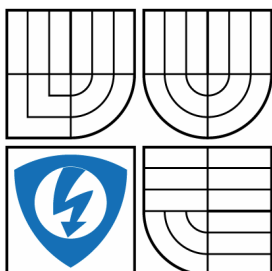


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ FREKVENCE

FREQUENCY MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Milota

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Čejka CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Míola
Ročník: 2

ID: 98555
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TĚMATU:

Měření frekvence

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1/ Seznamte se použitím stavebnice cRIO fy National Instruments
- 2/ Navrhněte využití této stavebnice pro měření frekvence neharmonického analogového signálu, vyjádřeného napětím a zpracovávaného Vámi zvoleným C modulem stavebnice. Požadujeme měření frekvence základní harmonické.
- 3/ Zpracujte potřebné SW vybavení a to jak pro FPGA, tak i vestavěný procesor a hostitelské PC
- 4/ Experimentálně ověřte dosažené vlastnosti a to jak z hlediska rozsahu měřených frekvencí, tak i nejistoty měření frekvence.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS
CompactRIO cRIO-9072/3/4. Firemní literatura National Instruments.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Miloš Čejka, CSc.
Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Tématem této práce je seznámení s platformou CompactRIO firmy National Instruments, s jeho hardwarovou paletou a možností využití této platformy pro měření frekvence analogových signálů.

Výstupem této práce je softwarová výbava pro toto zařízení se zaměřením na měření frekvence analogových signálů a experimentální ověření možností konkrétní konfigurace této platformy ve smyslu rozsahu měřitelných frekvencí.

Klíčová slova

CompactRIO, FPGA, Real-Time procesor, LabView, FFT, Zero-crossing

Abstract

The theme of this thesis is presentation of the CompactRIO platform by National Instruments with its range of hardware and the possibility of using this platform for the frequency measurement of analog signals.

The result of this thesis is software equipment for this device focusing on the frequency measurement of analog signals and experimental verification of possibilities of a specific configuration of this platform in the range of measurable frequencies.

Keywords

CompactRIO, FPGA, Real-Time procesor, LabView, FFT, Zero-crossing

Bibliografická citace:

MILOTA, M. *Měření frekvence*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 83s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Miloslav Čejka, CSc.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření frekvence jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: **21. května 2012**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miloslavu Čejkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **21. května 2012**

.....
podpis autora

1 OBSAH

1	OBSAH	7
2	SEZNAM OBRÁZKŮ	9
3	SEZNAM TABULEK	10
4	ÚVOD	11
5	FREKVENCE A JEJÍ MĚŘENÍ	12
5.1	ČÍSLICOVÉ METODY MĚŘENÍ FREKVENCE.....	12
5.1.1	DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	12
5.1.2	RYCHLÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE (FFT).....	14
5.1.3	ČÍTAČ IMPULSŮ	16
5.1.4	ZERO-CROSSING	17
5.2	VZORKOVACÍ TEORÉM	17
6	CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	19
6.1	CHYBY MĚŘENÍ.....	19
6.2	NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	19
6.2.1	ZDROJE NEJISTOT	20
6.2.2	STANDARDNÍ NEJISTOTA u_A	21
6.2.3	STANDARDNÍ NEJISTOTA u_B	22
6.2.4	KOMBINOVANÁ STANDARDNÍ NEJISTOTA u_C	22
7	PLATFORMA COMPACTRIO.....	23
7.1	CO JE COMPACTRIO.....	23
7.2	FPGA	24
7.3	JEDNOTLIVÉ ČÁSTI PLATFORMY COMPACTRIO	26
7.3.1	REAL-TIME CONTROLERS	26
7.3.2	RECONFIGURABLE EMBEDDED CHASSIS	27
7.3.3	INTEGRATED CONTROLLER AND CHASSIS SYSTEME	28
7.3.4	EXPANSION CHASSIS	29
7.3.5	COMPACTRIO I/O MODULES	30
8	POUŽITÁ HARDWAROVÁ KONFIGURACE	35
9	SOFTWAREOVÁ ČÁST	36
9.1	STRUKTURA PROJEKTU	36
9.2	PROGRAM FFT_WINDOWED.....	37
9.2.1	FPGA VI PRO FFT_WINDOWED	38
9.2.2	REAL-TIME VI PRO FFT_WINDOWED.....	40

9.2.3	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	44
9.3	PROGRAM FFT_HANDSHAKING	46
9.3.1	FPGA VI PRO FFT_HANDSHAKING	46
9.3.2	REAL_TIME VI PRO FFT_HANDSHAKING	47
9.3.3	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	50
9.4	PROGRAM COUNTER.....	52
9.4.1	FPGA VI PRO PROGRAM COUNTER.....	52
9.4.2	REAL-TIME VI PRO COUNTER.....	54
9.4.3	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY.....	57
9.5	PROGRAM SCALE_PERIOD	59
9.5.1	FPGA VI PRO PROGRAM SCALE_PERIOD	59
9.5.2	REAL_TIME VI PRO SCALE_PERIOD.....	60
9.5.3	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	63
10	ZÁVĚR.....	66
11	POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	68
12	SEZNAM ZKRATEK.....	69
13	SEZNAM PŘÍLOH	69

2 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 5.1 Průběhy základních oken v časové oblasti [2]	15
Obr. 5.2 Normovaná spektra základních oken (obdélník, Hann, Hamming, Blackman) [2]	16
Obr. 5.3 Metoda čítání impulsů [3].....	16
Obr. 5.4 Princip metod Zero-crossing a Threshold-crossing	17
Obr. 5.5 Správné použití Shannon-Kotelníkůvova teoremu	18
Obr. 5.6 Aliasing	18
Obr. 7.1 Architektura systému CompactRIO [6]	23
Obr. 7.2 Spojení platformy LabView s FPGA [6]	24
Obr. 7.3 Příklad spojení buněk v hradlovém poli [6].....	25
Obr. 7.4 Kontrolér NI cRIO-9024 [6]	26
Obr. 7.5 Šasi NI cRIO-9116 [6]	27
Obr. 7.6 Vzájemné propojení obou komponent [7]	28
Obr. 7.7 Integrovaný systém cRIO-907x [6].....	28
Obr. 7.8 Rozšiřující šasi NI 9144 [6]	29
Obr. 7.9 Analogový vstupní modul NI cRIO 921S [6]	30
Obr. 7.10 Digitální vstupní modul NI 9402 [6].....	31
Obr. 7.11 CAN komunikační modul NI 9853 [6]	32
Obr. 7.12 PROFIBUS komunikační modul [6].....	33
Obr. 7.13 Modul pro sériovou komunikaci NI9870 [6]	34
Obr. 7.14 Modul pro vkládání paměťových karet SD NI9802 [6].....	34
Obr. 8.1 Hardwarová konfigurace.....	35
Obr. 9.1 Struktura projektu v programu LabView	37
Obr. 9.2 FPGA VI programu FFT_WINDOWED	38
Obr. 9.3 Ovládací panel FPGA VI programu FFT_WINDOWED.....	39
Obr. 9.4 REAL-TIME VI programu FFT_WINDOWED.....	40
Obr. 9.5 Část programu zajišťující komunikaci s podřízeným VI programu FFT_Windowed ..	41
Obr. 9.6 Programová část zajišťující komunikaci mezi VI a generátorem	41
Obr. 9.7 Hlavní programová část uvnitř bloku While Loop programu FFT_Windowed	42
Obr. 9.8 Ovládací panel programu FFT_Windowed.....	43
Obr. 9.9 FPGA VI programu FFT_Handshaking.....	46
Obr. 9.10 Ovládací panel FPGA VI programu FFT_Handshaking.....	47
Obr. 9.11 REAL_TIME VI programu FFT_Handshaking.....	47

