

Součástí je i ošetření počtu zadaných či načtených naměřených dat. Dle Tabulky 1 se výsledek výpočtu standardní nejistoty typu A podle počtu naměřených dat  $n$  násobí příslušným koeficientem  $k$ . Pokud je počet naměřených dat roven nebo vyšší než 10, koeficient  $k$  je roven jedné, tedy výsledek zůstává stejný.

Na Obrázku 19 níže lze vidět konkrétní příklad části kódu pro  $n = 3$ , koeficient  $k$  v tomto případě odpovídá 2,3.



**Obrázek 19: Vynásobení standardní nejistoty typu A koeficientem  $k$  pro  $n = 3$**

Samotný výpočet nejistoty se provádí v SubVI, které postupuje podle rovnice (2) pro výpočet standardní nejistoty typu A.

### 5.2.2 Výpočet standardní nejistoty typu B

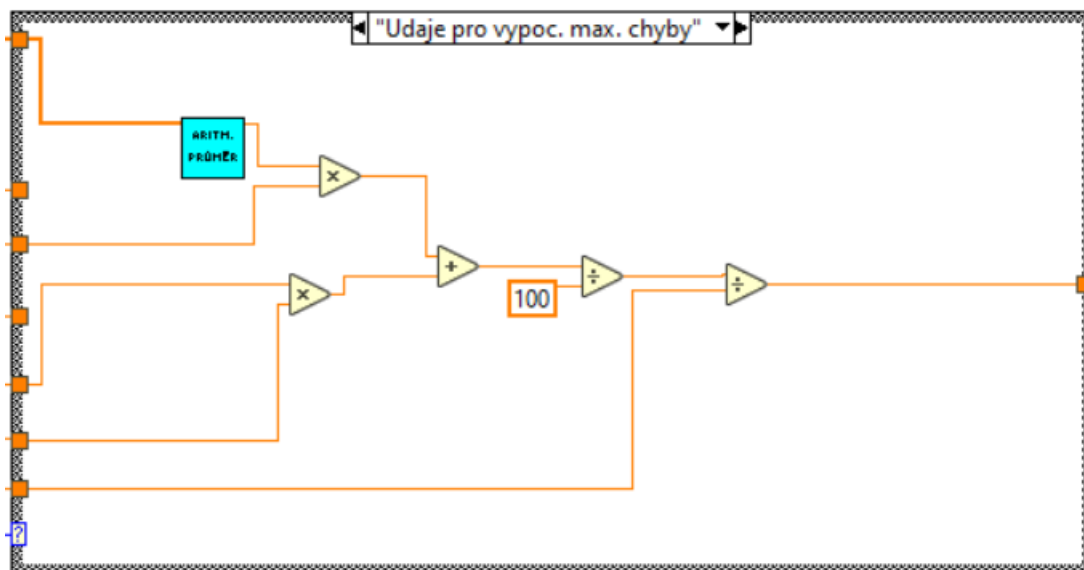
Pro výpočet standardní nejistoty typu B jsou k dispozici kolonky pro až čtyři možné zdroje nejistot pro jednu vstupní veličinu. Pomocí *case* struktury je možné u každého zdroje nejistot vybrat, které údaje bude uživatel zadávat.

Na výběr je:

- zadání údajů pro výpočet maximální chyby,
- zadání maximální chyby,
- zadání rozšířené nejistoty měřicího přístroje.

U rozšířené nejistoty je v případě, že uživatel zná jen kombinovanou nejistotu, možné zadat jako koeficient rozšíření hodnotu 1.

*Case* struktura pro výběr výpočtu vypadá následovně (Obrázek 20), konkrétně se jedná o příklad pro zadávání údajů pro výpočet maximální chyby.

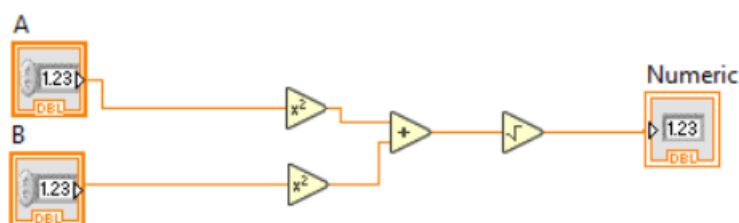


Obrázek 20: Case struktura pro výpočet maximální chyby měřicího přístroje

Jednotlivé zdroje nejistot jsou podle rovnice (5) geometricky sečteny do výsledné standardní nejistoty typu B.

### 5.2.3 Výpočet kombinované nejistoty

Kombinovaná nejistota se stanoví podle rovnice (7) ze standardní nejistoty typu A a ze standardní nejistoty typu B, kód je zobrazen na Obrázku 21.



Obrázek 21: Výpočet kombinované nejistoty

### 5.2.4 Výpočet rozšířené nejistoty

Pokud uživatel chce vypočítat i rozšířenou nejistotu, stačí zvolit z menu koeficient rozšíření, na výběr jsou nejčastější hodnoty 1 (pro výpočet pouze kombinované nejistoty), 2 (pro pravděpodobnost přibližně 95 %) nebo 3 (pro pravděpodobnost přibližně 99,7 %). V tomto případě se provádí jednoduchý výpočet podle rovnice (8), kdy se kombinovaná nejistota vynásobí zadaným koeficientem.

Pokud není třeba rozšířenou nejistotu počítat a je zvolen koeficient 1, v kolonce pro rozšířenou nejistotu bude zobrazena nezměněná kombinovaná nejistota.

## 5.2.5 Nejistota nepřímého měření pro čtyři modely výpočtu výstupní veličiny

V modelu výpočtu je možné kromě stanovení nejistoty přímého měření zvolit i čtyři různé modely pro výpočet nejistoty nepřímého měření. Na čelním panelu jsou k dispozici záložky pro zadávání dvou vstupních veličin, z nichž se výstupní veličina při nepřímém měření počítá. Rozložení ikon na čelním panelu bude více popsáno v kapitole 6.

Výběr modelu výpočtu je řešen pomocí *case* struktury. Pro každý z modelů je tak v programu pevně nadefinovaný způsob výpočtu nejistoty měření.

### 5.2.5.1 Výpočet nejistoty pro součet dvou vstupních veličin

Pro výpočet kombinované nejistoty se u nepřímého měření se využije rovnice (11) a pro výpočet citlivostních koeficientů rovnice (12).

Z těchto dvou rovnic vznikne po dosazení parciální derivace součtu dvou vstupních veličin podle jednotlivých veličin rovnice (20), která stanovuje výpočet kombinované nejistoty u nepřímého měření, kde je výstupní veličina  $y$  stanovena součtem dvou vstupních veličin  $x_1$  a  $x_2$ .

V tomto konkrétním případě vycházejí oba citlivostní koeficienty rovny jedné, lze je tedy z rovnice vynechat.

$$u_c(y_{\text{součet}}) = \sqrt{\left( (1) * \sqrt{u_A^2(x_1) + u_B^2(x_1)} \right)^2 + \left( (1) * \sqrt{u_A^2(x_2) + u_B^2(x_2)} \right)^2} \quad (20)$$

### 5.2.5.2 Výpočet nejistoty pro rozdíl dvou vstupních veličin

Vztah pro výpočet kombinované nejistoty u nepřímého měření, kde je výstupní veličina  $y$  stanovena rozdílem dvou vstupních veličin  $x_1$  a  $x_2$  se nachází v rovnici (21).

$$u_c(y_{\text{rozdíl}}) = \sqrt{\left( (1) * \sqrt{u_A^2(x_1) + u_B^2(x_1)} \right)^2 + \left( (-1) * \sqrt{u_A^2(x_2) + u_B^2(x_2)} \right)^2} \quad (21)$$

### 5.2.5.3 Výpočet nejistoty pro součin dvou vstupních veličin

Vztah pro výpočet kombinované nejistoty u nepřímého měření, kde je výstupní veličina  $y$  stanovena součinem dvou vstupních veličin  $x_1$  a  $x_2$  se nachází v rovnici (22).

$$u_c(y_{\text{součin}}) = \sqrt{\left( (x_2) * \sqrt{u_A^2(x_1) + u_B^2(x_1)} \right)^2 + \left( (x_1) * \sqrt{u_A^2(x_2) + u_B^2(x_2)} \right)^2} \quad (22)$$

#### 5.2.5.4 Výpočet nejistoty pro podíl dvou vstupních veličin

Vztah pro výpočet kombinované nejistoty u nepřímého měření, kde je výstupní veličina  $y$  stanovena podílem dvou vstupních veličin  $x_1$  a  $x_2$  se nachází v rovnici (23).