Obr. 9.12 Programová část zajišťující komunikaci s podřízeným VI programu FFT_Hanshaking	48
Obr. 9.13 Hlavní programová část uvnitř smyčky While Loop programu FFT_Handshaking...	49
Obr. 9.14 Ovládací panel programu FFT_Handshaking	50
Obr. 9.15 FPGA VI programu COUNTER.....	52
Obr. 9.16 Ovládací panel FPGA VI programu COUNTER.....	53
Obr. 9.17 REAL-TIME VI programu COUNTER	54
Obr. 9.18 Programová část zajišťující komunikaci s podřízeným VI programu Counter.....	55
Obr. 9.19 Hlavní programová část uvnitř bloku While Loop programu Counter	55
Obr. 9.20 Ovládací panel programu COUNTER	56
Obr. 9.21 FPGA VI programu SCALE_PERIOD.....	59
Obr. 9.22 Ovládací panel FPGA VI programu SCALE_PERIOD	60
Obr. 9.23 REAL-TIME VI programu SCALE_PERIOD	61
Obr. 9.24 Hlavní programová část uvnitř While Loop programu SCALE_PERIOD.....	62
Obr. 9.25 Ovládací panel programu SCALE_PERIOD.....	63

3 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Korekční koeficient.....	22
Tab. 2 Přehled variant FPGA Virtex-5 využívaných v systému CompactRIO.....	25
Tab. 3 Tabulka nejistot programu FFT_Windowed.....	45
Tab. 4 Tabulka nejistot programu FFT_Handshaking	51
Tab. 5 Tabulka nejistot programu Counter pro 100 vzorků.....	58
Tab. 6 Tabulka nejistot programu Counter pro 1000 vzorků.....	58
Tab. 7 Tabulka nejistot programu Scale_Period pro 100 vzorků.....	64
Tab. 8 Tabulka nejistot programu Scale_Period pro 1000 vzorků.....	64

4 ÚVOD

Obsah této diplomové práce je zaměřen na práci s platformou CompactRIO firmy National Instruments. Toto zařízení je vhodné pro Real-Time aplikace rozličného druhu, díky jeho široké modularitě a možnosti individuální konfigurace ze strany uživatele. Programování tohoto zařízení probíhalo v prostředí LabView, které dokáže využít plný potenciál tohoto zařízení.

Jako první se tato práce zabývá získáním základního přehledu a orientace v platformě CompactRIO, je zde uveden základní přehled hardwarové nabídky ze strany National Instruments pro tuto platformu a popis jednotlivých částí platformy, které jsou uživatelům k dispozici.

Dalším cílem, této práce je navrhnout softwarové vybavení pro tuto platformu, pomocí kterého by bylo možno měřit frekvenci neharmonického analogového signálu. Bylo vytvořeno několik programů, pracujících na různých principech, pomocí kterých můžeme měřit základní harmonické složky signálů. V těchto programech bylo využito programovatelného hradlového pole FPGA, které tvoří největší přednost platformy CompactRIO, ve spojení s jeho Real-Time procesorem. Pomocí této programové výbavy bylo možné experimentálně ověřit reálné možnosti tohoto zařízení v oblasti rozsahu měřitelných frekvencí.

5 FREKVENCE A JEJÍ MĚŘENÍ

Frekvence stanovuje počet pravidelně se vyskytujících jevů za jednotku času. Velké množství fyzikálních systémů vykazuje cyklické chování, od planet, které obíhají svou hvězdu s určitou periodou oběhu, až po akustické a elektromagnetické vlny, které kmitají s určitým kmitočtem. Doba trvání jednoho cyklu může nabývat značně rozdílných hodnot, od 10^{-27} s pro elektromagnetická pole spojená s kosmickým gamma zářením až po stovky let rotace galaxií ve vesmíru. Jednotkou frekvence je hertz [Hz], pojmenovaná po Heinrichu Hertzovi, který zkoumal povahu elektromagnetického záření. [1] Převrácenou hodnotou frekvence je perioda, udávající časový interval trvání jednoho cyklu. Měření kmitočtu vlastností charakteristických pro daný systém můžeme zjistit cenné informace o jeho vlastnostech a chování. Spolu s teplotou a napětím patří frekvence mezi nejčastěji měřené veličiny v moderní vědě.

5.1 ČÍSLICOVÉ METODY MĚŘENÍ FREKVENCE

Metody pro měření frekvence, které jsou v této práci použité jsou popsány v následující kapitole. Jedná se v podstatě o použití čítače impulsů, metodu Zero-crossing a o použití diskretní Fourierovy transformace pro stanovení frekvenčního spektra měřeného signálu.

5.1.1 DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE

Dle [2], je frekvenční spektrum vzorkovaného signálu $X(e^{j\theta})$ spojitá funkce normované kruhové frekvence θ počítána z nekonečného počtu hodnot $x(n)$. Při zpracování diskretních signálů se pracuje s konečným počtem vzorků frekvenčního spektra. Počet vzorků signálu N je stejný jak pro časovou tak frekvenční oblast a pro přímou i zpětnou transformaci jsou považovány za periodické. Tento přechod z časové oblasti signálu $x(n)$ od frekvenční $X(k)$ se používá tzv. finitní Fourierova transformace, v případě diskretních signálů mluvíme o diskretní Fourierově transformaci, kterou značíme DFT a je definována vztahy

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (4.1)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi}{N} nk} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (4.2)$$

Vztah (4.1) je pro přímou DFT a vztah (4.2) je pro inverzní (zpětnou) DFT. DFT tedy počítá N hodnot spektra X(k) z N hodnot signálu x(n). Parametry spektra signálu tedy dostaneme pro diskrétní hodnoty frekvencí počínající hodnotou f = 0 a vzdálené od sebe o hodnoty podle vztahu (4.3). Množinu těchto hodnot nazýváme DFT mřížka a hodnota Δf se nazývá frekvenční bin. NT je pak celková doba odebrání signálu. [2]

$$\Delta f = \frac{1}{NT} = \frac{f_{vz}}{N} \quad (4.3)$$

5.1.1.1 Volba počtu bodů N pro DFT

Mějme periodický diskrétní signál s periodou N_p v podobě posloupnosti vzorků, jejíž hodnoty se v této posloupnosti opakují vždy po N_p hodnotách. Platí tedy vztah [2]:

$$x(n + sN_p) = x(n) \quad \text{kde } s \text{ je celé číslo} \quad (4.4)$$

Pro tyto signály existuje podmínka (1)

$$N = l \cdot N_p \quad \text{kde } l \text{ je přirozené číslo} \quad (4.5)$$

Podle [2], při splnění podmínky (1) je obálka periodického pokračování funkce x(n) identická s analogovou funkcí x(t), jejímž navzorkováním jsme získali tuto diskrétní posloupnost hodnot x(n). Nedochozí tedy ke skokům obálky x(n) na hranicích základního intervalu, které v x(t) také nebyly. Díky tomu nedochází k rozmazávání spektra signálu, tedy nedojde k prosakování energie do sousedních frekvenčních binů. V angličtině tomuto jevu říkáme leakage.

Důvodem existence této podmínky je fakt, že dnes se povětšinou pro výpočet DFT používá algoritmus rychlé Fourierovy transformace (FFT), která je popsána v následující kapitole. Tyto algoritmy pak vyžadují platnost a splnění podmínky (2)

$$N = 2^m \quad \text{kde } m \text{ je přirozené číslo} \quad (4.6)$$

Nemůžeme-li zajistit současnou platnost podmínky (1) a (2), N pak volíme podle podmínky (2) a signál $x(n)$ pak pro zmenšení chyby při určení frekvencí jednotlivých složek spektra upravíme datovým nebo-li časovým oknem [2].

5.1.2 RYCHLÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE (FFT)

Rychlá Fourierova transformace (FFT), v angličtině Fast Fourier Transform, jsou velmi efektivní algoritmy využívající k výpočtu diskrétní Fourierovy transformace (DFT). Základní z nich popsali v roce 1965 J.W.Cooley a J.W.Tourkey a představovali revoluci v číslicovém zpracování signálů. V dnešních dnech existuje celá řada algoritmů pro výpočet FFT. Algoritmy rychlé Fourierovy transformace se využívají pro spektrální analýzu jak deterministických tak stochastických signálů, pro výpočet konvoluce, frekvenčních charakteristik a pro číslicovou filtraci. Základní a nejpoužívanější algoritmy pro výpočet rychlé Fourierovy transformace jsou navrženy pro délku transformace $N = 2^m$. Tyto algoritmy využívají periodičnost a symetrií komplexní exponenciály v (4.1). Exponenciála podle (4.7) se nazývá otáčecí činitel (twiddle factor) a označuje se W_N [2].

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (4.7)$$

Pro tento činitel platí dále:

$$W_N^{kn} = W_N^{(k+N)n} = W_N^{k(n+N)} \quad (4.8)$$

$$W_N^{2kn} = W_{N/2}^{kn} \quad (4.9)$$

5.1.2.1 Definice datových (časových) oken

Dle [2], v případě že nemůžeme splnit podmínku (1) a (2), tak při volbě N pro výpočet DFT, musíme signál $x(n)$ upravit datovým (časovým) oknem $w(n)$, čímž snížíme chybu při určování frekvence jednotlivých složek spektra. Úprava datovým se řídí následujícím vztahem

$$x_w(n) = x(n) \cdot w(n) \quad (4.10)$$

Datových oken existuje velké množství, z nejpoužívanějších uvedeme například okno Hann, často označované Hanning. Mezi další můžeme jmenovat například obdélníkové okno, trojúhelníkové okno (Barlett), okno Hamming a okno Blackman. Uvedme nyní základní vlastnosti těchto oken [2]:

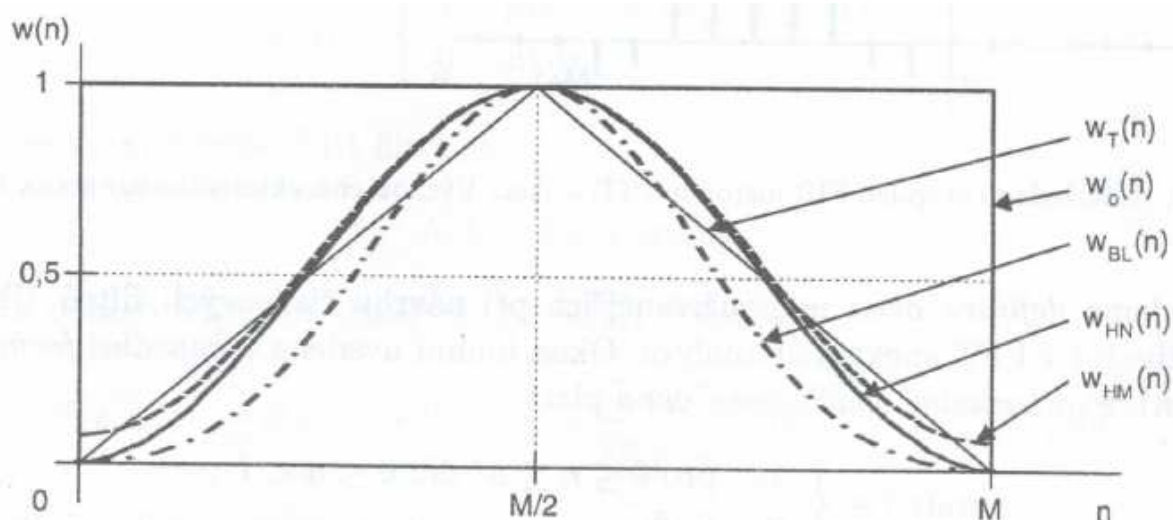
$$\text{Okno Hanning: } w_{HN}(n) = 0.5 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}\right)\right), \quad 0 \leq n < N$$

$$\text{Obdélníkové okno: } w_o(n) = 1, \quad 0 \leq n < N$$

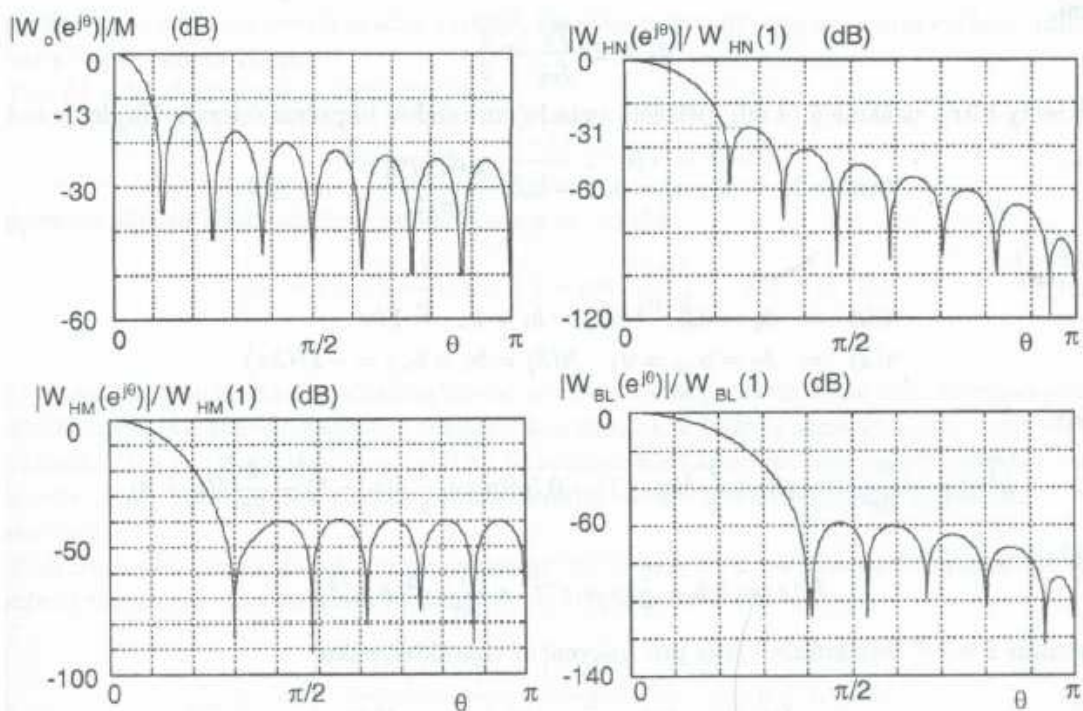
$$\text{Okno Barlett: } w_B(n) = \frac{n}{\frac{N}{2}}, \quad 0 \leq n < N$$

$$\text{Okno Hamming: } w_{HM}(n) = 0.54 - 0.46 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}\right), \quad 0 \leq n < N$$

$$\text{Okno Blackman: } w_{BL}(n) = 0.42 - 0.50 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}\right) + 0.08 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}\right)^2, \quad 0 \leq n < N$$