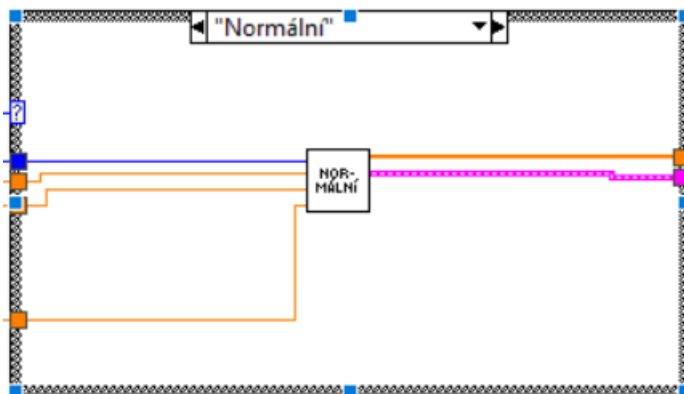
$$u_c(y_{\text{podíl}}) = \sqrt{\left( \left( \frac{1}{x_2} \right) * \sqrt{u_A^2(x_1) + u_B^2(x_1)} \right)^2 + \left( \left( -\frac{x_1}{x_2^2} \right) * \sqrt{u_A^2(x_2) + u_B^2(x_2)} \right)^2} \quad (23)$$

### 5.3 VI pro výpočet nejistoty měření metodou Monte Carlo

Pro výpočet nejistoty měření metodou Monte Carlo bylo navrženo VI, které umožňuje výpočet nejistot nepřímého měření. K tomuto účelu byl využit generátor náhodných čísel v programu LabVIEW 2017, protože pro metodiku výpočtu je nutný software s vhodným generátorem náhodných čísel. Samotný postup při vyhodnocování nejistoty měření metodou Monte Carlo je detailněji popsán v kapitole 3.

Program pro výpočet nejistoty metodou Monte Carlo obsahuje VI pro generování náhodných čísel ve třech různých rozděleních pravděpodobnosti – v rovnoměrném, v normálním neboli Gaussově a v trojúhelníkovém rozdělení. Byla vybrána právě tato rozdělení pravděpodobnosti, protože v oblasti elektrických měření se nejčastěji vyskytují.

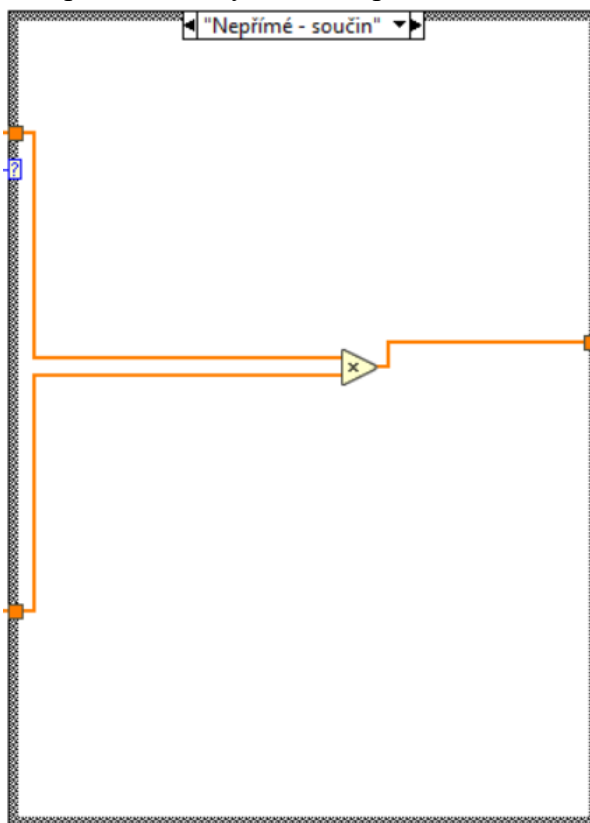
Výběr požadovaného rozdělení pravděpodobnosti je realizován pomocí *case* struktury, uvnitř které jsou pod příslušným výběrem ukrytá jednotlivá VI pro generování náhodných čísel ve zvoleném rozdělení pravděpodobnosti a kterou je možné vidět na Obrázku 22.



**Obrázek 22: Case struktura pro výběr rozdělení pravděpodobnosti**

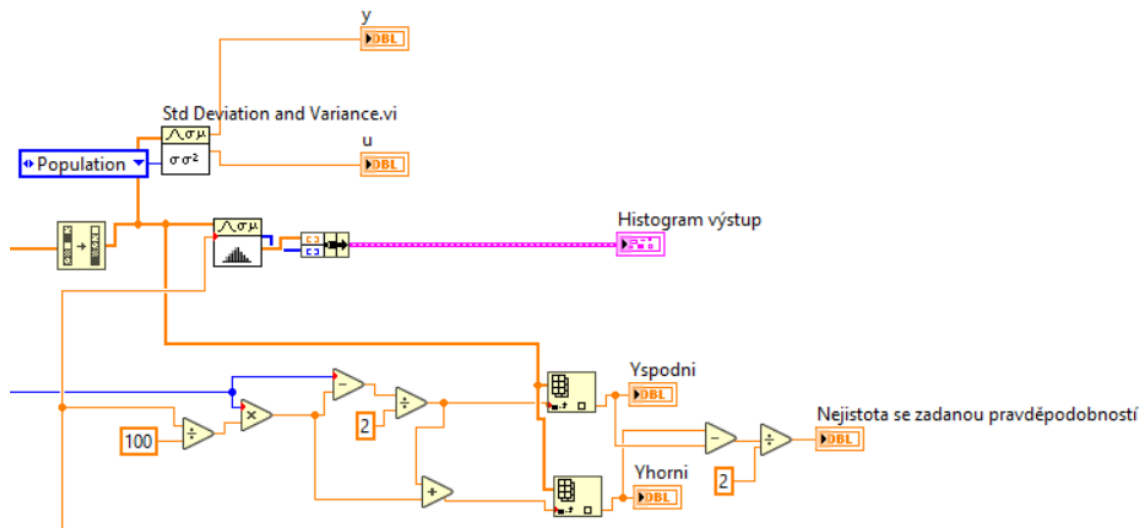
Pro každou ze dvou vstupních veličin je možné zadávat až pět různých zdrojů nejistoty měření. V programu jsou tato data načítána ze SubVI pro výpočet nejistoty měření pomocí GUM, takže hodnoty zadává uživatel pouze jednou a ve výsledcích uvidí porovnání přístupu GUM a metody Monte Carlo.

Uživatel určí i model výpočtu výstupní veličiny. U VI podle metody Monte Carlo má k dispozici jednu možnost pro přímé měření (sečtou se pouze zdroje nejistot u první veličiny) a čtyři možnosti pro nepřímé měření. Jsou jimi opět součet, rozdíl, součin a podíl dvou vstupních veličin. Výběr modelu je realizován pomocí case struktury, na Obrázku 23 je příklad pro součinný model nepřímého měření.



**Obrázek 23: Case struktura pro výběr modelu výpočtu pro metodu Monte Carlo**

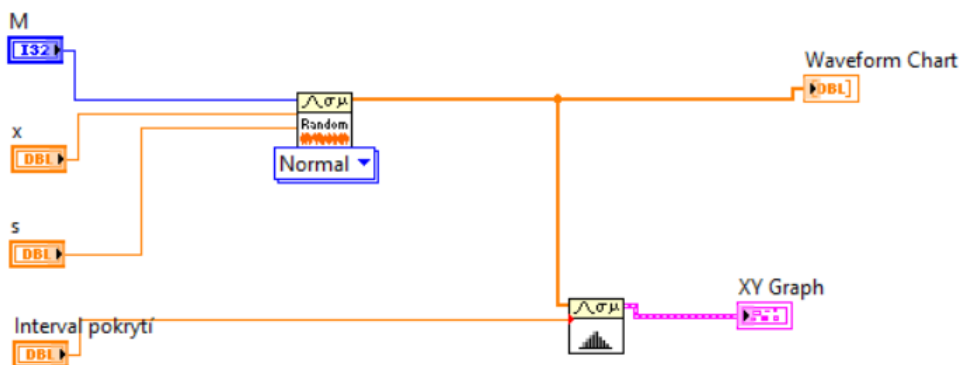
Pro získání výsledku pomocí metody Monte Carlo je nutné následně provést seřazení hodnot do neklesajícího pořadí, tyto hodnoty je pak možné zobrazit ve výstupním histogramu a pomocí funkce pro výpočet standardní odchylky určit výstupní veličinu, jež je průměrem, a výslednou směrodatnou odchylku. Zobrazeny jsou také meze pro zadanou hodnotu pravděpodobnosti, z nichž je následně určena nejistota s požadovanou zadanou pravděpodobností. Realizaci v LabVIEW kódu je možné vidět na Obrázku 24.