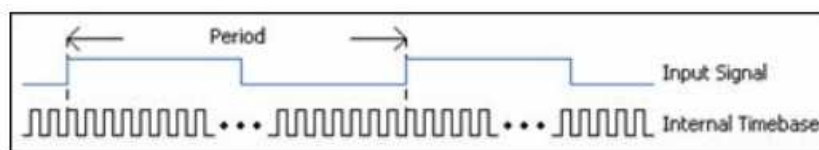
Obr. 5.1 Průběhy základních oken v časové oblasti [2]



Obr. 5.2 Normovaná spektra základních oken (obdělík, Hann, Hamming, Blackman) [2]

5.1.3 ČÍTAČ IMPULSŮ

Princip, na kterém tato metoda měření frekvence pracuje, je velice jednoduchý. Jedná se o počítání period vysokofrekvenčního signálu, během jedné periody signálu s relativně nízkou frekvencí vůči signálu vysokofrekvenčnímu, jak je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 5.3 Metoda čítání impulsů [3]

Výpočet probíhá podle vztahu (4.11), kde po zjištění počtu period vysokofrekvenčního signálu, při znalosti periody tohoto vysokofrekvenčního signálu z jeho frekvence, jednoduchým přepočtem dojdeme k hodnotě hledané frekvence. Konec a začátek hledané periody signálu detekujeme metodou Zero-crossing, která je popsána v další kapitole.

$$f_x = \frac{1}{m \cdot \frac{1}{f_v}} \quad [\text{Hz}] \quad (4.11)$$

kde

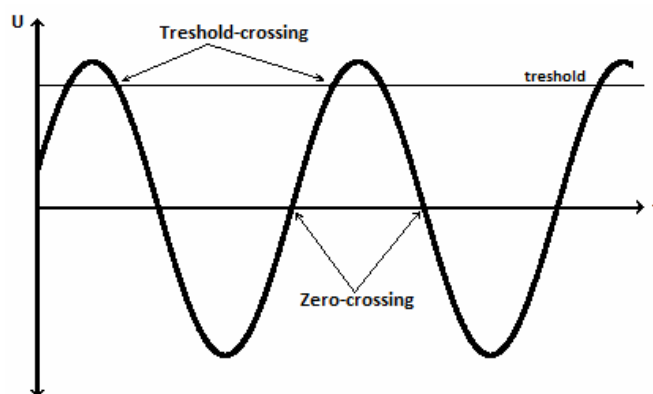
f_x – hledaná neznámá frekvence

m – počet period vysokofrekvenčního signálu

f_v – frekvence vysokofrekvenčního signálu

5.1.4 ZERO-CROSSING

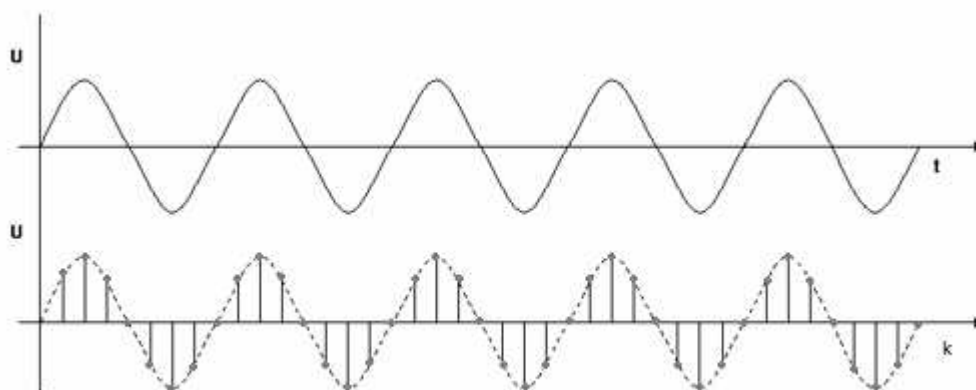
Jednou z používaných metod v této práci je metoda Zero-crossing, nebo Threshold-crossing. Tyto metody se používají k detekci průchodu signálu přes definovaný práh (threshold) u metody Threshold-crossing nebo přechod přes nulovou hodnotu u metody Zero-crossing. Princip metody je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 5.4 Princip metod Zero-crossing a Threshold-crossing

5.2 VZORKOVACÍ TEORÉM

Vzorkovací teorém (sampling theorem) nebo také Shannon-Kotelníkův teorém říká, že pokud vzorkujeme alespoň dvakrát rychleji než je největší kmitočet ve spektru vzorkovaného signálu nedochází poté k vzájemnému překrytí spekter a my jsme poté schopni zpětně rekonstruovat signál spojitý. Jedině při dodržení těchto podmínek nedochází ke ztrátě informace během vzorkování.



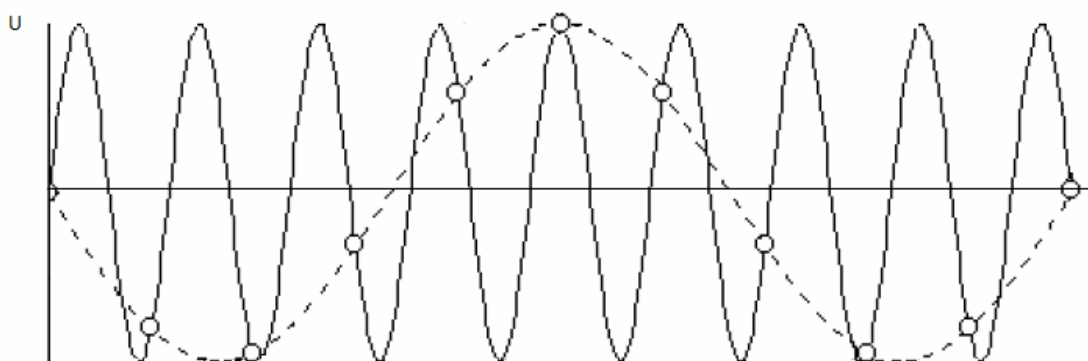
Obr. 5.5 Správné použití Shannon-Kotelnikova teoremu

Platí tedy vztah :

$$f_s \geq 2 \cdot f_{\max} \Leftrightarrow T_s = \frac{\pi}{\omega_{\max}} \quad (4.12)$$

Překročení Shannon-Kotelnikova teoremu vede ke vzniku jevu, jemuž se říká Aliasing. Projevem tohoto jevu je ztráta informace navzorkovaného signálu a jeho chybná rekonstrukce.