Obrázek 24: Stanovení nejistoty měření podle metody Monte Carlo

### 5.3.1 VI pro generování náhodných čísel ve zvoleném rozdělení pravděpodobnosti

Pro generování náhodných čísel v daném pravděpodobnostním rozložení byly realizovány tři SubVI. Jako příklad zde bude popsáno to, které umožňuje generování náhodných čísel v normálním neboli Gaussově rozložení pravděpodobnosti. Počet opakování  $M$  je v blokovém diagramu programu nastaven na hodnotu 1 000 000, tuto hodnotu nemůže uživatel z čelního panelu změnit.



Obrázek 25: SubVI pro generování náhodných čísel v normálním rozložení pravděpodobnosti

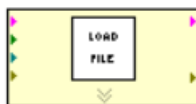
Na Obrázku 25 je možné vidět kód, který zajišťuje generování náhodných čísel v požadovaném, zde normálním, rozdělení pravděpodobnosti. Ke generování  $M$  čísel o průměru  $x$  a standardní odchylce  $s$  je zde využívána funkce *Continuous Random*.

Na stejném principu funguje i generování náhodných čísel v trojúhelníkovém a rovnoměrném rozdělení pravděpodobnosti.

## 5.4 Načítání ze souboru a ukládání do souboru

Součástí programu je možnost načíst vstupní data pro výpočet standardní nejistoty typu A z textového souboru. Uživatel se může rozhodnout na základně zobrazení dialogového okna po spuštění programu, umístění souboru je nutné předtím vybrat v příslušné ikoně na čelním panelu programu (viz Příloha 1).

Načítání se provádí pomocí samostatného SubVI z Obrázku 26, které vyčítá jednotlivá data z textového souboru.



Obrázek 26: SubVI pro načítání dat ze souboru

Na konci výpočtu se může uživatel programu rozhodnout, zdali si dosažené výsledky uloží do souboru. K tomu slouží opět samostatné SubVI z Obrázku 27. Soubory se ukládají do složky v adresáři projektu s názvem *ulozene\_nejistoty*.



Obrázek 27: SubVI pro ukládání výsledků do souboru

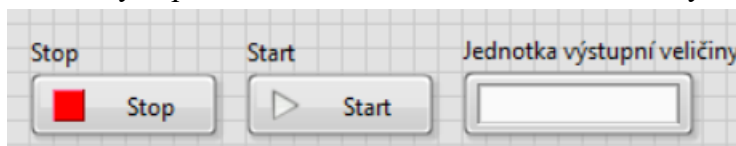


# 6 UŽIVATELSKÝ NÁVOD K OBSLUZE PROGRAMU PRO VÝPOČET NEJISTOT MĚŘENÍ

V následující kapitole se nachází uživatelská příručka k programu pro výpočet nejistoty měření. Hlavní VI, které je určeno pro uživatele, se nazývá *nejistoty\_mereni\_MAIN.vi*.

Pro snadné ovládání a lepší přehlednost je program rozdělen do jednotlivých záložek (viz čelní panel programu v Příloze 1 a 2). Celkově jsou listy tři, na prvním z nich jsou kolonky pro zadávání údajů pro výpočet nejistoty měření. Druhá záložka je věnována zobrazení výsledků stanovení nejistoty oběma způsoby, takže uživatel může dosažené hodnoty snadno porovnat. Poslední list je věnován stručnému návodu a nápovědě pro obsluhu celého programu. Ze všeho nejdříve je nutné VI spustit, aby proběhla inicializace vstupních hodnot. Poté již může uživatel čelní panel ovládat a zadávat hodnoty.

Ovládání programu není složité, spouští se tlačítkem *Start* a přerušuje tlačítkem *Stop*, vše je zobrazeno na Obrázku 28. Mimo záložky je také možné do příslušného pole vepsat jednotku, kterou má mít výstupní veličina a která se zobrazí u dosažených výsledků.

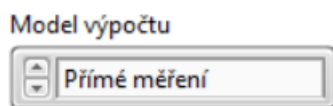


Obrázek 28: Hlavní ovládací prvky programu mimo záložky

Načítání ze souboru a ukládání do souboru je řešeno pomocí vyskakovacích dialogových oken, takže uživatel si může okamžitě vybrat. Všechny ostatní položky se vyplňují v jednotlivých záložkách.

## 6.1 Zadávání vstupních dat

V první záložce je možné zadávat hodnoty pro stanovení nejistoty měření pomocí postupů uvedených v Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement a také pomocí metody Monte Carlo. Na začátku je důležité zvolit model výpočtu – na výběr je přímé měření a čtyři modely měření nepřímého (součet, rozdíl, součin a podíl), viz Obrázek 29.



Obrázek 29: Výběr modelu výpočtu výstupní veličiny

Dále uživatel provede výběr koeficientu rozšíření výsledné nejistoty. Defaultně je tato hodnota nastavena na 1, lze ale také zvolit hodnotu 2 pro zobrazení nejistoty s 95% pravděpodobností a 3 pro zobrazení nejistoty s 99,7% pravděpodobností.

Rozlišení dat pro první a pro druhou vstupní veličinu je provedeno pomocí dvou záložek. V nich se nachází další záložky, které oddělují jednotlivé zdroje nejistot pro vybranou vstupní veličinu.

Pro zadání údajů pro výpočet standardní nejistoty typu A může uživatel využít pole s názvem *Vstupní naměřená data* v záložce *Typ A*. Pole je také možné nechat prázdné a načíst data ze souboru, v tomto případě je nutné vybrat umístění načítaného souboru v kolonce *Soubor pro načtení naměřených dat*. Možnost pro načtení dat ze souboru se nabídne po spuštění programu tlačítkem *Start* ve vyskakovacím dialogovém okně, kde si uživatel může vybrat načtení těchto vstupních dat pro výpočet nejistoty typu A pro obě vstupní veličiny nebo pro jednu z nich. Více o načítání ze souboru lze najít v kapitole 6.4.

Dále se na čelním panelu VI nachází záložky *Typ B* pro zadání údajů pro výpočet standardní nejistoty typu B (Obrázek 30). V clusteru v záložce jsou kolonky pro zadání údajů pro stanovení nejistoty vždy z jednoho zdroje nejistoty. U každého jednotlivého zdroje je třeba vybrat z menu, jaké údaje bude uživatel zadávat. Na výběr je zadání údajů pro výpočet maximální chyby, zadání maximální chyby nebo zadání rozšířené nejistoty. Pokud konkrétní zdroj a jeho údaje nebudou využity, je třeba v menu nechat položku *Nezadavam*, která je nastavena defaultně.

Pro výběr některého z modelů výpočtu nepřímého měření je třeba vyplnit údaje i do druhé záložky do kolonek pro druhou vstupní veličinu.

Obrázek 30: Cluster pro zadání údajů pro výpočet standardní nejistoty typu B

### 6.1.1 Zadání údajů pro výpočet maximální chyby

Při výběru této položky v menu je třeba vyplnit kolonky *Chyba z hodnoty*, *Chyba z rozsahu* (obě hodnoty je nutné udávat ve tvaru v procentech). Pokud chyba z rozsahu bude u použitého měřicího přístroje uvedena v digitech, je nutné provést před zadáním následující přepočítání (24).

$$\delta_R = \frac{d}{D} * 100 \quad (24)$$

V této rovnici představuje  $d$  chybu udávanou v digitech,  $D$  je pak maximální počet indikovaných jednotek na displeji daného měřicího přístroje, výsledná  $\delta_R$  je již požadovaná chyba z rozsahu uvedená v procentech [13].

Dále je nutné vyplnit kolonku *Rozsah měřicího přístroje* a také vybrat z menu požadované *Rozdělení pravděpodobnosti*.

Všechny tyto položky je nutné znát z měřicího přístroje, který je v tomto případě zdrojem nejistoty měření.

### 6.1.2 Zadání maximální chyby

Pro výběr zadávání maximální chyby je třeba vyplnit kolonku *Maximální chyba* a vepsat do ní maximální chybu měřicího přístroje. Dále je třeba vybrat z menu požadované *Rozdělení pravděpodobnosti*.

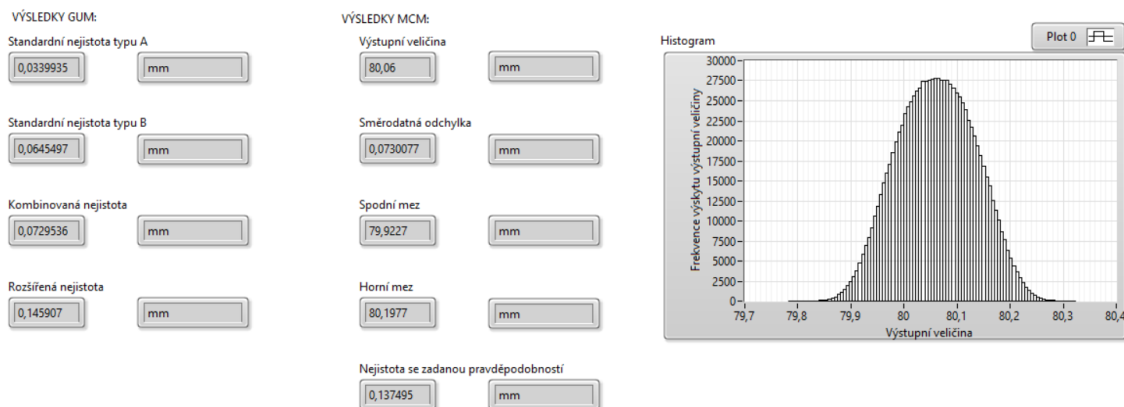
### 6.1.3 Zadání rozšířené nejistoty

U výběru rozšířené nejistoty je třeba vyplnit kolonku *Rozšířená nejistota* hodnotou rozšířené nejistoty daného zdroje. Jako druhou položku je nutné zadat *Koeficient rozšíření*. Pokud je známa pouze kombinovaná nejistota a není již rozšířená, je nutné do pole *Koeficient rozšíření* vepsat hodnotu 1. Kvůli metodě Monte Carlo je třeba vybrat i rozložení pravděpodobnosti.

Po vyplnění všech kolonek je pro spuštění výpočtu nutné stisknout tlačítko Start. Poté už je možné se přesunout do další záložky, v níž se zobrazí výsledky.

## 6.2 Zobrazení dosažených výsledků

V záložce s výsledky již nejsou žádné kolonky, do kterých by uživatel mohl zadávat data, ale pouze se v tomto listě zobrazují všechny dosažené hodnoty. Uvedeny jsou výsledky výpočtu podle postupu GUM a také výsledky stanovené metodou Monte Carlo, aby v případě potřeby mohlo dojít k jejich přímému porovnání. Vzhled této záložky je zobrazen na Obrázku 31.



**Obrázek 31: Kolonky pro dosažené výsledky pomocí GUM a metody Monte Carlo**

Pro stanovení nejistoty podle GUM jsou připraveny kolonky s výsledky pro standardní nejistotu typu A, standardní nejistotu typu B, kombinovanou nejistotu a rozšířenou nejistotu.

Pro metodu Monte Carlo se zobrazí výstupní veličina, směrodatná odchylka, spodní a horní mez pro zadanou pravděpodobnost a z nich vypočtená nejistota. Nechybí ani histogram zobrazující výsledné rozložení pravděpodobnosti. Protože se názvy veličin a jejich jednotky v histogramu mění, jeho osy jsou popsány obecně.

V kolonkách za jednotlivými položkami s výsledky se zobrazí jednotka, pokud ji uživatel zadá.

Výsledky se pro větší názornost a přesnost automaticky nezaokrouhlují na 1 nebo 2 platné číslice a volba je ponechána na uživateli. Postup při zaokrouhlování nejistoty měření je uveden v kapitole 2.6.

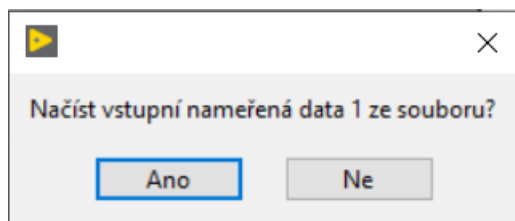
### 6.3 Náповěda k programu

V záložce *Náповěda* je uveden stručný popis programu a návod na jeho ovládání. Nejedná se o kompletní návod, ale o jednoduché pokyny, jak s programem nakládat. Tato záložka slouží zejména jako rychlá náповěda pro uživatele.

### 6.4 Načítání dat ze souboru a ukládání výsledků do souboru

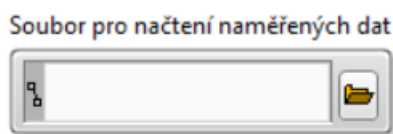
Součástí programu pro výpočet nejistoty měření pomocí postupů GUM a pomocí metody Monte Carlo je také uživatelská možnost načítat některá vstupní data ze souboru a ukládat dosažené výsledky do souboru.

Pro volbu načítání ze souboru se po stisknutí tlačítka *Start* zobrazí uživateli dialogové okno, které je zobrazeno na Obrázku 32. Toto okno se zobrazí jak pro první vstupní veličinu, tak následně i pro druhou vstupní veličinu.



**Obrázek 32: Dialogové okno pro načtení dat ze souboru**

Načtení dat ze souboru se týká pouze *Vstupních naměřených dat* pro výpočet standardní nejistoty typu A nacházejících se v první záložce *Typ A* u každé ze dvou vstupních veličin. Toto pole je možné buď vyplnit ručně, nebo ponechat prázdné, v kolonce na Obrázku 33 vybrat umístění požadovaného textového souboru pro načtení hodnot a po zobrazení dialogového okna při startu programu z Obrázku 32 zvolit možnost „Ano“. Při výběru některého z modelů výpočtu výstupní veličiny pro nepřímé měření se po zvolení načtení ze souboru načtou vstupní naměřená data pro standardní nejistotu typu A ze zvolených souborů pro obě vstupní veličiny nebo jen pro jednu z nich. Každá z nich ale musí mít vlastní soubor.

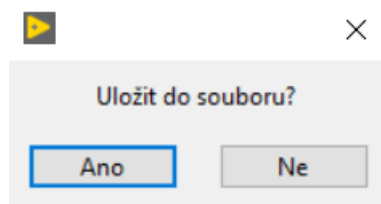


**Obrázek 33: Kolonka pro výběr souboru pro načtení vstupních dat pro standardní nejistotu typu A**

Pro správné načtení vkládaných dat je nutné dodržet požadovaný formát textového souboru, kdy první číslice v souboru bude určovat počet vkládaných hodnot (například 10). Dále už mohou následovat samotná naměřená data oddělená mezerou. Co se týče desetinné čárky nebo desetinné tečky, je nutné používat desetinnou značku, která je nastavená v operačním systému. Data v textovém souboru pro Příklad 1 z kapitoly 7.1 vypadají následovně:

- 10 80,1 80,2 80,1 79,9 80,0 80,2 80,1 79,9 80,0 80,1

Po provedení výpočtů se před ukončením programu zobrazí druhé dialogové okno z Obrázku 34, které uživateli nabízí možnost uložení do souboru.



**Obrázek 34: Dialogové okno pro ukládání výsledků do souboru**

Ukládání je volitelné, v obou případech se výsledky zobrazí i na samotném čelním panelu v příslušných kolonkách v záložce s výsledky.

Po provedení výpočtů program automaticky skončí. Uložený soubor se po ukončení programu nachází v adresáři LabVIEW projektu ve složce *ulozene\_nejistoty*, kde uživatel i po zavření aplikace nalezne své dosažené výsledky a může je archivovat.

# 7 TESTOVÁNÍ PROGRAMU PRO VÝPOČET NEJISTOT MĚŘENÍ V LABVIEW

V této kapitole se nachází metodika testování vytvořeného programu pro výpočet nejistot měření pomocí postupů z GUM a pomocí metody Monte Carlo a také výsledky provedeného testování. V bakalářské práci jsou pro demonstraci testování zvoleny tři příklady s třemi různými modely výpočtu výstupní veličiny. Samozřejmě byl program otestován i na dalších příkladech.

## 7.1 Příklad 1 – přímé měření

První testovací příklad pochází z časopisu Automa [4] (Příklad 1, s. 55) a slouží pro testování výpočtu nejistoty měření pro přímé měření. Tento příklad představuje měření průměru válečku pomocí posuvného měřítka se jmenovitou hodnotou 80 mm.

Naměřené hodnoty získané opakovaným měřením průměru pro výpočet standardní nejistoty typu A se nachází v Tabulce 2 níže.

**Tabulka 2: Naměřené hodnoty průměru válečku k Příkladu 1 [4]**

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_i$ [mm]	80,1	80,2	80,1	79,9	80,0	80,2	80,1	79,9	80,0	80,1

Z těchto deseti hodnot, které byly do programu zadány, je v rovnici (25) stanovena standardní nejistota typu A podle rovnice (2).

$$u_A(d) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} = 0,034 \text{ mm} \quad (25)$$

Pro výpočet standardní nejistoty typu B je třeba vzít v úvahu dva zdroje nejistot, které v tomto případě do měření vstupují. Jsou to chyba měřidla a osobní chyba, přičemž základní chyba rozlišení měřidla je udávána jako 0,05 mm a osobní chyba uživatele je stanovena jako 0,1 mm. Obě tyto hodnoty představují v programu na čelním panelu definovanou *Maximální chybu* a požadované rozdělení pravděpodobnost je v obou případech rovnoměrné, tedy  $k = \sqrt{3}$ . Standardní nejistoty typu B jednotlivých zdrojů nejistot se určí podle vzorce (4), standardní nejistota typu B všech zdrojů dohromady se pak vypočte pomocí rovnice (5).

$$u_B(z_1) = \frac{z_{1max}}{k} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ mm} \quad (26)$$

$$u_B(z_2) = \frac{z_{2max}}{k} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ mm} \quad (27)$$

Ze dvou hodnot z rovnice (26) a (27) se vypočte standardní nejistota typu B v rovnici (28).