Vidíme zde signál, který svojí frekvencí výrazně překračuje podmínku vyplývající z Shannon-Kotelnikova teoremu a navzorkovaný signál je poté chybně interpretován jako signál s výrazně nižší frekvencí.



Obr. 5.6 Aliasing

6 CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ

6.1 CHYBY MĚŘENÍ

Chyby měření, určují přesnost měření, která je hlavním kritériem pro posouzení kvality takového měření. Vyjadřují míru blízkosti naměřené hodnoty k hodnotě skutečné. A kvantitativně jsou vyjádřeny chybou měření [4].

Absolutní chyba

Chyba jediného měření se vyjadřuje jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou a hodnotou skutečnou. Absolutní chyba tedy je:

$$\Delta x = X_M - X_P \quad [\text{Jednotky veličiny X}] \quad (5.1)$$

kde

X_M - naměřená hodnota

X_P - skutečná hodnota

Absolutní chyba měření je obvykle užívána k vyhodnocení přesnosti výsledků metody.

Relativní chyba

Relativní chyba měření je obvykle používána k vyhodnocení přesnosti měřící metody.

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{X_M} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.2)$$

6.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Dle [5], nejistoty měření stanovujeme při vyhodnocování měření ve výzkumu a technické praxi při:

1. experimentálním ověřování fyzikálních zákonů a určování hodnot fyzikálních konstant
2. definičních měřeních, reprodukci jednotek fyzikálních a technických veličin a vyhodnocování meteorologických vlastností primárních etalonů.

3. kalibraci sekundárních etalonů a pracovních (provozních) měřidel
4. typových zkouškách měřidel a vyhodnocování jejich technických a meteorologických vlastností
5. vyhodnocování přesných měření v oblasti zkušebnictví a kontroly jakosti výrobků
6. úředních měření ve smyslu zákona o metrologii
7. ostatních přesných a závazných měření v technické praxi, např. přejímacích a garančních zkouškách, měření množství látek a energií v hospodářském styku, měření složení a vlastností materiálů apod.

Nejistota měření udává rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze důvodně přisoudit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se netýká pouze výsledků měření, ale i měřících přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na nichž nejistota výsledku měření závisí. Základem pro stanovení nejistot měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které nám stanovuje, jak se jednotlivé hodnoty můžou odchylovat od hodnoty skutečné, resp. pravděpodobnost, s jakou se v intervalu stanovenou nejistotou může nacházet hodnota skutečná.

6.2.1 ZDROJE NEJISTOT

Za zdroje nejistot můžeme označit veškeré jevy, které mohou svým působením ovlivnit neurčitost jednoznačného stanovení výsledků měření, a tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. Značnou roli zde také nahrává skutečnost, zda je použita metoda přímého nebo nepřímého měření. Jevy působící na nejistotu jsou např. výběr měřících přístrojů analogových nebo číslicových, použití různých filtrů, vzorkovačů a dalších přístrojů v celé trase přenosu a úpravy měřícího signálu. Velmi výrazně se také projevují rušivé vlivy prostředí. Níže je uveden výpis nejistot které působí v následujících měřeních [5] :

1. nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny nebo její realizace
2. nevhodný (nereprezentativní) výběr vzorků měření
3. zjednodušení (zaokrouhlení) konstant a převzatých hodnot
4. neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí
5. špatná volba měřící metody
6. subjektivní vliv obsluhy
7. nepřesnost etalonů a referenčních materiálů

6.2.2 STANDARDNÍ NEJISTOTA u_A

Podle [5], Odhad údaje y měřené veličiny je dán výběrovým průměrem \bar{y} z n naměřených hodnot y_i podle vztahu:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (5.3)$$

Odhad rozptylu naměřených hodnot, označovaný jako výběrový rozptyl $s^2(y_i)$ se určí ze vztahu:

$$s^2(y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (5.4)$$

Odmocninou výběrového rozptylu se získá výběrová směrodatná odchylka $s(y_i)$, která charakterizuje rozptyl naměřených hodnot kolem výběrového průměru \bar{y} .

Rozptyl výběrových průměrů $s^2(\bar{y})$ se určí ze vztahu:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{s^2(y_i)}{n} \quad (5.5)$$

Směrodatná odchylka výběrových průměrů $s(\bar{y})$ je zvolena ze standardní nejistoty typu A, tedy :

$$u_A \equiv s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (5.6)$$

Pokud je počet opakovaných měření menší než deset a není možné učinit kvalifikovaný odhad na základě zkušenosti, určí se korigovaná nejistota u_{Ak} ze vztahu:

$$u_{Ak} = k \cdot s(\bar{y}) \quad (5.7)$$

kde k je korekční koeficient závislý na počtu opakovaných měření, jak je uvedeno v tabulce Tab.1.

Počet měření	9	8	7	6	5	4	3	2
Korekční koeficient k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

Tab. 1 Korekční koeficient

6.2.3 STANDARDNÍ NEJISTOTA u_B

Dle [8], nejistoty B jsou stanoveny jinak než opakovaným měřením. Je nutné nejprve najít všechny možné zdroje nejistot a vyjít z těch, které můžeme kvantifikovat.

Tyto nejistoty musíme tedy znát, například z technické dokumentace, popřípadě je nutné je odhadnout z intervalu hodnot, ve kterém mohou ležet. Pokud je nutné učinit odhad, vycházíme z intervalu hodnot v němž se výsledky měření mohou nacházet. Ze znalosti intervalu hodnot pak určíme nejistotu B zdroje z dle vztahu (5.8).

$$u_{Bz} = \frac{\Delta_{z \max}}{\chi} \quad (5.8)$$

Kde

$\Delta_{z \max}$ – odhadnutý interval hodnot

χ - koeficient vázaný na tvar rozložení

Tvar rozložení nejčastěji roven rozložení rovnoměrnému, kde $\chi = \sqrt{3}$. Takto určíme jednotlivé zdroje nejistot u_{Bz} a výslednou nejistotu pak získáme ze vztahu (5.9), za předpokladu že dílčí nejistoty jsou nekorelované.

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} \quad (5.9)$$

6.2.4 KOMBINOVANÁ STANDARDNÍ NEJISTOTA u_C

Tato nejistota se určí ze vztahu:

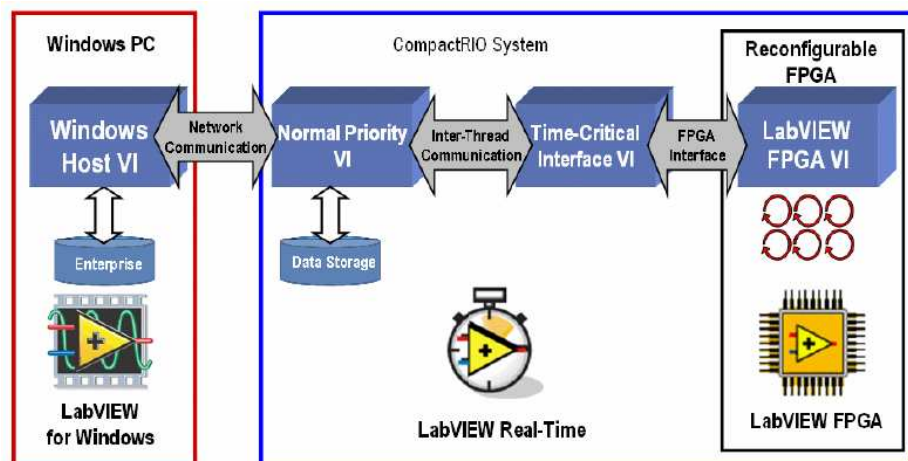
$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} \quad (5.10)$$

7 PLATFORMA COMPACTRIO

Cílem této kapitoly je seznámit čtenáře se systémem CompactRIO dodávaného firmou National Instrument. Budou zde přiblíženy jednotlivé části systému a tím získán základní přehled a orientace v tomto systému. Seznámíme se zde s hlavní výhodou tohoto systému, kterou tvoří využití programovatelných hradlových polí FPGA.