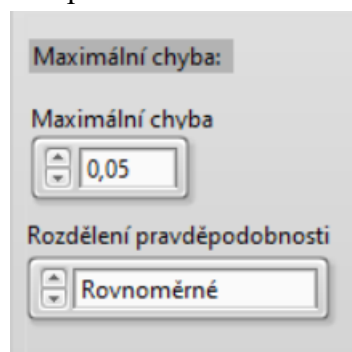
$$u_B(d) = \sqrt{(u_B(z_1))^2 + (u_B(z_2))^2} = 0,065 \text{ mm} \quad (28)$$

Kombinovaná nejistota (29) se stanoví pomocí rovnice (7) ze standardní nejistoty typu A a ze standardní nejistoty typu B.

$$u_C(d) = \sqrt{u_A^2(d) + u_B^2(d)} = 0,0731 \text{ mm} \quad (29)$$

Nyní přichází na řadu testování samotného programu. Pro načtení vstupních naměřených dat pro výpočet standardní nejistoty typu A se zvolí možnost načíst ze souboru. Data z Tabulky 2 jsou v textovém souboru oddělena mezerou, přičemž první číslo v souboru představuje počet hodnot – v tomto případě 10. Ukázku je možné vidět v kapitole 6.4.

Údaje o maximálních chybách dvou různých zdrojů nejistot jsou zadány již přímo do kolonek na čelním panelu programu, zadání údajů k prvnímu zdroji nejistoty typu B je možné vidět na Obrázku 35. Kromě zobrazených údajů je ještě třeba zadat rozložení pravděpodobnosti – rovnoměrné u prvního i druhého zdroje.



**Obrázek 35: Zadávané údaje prvního zdroje nejistoty pro výpočet standardní nejistoty typu B u Příkladu 1**

Testování v tomto případě proběhlo pro model přímého měření. Automa [4] neuvádí rozšířenou nejistotu, při testování ji program spočítal pro hodnotu koeficientu rozšíření  $k = 2$ .

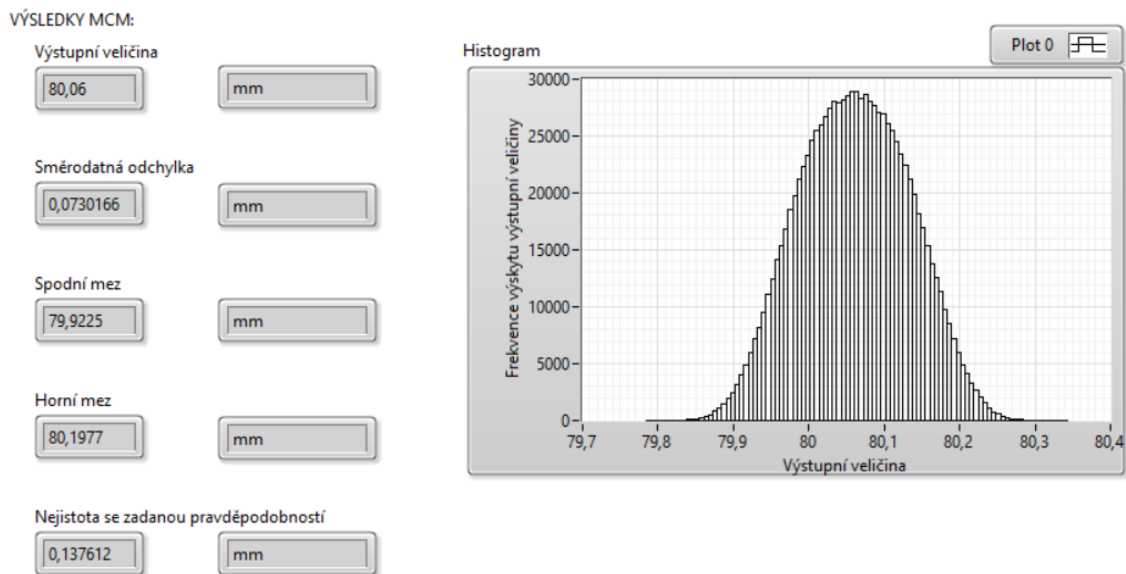




**Obrázek 36: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 1 podle GUM**

Získané výsledky pro GUM z programu vytvořeného v rámci této bakalářské práce jsou zobrazeny na Obrázku 36. Lze vidět, že vypočtené výsledky po zaokrouhlení odpovídají výsledkům příkladu z časopisu Automa [4]. Porovnání dosažených výsledků a výsledků z literatury je možné vidět v Tabulce 4 v kapitole 7.4.

Pro srovnání je možné na Obrázku 37 vidět výsledky dosažené metodou Monte Carlo. Na tomto obrázku je zobrazena hodnota výstupní veličiny, směrodatná odchylka, spodní a horní mez určující interval pro zadanou pravděpodobnost 95 % a z něj určená nejistota. Výsledné rozložení pravděpodobnosti je zobrazeno i v histogramu. Porovnání dosažených výsledků a výsledků z literatury je možné vidět v Tabulce 5 v kapitole 7.4.



**Obrázek 37: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 1 podle metody Monte Carlo**

## 7.2 Příklad 2 – nepřímé měření (podíl)

Jako druhý v pořadí byl zvolen pro testování vytvořeného programu příklad výpočtu nejistot pro podíl dvou vstupních veličin. Jako předloha složí v tomto případě příklad 5 na straně 44 zdroje [14]. Jedná se o nepřímé měření proudu  $I$ , který se získá podílem napětí  $U$  a odporu  $R$ .

Model výpočtu je zobrazen v následující rovnici (30) Ohmova zákona, výstupní veličiny se v tomto případě nastaví na nepřímé měření – podíl.

$$I [A] = \frac{U [V]}{R [\Omega]} \quad (30)$$

V tomto případě proběhlo měření napětí voltmetrem a musí být započítána chyba voltmetru, hodnota odporu je dána společně s dvěma chybami, které se k ní vážou. Pro napětí je tedy třeba uvažovat:

- naměřená data  $U$  (viz Tabulku 3),
- chyba voltmetru (0,0502 mV).

Pro rezistor s hodnotou  $R = 0,010088 \Omega$  je nutné uvažovat:

- chybu měření hodnoty odporu (0,00000807  $\Omega$ ),
- teplotní chybu odporu (0,00000303  $\Omega$ ).

Vstupní data napětí  $U$  pro výpočet standardní nejistoty typu A čítají i v tomto případě opět deset hodnot. Hodnoty jsou kvůli otestování více možností vepsány přímo do pole *Vstupní naměřená data* na čelním panelu programu, nikoliv načítána ze souboru, konkrétní hodnoty napětí je možné vidět v Tabulce 3.

**Tabulka 3: Naměřené hodnoty napětí k Příkladu 2 [14]**

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_i$ [mV]	100,68	100,83	100,79	100,64	100,63	100,94	100,60	100,68	100,76	100,65

Pro výpočet standardní nejistoty typu B pro napětí bude využita maximální chyba voltmetru 0,0502 mV s rovnoměrným rozložením pravděpodobnosti.

Pro odpor byla naměřena hodnota 0,010088  $\Omega$  s maximální chybou 0,00000807  $\Omega$  (normální rozložení). Dále je třeba uvažovat teplotní vliv, maximální teplotní chyba odporu v tomto případě představuje 0,00000303  $\Omega$  s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti.

Všechny tyto údaje byly zadány do příslušných kolonek na čelním panelu programu na záložce pro zadání vstupních údajů. Je třeba dát pozor na sjednocení jednotek, protože údaje pro napětí jsou zadány v mV. Výsledek výpočtu by měl být podle zdroje [14] rovný rovnicím (31) a (32), pro rozšířenou nejistotu je použit koeficient  $k = 2$ .

$$u_c(I) = 6,2 \text{ mA} \quad (31)$$

$$U(I) = 12 \text{ mA} \quad (32)$$

Výsledky z programu podle postupů GUM je možné vidět na Obrázku 38 a opět lze pozorovat, že se po zaokrouhlení hodnoty shodují s výsledky z literatury [14].