7.1 CO JE COMPACTRIO

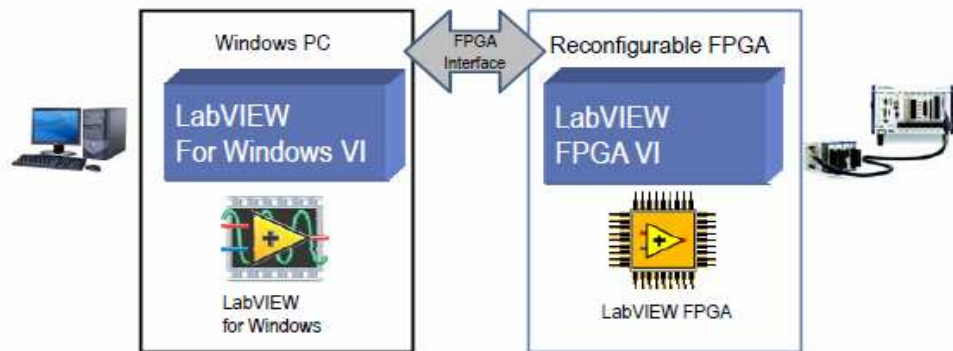
CompactRIO je modulární systém firmy National Instrument. CompactRIO programovatelný automatizovaný kontrolér (PAC – programmable automation controller), je nízkonákladové konfigurovatelné zařízení a systém pro sběr dat, pro aplikace, které požadují vysoký výkon a spolehlivost, pracující v reálném čase. Tento systém kombinuje otevřenou architekturu, malou velikost, extrémní odolnost. Systém CompactRIO se skládá z uživatelsky-programovatelného logického hradlového pole (FPGA), za provozu vyměnitelných vstupně výstupních (I/O) modulů, Real-time řadiče pro deterministickou komunikaci a zpracování dat. Programování tohoto systému probíhá pomocí platformy LabView, která nabízí možnost plného využití tohoto systému [6].



Obr. 7.1 Architektura systému CompactRIO [6]

7.2 FPGA

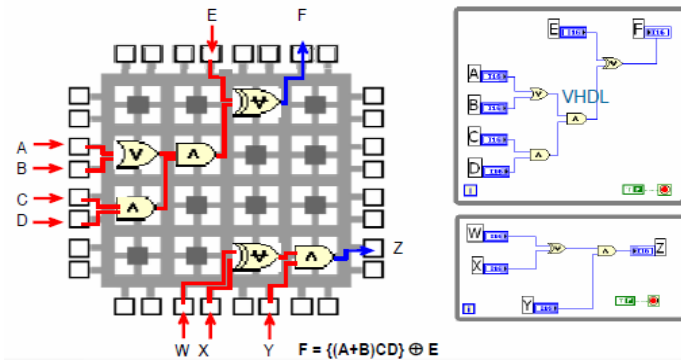
Jednou z hlavních výhod systému CompactRIO tvoří využití programovatelných hradlových polí (FPGA). Mezi hlavní benefity FPGA patří hlavně nízká spotřeba energie, prostorová úspornost. Ve spojení s platformou LabView dochází k uživatelsky příjemnému, přímému přeložení programu pomocí kompilátoru přímo do struktury hradel, a poté je tento program díky tomu prováděn podstatně rychleji než ve strojovém kódu na univerzálních procesorech x86. Na těchto procesorech by sdílelo jeho prostředky více procesů, díky využití programovatelných hradlových polí je provádění jednotlivých procesů zcela nezávislé, paralelní, deterministické a zcela bez možnosti přerušení procesem s nižší prioritou. Protože čas procesoru není sdílený, lze dosáhnout naprosto přesného časování.



Obr. 7.2 Spojení platformy LabView s FPGA [6]

Programovatelná hradlová pole (FPGA) jsou speciální integrované obvody, různě složité programovatelné bloky propojené konfigurační maticí spojů. Struktura typického obvodu je složena ze základních logických buněk (cells), propojených konfigurovatelnými přepínači. Programovatelná matice (fabric) je obklopena konfigurovatelnými I/O buňkami zajišťující komunikaci s okolním světem. Vychází se zde z logických obvodů firmy Xilinx.

Dříve práce s FPGA vyžadovala znalost programovacího jazyka např. VHDL, ovšem díky firmě National Instruments a produktu LabView probíhá konfigurace těchto programovatelných polí graficky, tak jak je zvykem v tomto prostředí. Samotný převod kódu zajistí automaticky kompilér, díky softwaru firmy Xilinx integrovaného v LabView v příslušném modulu pro programování FPGA.



Obr. 7.3 Příklad spojení buněk v hradlovém poli [6]

Jak vidíme na obr.7.3 lze vytvořit libovolné propojení jednotlivých buněk v FPGA poli a vytvořit tak požadovanou logickou funkci, která je schopna zpracovat svoji logikou vstupní signál a hned zprostředkovat výsledek na výstupu.

Nově je v systému CompactRIO využito nové verze FPGA s označením Virtex-5 FPGA. FPGA Virtex-5 je vylepšenou verzí předchozí generace Virtex-II, jejíž přidanou hodnotou je vylepšení a optimalizování funkcí, které uživatelům přinesou rychlejší spouštění kódu a zvyšují kapacitu kódu. Novinkou je 6-ti vstupová LUT architektura, pro podstatně lepší využívání zdrojů. Oproti předchozí verzi Virtex-II, která byla tvořena 4 vstupovou LUT architekturou došlo k zvýšení logických kombinací, které mohou vzniknout v jednom bloku FPGA pole z 16 na 64. Jednotlivé bloky FPGA pole jsou též umístěny vzájemně v těsné blízkosti pro snížení doby, kterou potřebují elektrony k přechodu z jednoho bloku do druhého. Toto všechno umožňuje FPGA Virtex-5 optimalizaci kódu a provedení více operací v jediném hodinovém cyklu.

V systému CompactRIO se můžeme setkat s několika variantami Virtex-5 FPGA, lišících se v počtu programovatelných logických buněk, jejich přehled je v následující tabulce. Tyto programovatelná hradlová pole mohou pracovat s několika časovými základnami a to na frekvencích 40, 80, 120, 160, nebo 200 MHz.

FPGA	LUTs and Flip-Flops	Multipliers
Virtex-5 LX30	19,200	32
Virtex-5 LX30	19,200	48
Virtex-5 LX50	28,800	48
Virtex-5 LX85	51,840	48
Virtex-5 LX110	69,120	64

Tab. 2 Přehled variant FPGA Virtex-5 využívaných v systému CompactRIO

7.3 JEDNOTLIVÉ ČÁSTI PLATFORMY COMPACTRIO

7.3.1 REAL-TIME CONTROLLERS

Real-time kontroléry systému CompactRIO firmy National Instruments jsou výkonné samostatně pracující zařízení schopné vykonávat real-time aplikace navržené v prostředí LabView. Tyto kontroléry jsou navrženy jako extrémně stabilní, spolehlivé systémy pracující s nízkou spotřebou energie, s dvojitými napájecími vstupy v rozsahu 9 - 35 V(DC), díky čemuž mohou dlouhodobě pracovat na baterie nebo například na solární napájení. Jsou schopné pracovat v rozsazích teplot mezi (-40 – 70)°C. Podle provedení konkrétního kontroléru, dosahují tyto zařízení různé hardwarové vybavenosti. Nejvýkonnější varianta těchto kontrolérů je osazena až 800 MHz real-time procesorem, schopným zpracovávat náročné real-time aplikace, obsahuje až 512 MB DDR2 RAM a je osazena až 4GB paměti pro uchování dat a programů. Tyto systémy nabízejí také několik portů pro konektivitu zařízení. Mezi něž patří dva Ethernet 10/100 porty, které jsou využívány pro programovou komunikaci po síti, také obsahují vestavěný Web(HTTP) a FTP server. Systém je osazen také vysokorychlostním USB host portem, který nám umožňuje připojit externí USB úložiště jako jsou flash disky a pevné disky. Tento systém je fault-tolerant, poskytující zvýšenou spolehlivost pro data aplikací. V nabídce je několik variant, které se liší výkonem a zaměřením pro konkrétní aplikace.



Obr. 7.4 Kontrolér NI cRIO-9024 [6]

7.3.2 RECONFIGURABLE EMBEDDED CHASSIS

Tato součást, představuje srdce systému CompactRIO, protože v těchto šasi je obsažena hlavní součást systému a to jádro programovatelného hradlového pole FPGA. K tomuto jádru máme možnost připojení jakéhokoliv dostupného vstupně/výstupního modulu do systému a snadnou programovou práci s těmito moduly ať už pro čtení nebo pro zápis dat.

Protože neexistuje žádná komunikační sběrnice mezi jádrem FPGA a vstupně/výstupními moduly, jsou vzájemné operace mezi jednotlivými vstupně/výstupními moduly a FPGA jádrem přesně synchronizovány s rozlišením 25 ns. Proto můžeme provést přímé vzájemné propojení jednotlivých modulů.

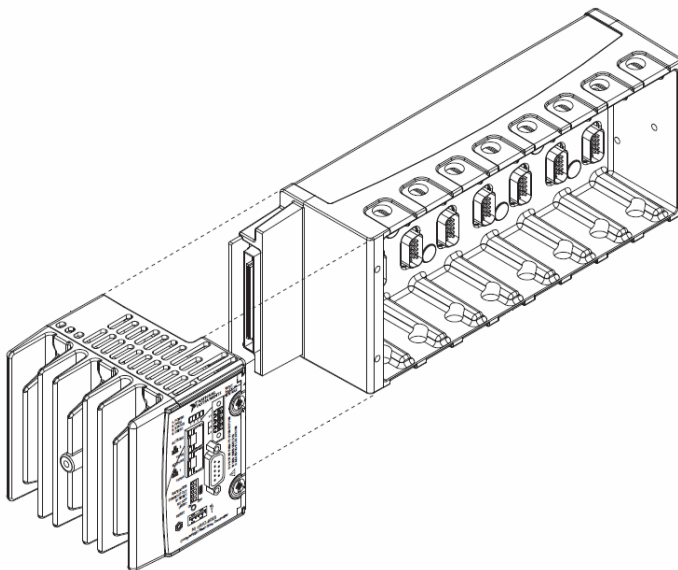
Toto jádro je připojeno k Real-time kontroléru pomocí lokální sběrnice PCI. Jádro FPGA také může generovat žádosti o přerušení (IRQs) pro synchronizaci real-time softwaru s tímto jádrem.

Tyto šasi jsou dostupné v mnoha variantách, lišících se verzi programovatelného logického pole FPGA, spotřebou energie a počtem slotů, do kterých je možné zapojení vstupně/výstupních modulů. Všechny varianty jsou schopny pracovat při teplotách v rozsahu (-40 – 70)°C a do maximální nadmořské výšky 2000m.



Obr. 7.5 Šasi NI cRIO-9116 [6]

Na následujícím obrázku je názorně zobrazeno vzájemné zapojení obou komponent systému CompactRIO.



Obr. 7.6 Vzájemné propojení obou komponent [7]

7.3.3 INTEGRATED CONTROLLER AND CHASSIS SYSTEME

National Instrument cRIO-907x integrované systémy tvoří pevné spojení obou součástí systému v jednu komponentu. Tedy kombinaci real-time kontroléru a FPGA jádra se sloty pro připojení vstupně výstupních modulů. National Instruments nabízí dvě varianty tohoto provedení lišící se taktem procesoru ve variantách 266 MHz a 400 MHz a dále hustotou FPGA pole.



Obr. 7.7 Integrovaný systém cRIO-907x [6]

7.3.4 EXPANSION CHASSIS

Tyto prvky systému CompactRIO umožňují připojit ke stávajícímu systému další šasi, která umožňují připojení podle provedení různý počet dalších vstupně/výstupních modulů pro rozšíření na stovky vstupně/výstupních kanálů. Každé rozšiřující šasi taktéž obsahuje Xilinx programovatelné hradlové pole FPGA. Připojení do stávajícího systému probíhá pomocí rozhraní Ethernet a standardní kabeláže CAT5. Jako příklad můžeme použít rozšiřující šasi NI 9144, které umožňuje připojit až 8 vstupně/výstupních modulů, jež můžeme propojit pomocí vestavěného programovatelného hradlového pole FPGA. Obsahuje dva Ethernetové porty sloužící pro připojení do systému CompactRIO. Rozsah pracovních teplot je v rozsahu (-40 – 70) °C, nadmořská výška ve které může zařízení spolehlivě pracovat je 2000 m. Zařízení dosahuje 50g nárazové odolnosti a odolnosti vůči vibracím o hodnotě 5g. V nabídce společnosti National Instruments je široké množství variant, lišící se svými parametry. Podle toho na jakou aplikaci chceme tento systém využít, máme možnost vybrat model přesně podle našich představ a specifikací.



Obr. 7.8 Rozšiřující šasi NI 9144 [6]

7.3.5 COMPACTRIO I/O MODULES

Vstupně/výstupní moduly pro systém CompactRIO poskytují široký rozsah funkcí. Mezi tyto funkce patří analogové vstupy a výstupy, stejně jako digitální vstupy s čítači a časovači, digitální výstupy s pulsními generátory, moduly pro komunikaci s rozhraními CAN, PROFIBUS, sériovými linkami (RS232 a RS485) a dalšími. V šasi jsou poté moduly vzájemně propojeny pomocí programovatelného hradlového pole FPGA. Jednotlivé moduly popíše blíže v následujících podkapitolách.