**VÝSLEDKY GUM:**

Standardní nejistota typu A

0

A

Standardní nejistota typu B

0

A

Kombinovaná nejistota

0,00620922

A

Rozšířená nejistota

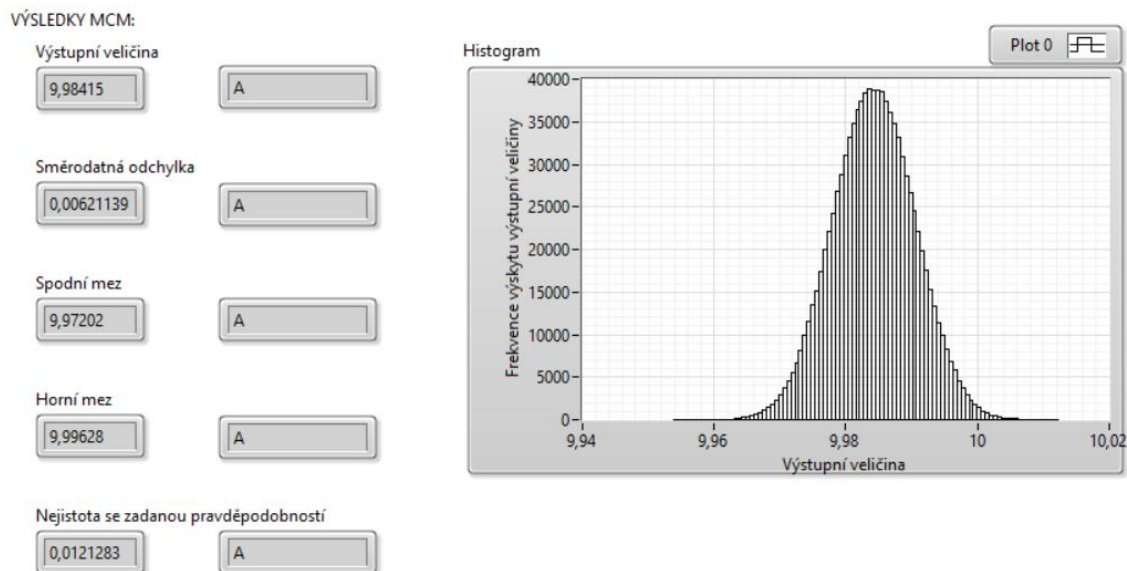
0,0124184

A

**Obrázek 38: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 2 podle GUM**

Výsledky z programu s využitím metody Monte Carlo je možné porovnat na následujícím Obrázku 39. Na tomto obrázku je zobrazena hodnota výstupní veličiny,

směrodatná odchylka, spodní a horní mez určující interval pro zadanou pravděpodobnost 95 % a z něj určená nejistota. Výsledné rozložení pravděpodobnosti je zobrazeno i v histogramu. Porovnání dosažených výsledků stanovených podle GUM a metody Monte Carlo s literaturou je možné vidět v Tabulce 6 a 7 v kapitole 7.4.



**Obrázek 39: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 2 podle metody Monte Carlo**

### 7.3 Příklad 3 – nepřímé měření (součet)

Třetí testovaný příklad bude demonstrovat výpočet nejistoty měření pro model výstupní veličiny tvořený součtem dvou vstupních veličin. Tento příklad se nachází v literatuře [14], konkrétně na straně 53.

Jedná se o příklad kalibrace multimetru a výstupní veličina – napětí na multimetru – se vypočte součtem napětí kalibrátoru a chyby multimetru.

V tomto případě nejsou zadána data pro výpočet standardní nejistoty typu A, ale je stanovena rovnou naměřená hodnota 10 V pro kalibrátor a 0,0001 V jako chyba multimetru, příklad se nezabývá stanovením standardní nejistoty typu A. Tyto dvě hodnoty tedy budou brány jako průměry vstupních veličin.

V zadání jsou dva zdroje standardní nejistoty typu B, jeden pro každou vstupní veličinu součtového modelu. Pro kalibrátor je maximální chyba uvedena jako 0,000054 V s normálním rozložením ( $k = 2,58$ ). Chyba multimetru je udávána jako 0,00005 V a rozložení pravděpodobnosti je rovnoměrné.

Pro tato vstupní data má dle literatury [14] vyjít kombinovaná a rozšířená nejistota (pro pravděpodobnost 95 %) jako na rovnicích (33) a (34).

$$u_c(U) = 35,7 \times 10^{-6} V \quad (33)$$

$$U(U) = 71 \times 10^{-6} V \quad (34)$$

Do záložky pro zadání vstupních údajů se tedy vypíší jako u předchozích příkladů zdroje nejistot typu B u obou vstupních veličin, zvolí se součtový model pro nepřímé měření a pro získání průměru a nulové standardní nejistoty typu A budou naměřené hodnoty 10 V a 0,0001 V zapsány na čelní panel jako vstupní naměřená data pro první vstupní veličinu i pro druhou vstupní veličinu pouze jednou.

Na Obrázku 40 je možné vidět kombinovanou nejistotu a rozšířenou nejistotu (pro 95% pravděpodobnost,  $k = 2$ ). Tyto hodnoty se mírně liší od výsledků z rovnic (33) a (34), protože v programu je použit pro normální rozložení koeficient  $k = 2$ , nikoliv  $k = 2,58$ , jak je v tomto konkrétním případě.

**VÝSLEDKY GUM:**

Standardní nejistota typu A

0 V

Standardní nejistota typu B

0 V

Kombinovaná nejistota

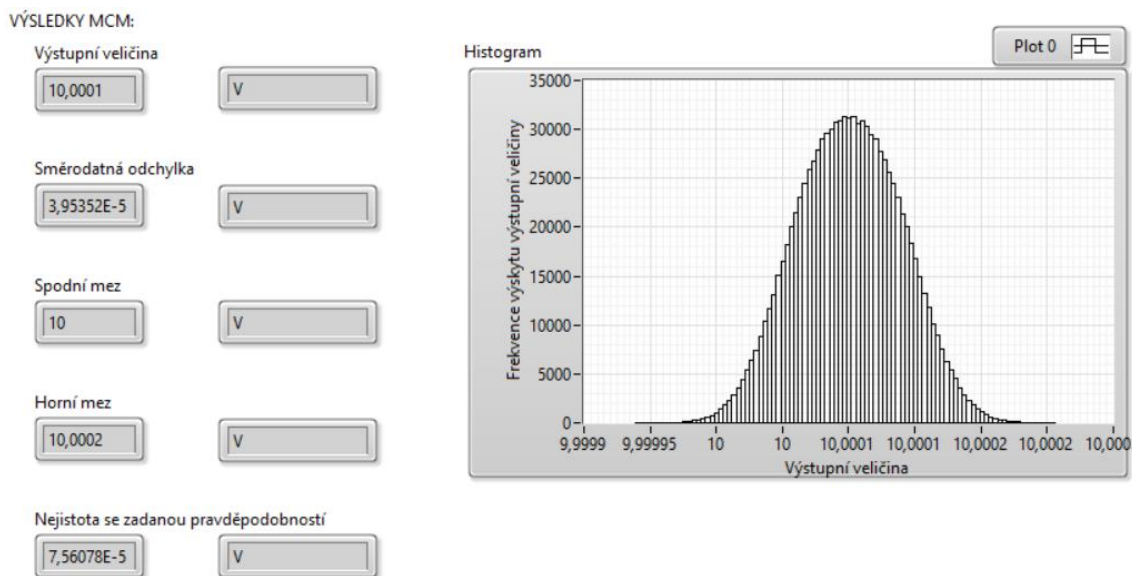
3,95264E-5 V

Rozšířená nejistota

7,90527E-5 V

**Obrázek 40: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 3 pomocí GUM**

Na Obrázku 41 je možné vidět výsledky stanovené metodou Monte Carlo. Na tomto obrázku je zobrazena hodnota výstupní veličiny, směrodatná odchylka, spodní a horní mez určující interval pro zadanou pravděpodobnost 95 % a z něj určená nejistota. Výsledné rozložení pravděpodobnosti je zobrazeno i v histogramu. Porovnání dosažených výsledků s literaturou je možné vidět v Tabulce 8 (podle GUM) a 9 (podle metody Monte Carlo) v kapitole 7.4.



**Obrázek 41: Výsledky nejistoty měření z programu v LabVIEW pro Příklad 3 pomocí metody Monte Carlo**

## 7.4 Zhodnocení dosažených výsledků

V kapitole 7 se nachází tři příklady, které demonstrují testování programu na různých modelech výpočtu výstupní veličiny. Program byl samozřejmě otestován na více příkladech, ale pro popis v práci byly vybrány příklady, které ukazují funkčnost všech částí programu.

### 7.4.1 Zhodnocení 1. příkladu

V následující Tabulce 4 se nachází srovnání dosažených výsledků s výsledky publikovanými v literatuře pro první testovaný příklad, který zkouší model přímého měření. Lze si všimnout, že dosažené výsledky stanovené metodou GUM jsou po zaokrouhlení na stejný počet desetinných míst v případě standardní nejistoty typu A a standardní nejistoty typu B totožné a v případě kombinované nejistoty se liší o jednu desetitisícinu, tento rozdíl vznikl kvůli zaokrouhlování v původním příkladu z literatury. Rozšířenou nejistotu literatura [4] neuvádí, program zobrazuje rozšířenou nejistotu pro koeficient rozšíření roven 2 (odpovídá přibližně pravděpodobnosti 95 %).

**Tabulka 4: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 1 pomocí GUM**

<b>Příklad 1 - GUM</b>	Výsledky z literatury [4]	Výsledky z programu (zaokrouhleno nahoru na stejný počet desetinných míst jako [4])
Stand. nejistota typu A	0,034 mm	0,034 mm
Stand. nejistota typu B	0,065 mm	0,065 mm
Kombinovaná nejistota	0,0731 mm	0,0730 mm
Rozšířená nejistota	0,15 mm (dopočítáno)	0,15 mm

Pro porovnání s metodou Monte Carlo slouží následující Tabulka 5, v níž je na místě kombinované nejistoty dosazena směrodatná odchylka z čelního panelu a na místě nejistoty rozšířené je nejistota se zadanou pravděpodobností 95 %.

**Tabulka 5: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 1 pomocí metody Monte Carlo**

<b>Příklad 1 – metoda Monte Carlo</b>	Výsledky z literatury [4]	Výsledky z programu (zaokrouhleno nahoru na stejný počet desetinných míst jako [4])
Kombinovaná nejistota	0,0731 mm	0,074 mm
Rozšířená nejistota ( $k = 2$ )	0,15 mm (dopočítáno)	0,14 mm

Z dosažených výsledků je patrné, že vytvořený program správně vypočetl jednotlivé složky nejistot, pokud byla použita metodika GUM. V případě využití metody Monte Carlo program také funguje správně, odchylka u kombinované nejistoty a u rozšířené nejistoty s pravděpodobností 95 % může být způsobena použitím jiné metody stanovení nejistoty měření.

## 7.4.2 Zhodnocení 2. příkladu

Pro srovnání výsledků z literatury [14] a výpočtů programu podle GUM k Příkladu 2 slouží následující Tabulka 6, tentokrát se jedná o nepřímé měření a konkrétní model výpočtu výstupní veličiny je podíl. Srovnání kombinované nejistoty uvedené v literatuře a kombinované nejistoty z čelního panelu programu po zaokrouhlení na stejný počet desetinných míst vychází totožně. V tomto případě je známa i rozšířená nejistota s uvedeným koeficientem rozšíření, která je taktéž po zaokrouhlení stejná jako nejistota uváděná v literatuře.

**Tabulka 6: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 2 pomocí GUM**

<b>Příklad 2 - GUM</b>	Výsledky z literatury [14]	Výsledky z programu (zaokrouhлено nahoru na stejný počet desetinných míst jako [14])
Kombinovaná nejistota	6,2 mA	6,3 mA
Rozšířená nejistota ( $k = 2$ )	12 mA	13 mA

Pomocí metody Monte Carlo byly dosaženy výsledky, jejichž porovnání je shrnuto v Tabulce 7. V této tabulce je na místě kombinované nejistoty dosazena směrodatná odchylka z čelního panelu a na místě nejistoty rozšířené je nejistota se zadanou pravděpodobností 95 %.

**Tabulka 7: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 2 pomocí metody Monte Carlo**

<b>Příklad 2 – metoda Monte Carlo</b>	Výsledky z literatury [14]	Výsledky z programu (zaokrouhлено nahoru na stejný počet desetinných míst jako [14])
Kombinovaná nejistota	6,2 mA	6,3 mA
Rozšířená nejistota ( $k = 2$ )	12 mA	13 mA

Z dosažených výsledků je patrné, že vytvořený program správně vypočetl jednotlivé složky nejistot, pokud byla použita metodika GUM i pokud byla využita metoda Monte Carlo, odchylky mohou být způsobeny například odlišným zaokrouhlováním v literatuře a ve výsledcích z programu.

### 7.4.3 Zhodnocení 3. příkladu

U Příkladu 3 byla opět otestována jak GUM, tak i metoda Monte Carlo. Tabulka 8 nabízí srovnání výsledků z literatury [14] a výpočtu programu pomocí GUM. Lze si všimnout odchylek, které jsou způsobené tím, že v literatuře [14] byl pro normální rozdělení použit koeficient 2,58, zatímco v programu je tento koeficient nastaven na hodnotu 2. Pokud se pro výpočet ale použil stejný koeficient jako v literatuře, výsledky byly naprosto stejné.



**Tabulka 8: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 3 pomocí GUM**

<b>Příklad 3 - GUM</b>	Výsledky z literatury [14]	Výsledky z programu (zaokrouhлено nahoru na stejný počet desetinných míst jako [14])
Kombinovaná nejistota	$35,7 \times 10^{-6} V$	$40 \times 10^{-6} V$
Rozšířená nejistota ( $k = 2$ )	$71 \times 10^{-6} V$	$80 \times 10^{-6} V$

Tabulka 9 shrnuje výsledky z programu dosažené metodou Monte Carlo, v této tabulce je na místě kombinované nejistoty dosazena směrodatná odchylka z čelního panelu a na místě nejistoty rozšířené je nejistota se zadanou pravděpodobností 95 %.

**Tabulka 9: Srovnání výsledků nejistot pro Příklad 3 pomocí metody Monte Carlo**

<b>Příklad 3 – metoda Monte Carlo</b>	Výsledky z literatury [14]	Výsledky z programu (zaokrouhлено nahoru na stejný počet desetinných míst jako [14])
Kombinovaná nejistota	$35,7 \times 10^{-6} V$	$40 \times 10^{-6} V$
Rozšířená nejistota ( $k = 2$ )	$71 \times 10^{-6} V$	$76 \times 10^{-6} V$

Z dosažených výsledků je patrné, že v obou případech se hodnoty nejistot mírně liší od výsledků uváděných v literatuře. V případě postupů podle GUM, je odchylka způsobena odlišným koeficientem pro normální rozložení, v případě metody Monte Carlo se může jednat o odchylku v rámci použití jiné metody.

## 8 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou stanovování nejistot měření a využitím softwaru LabVIEW k jejich určení. Teoretické podklady byly uvedeny ve dvou částech, a to v kapitole 2 a 3, přičemž každá z kapitol představovala jiný přístup k výpočtu nejistoty měření.

V kapitole 2 se nacházel rozbor stanovování nejistoty měření na základě postupu podle směrnice GUM. V této kapitole se nacházel podrobný popis metodiky stanovování standardní nejistoty typu A, standardní nejistoty typu B, kombinované i rozšířené nejistoty. Zahrnuta byla i problematika týkající se výpočtů nejistoty nepřímého měření a související informace o zápisu nejistot měření.

V kapitole 3 se tato bakalářská práce zaměřila na použití metody Monte Carlo pro stanovení nejistoty měření s pomocí vhodného softwarového vybavení, jakým je LabVIEW a zejména jeho generování náhodných čísel.

O prostředí LabVIEW pojednávala čtvrtá kapitola, v níž se nacházel základní popis a seznámení se softwarem LabVIEW 2017.

Kapitola 5 představuje hlavní praktickou část bakalářské práce, protože se zabývá vlastní realizací programu pro stanovení nejistoty přímého i některých modelů nepřímého měření. V kapitole byly popsány dvě hlavní VI, každé z nich provádí stanovení nejistoty měření jiným způsobem – jedno pomocí postupů směrnice GUM a druhé s využitím metody Monte Carlo.

Kromě provedení literární rešerše a tím pádem shrnutí teorie dané problematiky byl hlavním cílem bakalářské práce právě návrh a následná tvorba programu v prostředí LabVIEW, který dokáže stanovovat nejistoty měření ze zadaných dat pomocí GUM a metody Monte Carlo a umožnit uživateli porovnat dosažené výsledky.

Dvě VI pro stanovení nejistoty měření byla vsazena do stavového automatu, který nabízí uživateli snadné ovládání celého programu. Uživatel programu má možnost zadávat vstupní naměřená data ručně nebo načítat ze souboru a před skončením programu má možnost si dosažené výsledky uložit. Uživatel si také může vybrat model výpočtu výstupní veličiny, kdy kromě přímého měření může zvolit také nepřímé pro součet, rozdíl, součin a podíl dvou vstupních veličin. Uživatelský návod k programu obsahuje kapitola 6.

Program byl také v rámci bakalářské práce otestován, tomuto procesu je věnována celá kapitola 7. Program v LabVIEW byl vyzkoušen na několika konkrétních příkladech z literatury, kdy se výsledky shodovaly nebo byly velmi podobné, což ukazuje, že program je funkční a je možné jej používat pro stanovení nejistot měření.

Program pro stanovení nejistoty měření v LabVIEW, jenž byl v rámci této bakalářské práce vytvořen, bude také využíván jako výukový prostředek v předmětu Měření v elektrotechnice. V bakalářské práci byly tedy splněny všechny body zadání.

# Literatura

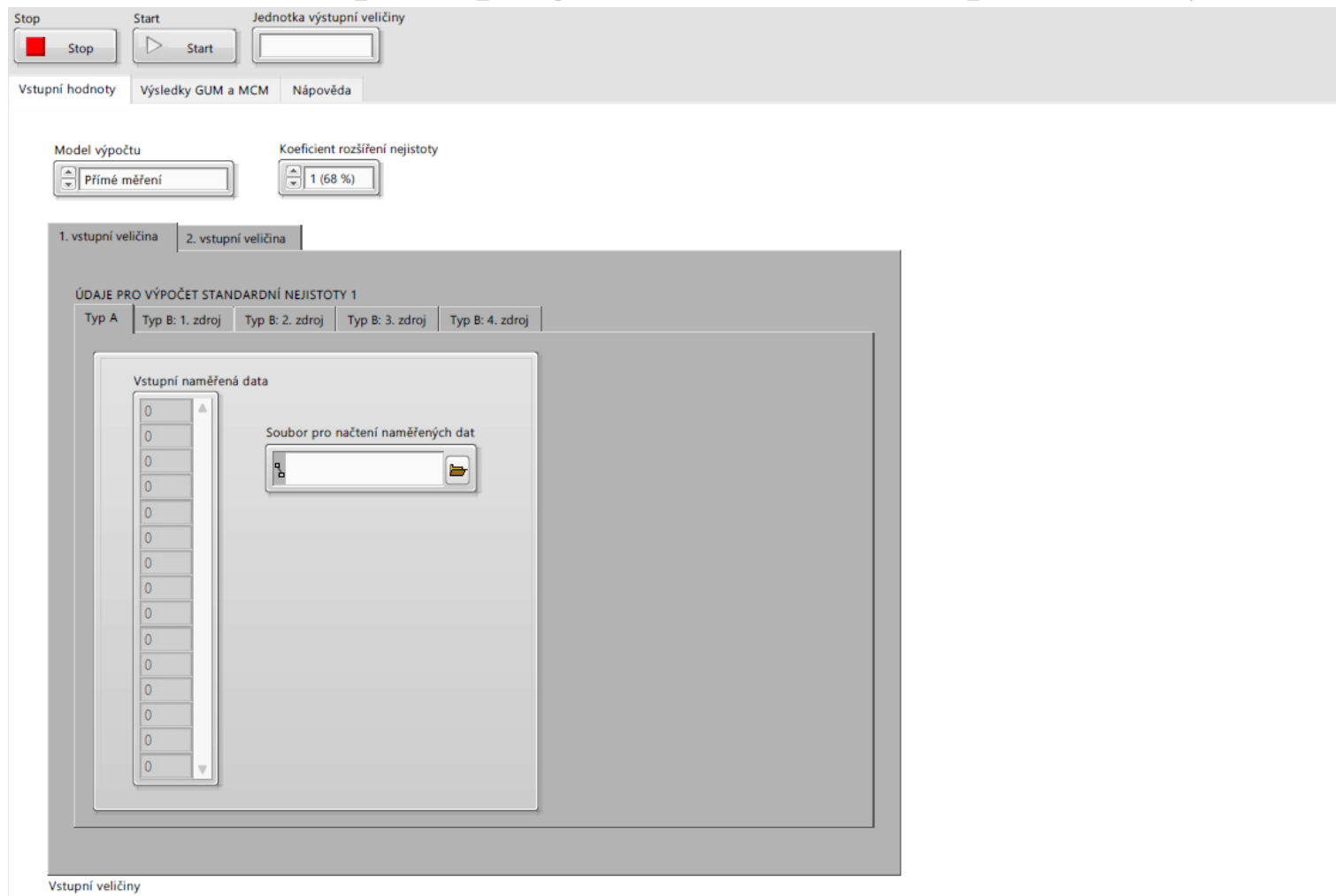
- [1] Joint Committee for Guides in Metrology, *Evaluation of Measurement Data - "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"*, Geneva, International Organization for Standardization, 1st edition, BIPM, Sevres-France, 2008.
- [2] PALENČÁR, R., F. VDOLEČEK a M. HALAJ. *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot*. Automa. 2001, 7-8, s. 50-54.
- [3] OTOMÁNSKI, P. a A. SZLACHTA. *The Evaluation of Expanded Uncertainty of Measurement Results in Direct Measurements Using the LabVIEW Environment*. *Measurement Science Review* [online]. 2008, 8(6), 147-150 [cit. 2019-10-19]. DOI: 10.2478/v10048-008-0032-9. ISSN 1335-8871. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/msr.2008.8.issue-6/v10048-008-0032-9/v10048-008-0032-9.xml>
- [4] PALENČÁR, R., F. VDOLEČEK a M. HALAJ. *Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření*. Automa. 2001, 10, s. 52-56.
- [5] SCHOVÁNEK, P. a V. HAVRÁNEK. Chyby a nejistoty měření. *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2019-12-22]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>
- [6] LUDVÍK, V. Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledků měření a s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi. In: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. *Sborníky technické harmonizace* [online]. Praha: Q-art, 2005, s. 39-48 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: [http://www.unmz.cz/sborniky\\_th/sb8/nejistoty.pdf](http://www.unmz.cz/sborniky_th/sb8/nejistoty.pdf)
- [7] PALENČÁR, R., F. VDOLEČEK a M. HALAJ. *Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření*. Automa. 2001, 12, s. 28-33.
- [8] FABIAN, F. a Z. KLUIBER. *Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění*. Praha: PROSPEKTUM, 1998, s. 11-19. ISBN 80-7175-058-1.
- [9] *Metoda Monte Carlo*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_Monte\\_Carlo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_Monte_Carlo)
- [10] Joint Committee for Guides in Metrology, *Evaluation of Measurement Data - Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" - Propagation of Distribution Using a Monte Carlo Method*, 1st edition, BIPM, Sevres-France, 2008.
- [11] WU, S., Y. LI a S. FANG. *Measurement Uncertainty Evaluation using Monte Carlo Method based on LabVIEW*. Proceedings of the 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering [online]. Paris, France: Atlantis Press, 2015, 8(6), 1151-1157 [cit. 2019-10-19]. DOI:

- 10.2991/ic3me-15.2015.223. ISBN 978-94-6252-100-1. ISSN 1335-8871.  
Dostupné z: <http://www.atlantis-press.com/php/paper-details.php?id=25837833>
- [12] VLACH, J., J. HAVLÍČEK a M. VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, 248 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [13] Chyby digitálních měřicích přístrojů. *Elektrika* [online]. Elektrika.info, c1998-2020, 26.02.2010 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/chyby-digitalnich-mericich-pristroju>
- [14] Accredited Laboratory SAC-SINGLAS, *Technical Guide 1 - Guidelines on the Evaluation and Expression of Measurement Uncertainty* [online]. 2nd edition, SPRING Singapore, 2001 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.isobudgets.com/pdf/uncertainty-guides/sac-singlas-technical-guide-1-a-guidelines-on-the-evaluation-and-expression-of-measurement-uncertainty-second-edition-march-2001.pdf>
- [15] GUIMARAES COUTO, P. R., J. CARRETEIRO a S. P. DE OLIVEIR. Monte Carlo Simulations Applied to Uncertainty in Measurement. *Theory and Applications of Monte Carlo Simulations* [online]. InTech, 2013, 2013-03-06 [cit. 2020-04-24]. DOI: 10.5772/53014. ISBN 978-953-51-1012-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/theory-and-applications-of-monte-carlo-simulations/monte-carlo-simulations-applied-to-uncertainty-in-measurement>
- [16] NOVOTNÝ, M. *Programy pro výpočet nejistoty měření metodou Monte Carlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 79 s. Vedoucí práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
- [17] ŠÍRA, M. Jak na nejistoty metodou Monte Carlo jednoduše a bez drahých programů. *Elektrorevue*. Brno: Český Metrologický Institut, 2014, 16(2). ISSN 1213-1536.

# Seznam příloh

Příloha 1 - Čelní panel programu (záložka Vstupní hodnoty) .....	61
Příloha 2 - Čelní panel programu (záložka Výsledky GUM a MCM).....	62
Příloha 3 - Přiložené CD obsahující:	
- Elektronickou verzi práce v PDF	
- Zdrojový kód programu v LabVIEW	
- Ukázková data pro načítání v textovém souboru	

# Příloha 1 - Čelní panel programu (záložka Vstupní hodnoty)



## Příloha 2 - Čelní panel programu (záložka Výsledky GUM a MCM)