K dostání jsou i další moduly mimo nabídku firmy National Instrument, tedy hardware třetích stran, kterými se v tomto textu nezabývám.

7.3.5.1 ANALOGOVÉ VSTUPY

Analogové vstupní moduly pro systém CompactRIO jsou kompatibilní se všemi šasi tohoto systému. Poskytují vysoce výkonné měření pro širokou škálu průmyslových a laboratorních typů senzorů a typů signálů. Každý modul je vybaven šroubovacími svorkami, BNC nebo standardním D-Sub konektory pro připojení signálových vodičů.

Všechny moduly jsou dodávány s NIST kalibrací. Většina modulů je provedena s uzemněním každého kanálu na zem, jsou vybaveny dvojitou izolační bariérou pro zvýšení bezpečnosti a odolností proti rušení. Jak už bylo řečeno, jsou tyto moduly přímo napojeny na programovatelné hradlové pole v systému. Potom je uživatelsky možné s pomocí platformy LabView nastavit a překonfigurovat analogové vstupní moduly, implementovat vlastní spouštění, synchronizaci a digitální filtry.



Obr. 7.9 Analogový vstupní modul NI cRIO 921S [6]

7.3.5.2 ANALOGOVÉ VÝSTUPY

Analogové výstupní moduly obsahují vysoce přesné a stálé generátory napětí v rozsahu $\pm 10V$ a proudu v rozsahu 0-20 mA nejčastěji s vzorkovací frekvencí 100 kS/s na kanál s typickým rozlišením 16-bitů digitálně-analogového převodníku. Tyto moduly jsou v provedení se 4 a 16 kanály. Mezi pokročilé funkce těchto modulů patří $\pm 30V$ ochrana pro překročení napětí, ochrana proti zkratu, nízké přeslechy, vysoká relativní přesnost. Obsahují též NIST-kalibraci. Tyto moduly jsou vybaveny šroubovacími svorkami pro flexibilní připojení vodičů pro vedení signálů.

7.3.5.3 DIGITÁLNÍ VSTUPY A ČÍTAČE/ČASOVAČE

Digitální vstupní moduly pro systém CompactRIO pracují s 5V/TTL, průmyslovou a universální logickou úrovní a signály pro přímé propojení na širokou škálu zařízení, jako jsou průmyslové snímače a spínače. Všechny moduly jsou vybaveny šroubovacími připojovací terminálem, nebo průmyslovým D-Sub konektorem, pro snadné propojení. Všechny moduly mají průmyslové certifikáty.



Obr. 7.10 Digitální vstupní modul NI 9402 [6]

Například NI9402 je čtyřkanálový, 55 ns obousměrný digitální modul pro CompactRIO šasi. Můžeme nastavit směr digitální linky na vstup nebo výstup, pro každý kanál samostatně, takto můžeme dosáhnout různých konfigurací modulu, ať už všechny kanály jsou nastaveny jako vstupy, nebo všechny jako výstupy, a nebo některé jako vstupy a některé jako výstupy. Jednotlivé kanály modulu můžeme tedy realizovat například jako vysokorychlostní čítače/časovače, pro digitální komunikaci nebo jako pulsní generátory a mnohé další. Maximální úroveň vstupního napětí modulu je dána standardizovanou hodnotou, tedy 5V. Rozsah pracovních teplot, v typickém rozsahu

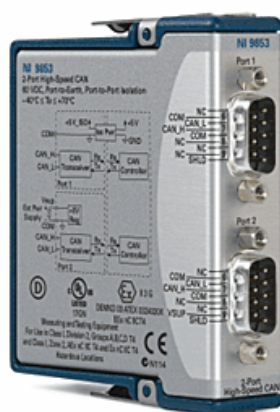
-40 – 70 °C. Jako u ostatních typů modulů je zde široká nabídka ze strany National Instruments lišící se některými parametry. Jednotlivé moduly je tedy vhodné vybírat podle konkrétní aplikace.

7.3.5.4 DIGITÁLNÍ VÝSTUPY A PULSNÍ GENERÁTORY

Nabídka digitálních výstupních modulů, je částečně totožná s nabídkou digitálních vstupních modulů, to je zapříčiněno tím, že tyto moduly mohou pracovat oboustranně. Opět parametry konkrétního modulu budou záviset na aplikaci, ve které jsou použité.

7.3.5.5 CAN KOMUNIKAČNÍ MODULY

Tyto moduly umožňují vzájemnou synchronizaci mezi systémy CompactRIO, které jsou těmito moduly vybaveny, a vzájemnou komunikaci až s 25ns rozlišením. Controller Area Network (CAN) komunikační modul s dvěma porty, přímo připojený k programovatelnému hradlovému poli, může dosáhnout při komunikaci s dalšími zařízeními přenosové rychlosti až 1 Mb/s při 100% zatížení sběrnice.



Obr. 7.11 CAN komunikační modul NI 9853 [6]

7.3.5.6 PROFIBUS KOMUNIKAČNÍ MODULY

PROFIBUS DP komunikace pracující v systému CompactRIO využívá jednoportových modulů PROFIBUS C Series. National Instruments nabízí dvě varianty těchto modulů a to Master/Slave a pouze Slave. Tyto moduly tedy nabízejí připojení systému CompactRIO do průmyslové sítě jako Master nebo Slave. Rozhraní obsahuje NI-PROFIBUS for CompactRIO pro rozhraní člověk/stroj (HMI) a rozhraní pro SCADA aplikace, stejně jako grafický software pro síťové nastavení. Zařízení je vybaveno 9-pinovým D-Sub konektorem, přenosové rychlosti se pohybují v rozmezí od 9,6 kbits/s po 12000 kbits/s. Maximální pracovní teplota je omezena hodnotou 55 °C.



Obr. 7.12 PROFIBUS komunikační modul [6]

7.3.5.7 SÉRIOVÉ KOMUNIKAČNÍ MODULY

Tyto sériové moduly přidávají do systému CompactRIO čtyři RS232 nebo RS485 sériové porty. Tyto moduly přímo zapojené do programovatelného hradlového pole (FPGA) nabízejí extrémní flexibilitu při komunikaci se zařízením po sériové lince. Nabízí možnost zpracovávat data přímo pomocí FPGA nebo je posílat na hostitelský kontrolér prostřednictvím DMA přenosu pro přístup k sériovému portu z real-time kontroléru.



Obr. 7.13 Modul pro sériovou komunikaci NI9870 [6]

NI 9870 sériový modul přidává do systému čtyři sériové porty RS232. Modul má individuální 64B buffry na každém portu, které šetří místo v FPGA a usnadňují programování. Přenosová rychlost dosahuje hodnoty až 921.6 kb/s na port. Mezi systémem CompactRIO a tímto modulem může procházet až 2 Mb/s dat.

NI 9871 sériový modul přidává do systému čtyři sériové porty RS485/RS422 k systému CompactRIO. Parametry modulu jsou obdobné jako u NI 9870.

7.3.5.8 MODULY S VYJÍMATELNOU ÚLOŽNOU KAPACITOU

NI 9802 modul po připojení do systému CompactRIO, umožňuje rozšíření úložného prostoru systému díky možnosti vkládání paměťových karet typu SD do tohoto modulu. Tímto modulem můžeme výrazně vylepšit zvýšením kapacity možnosti práce s daty v systému CompactRIO.



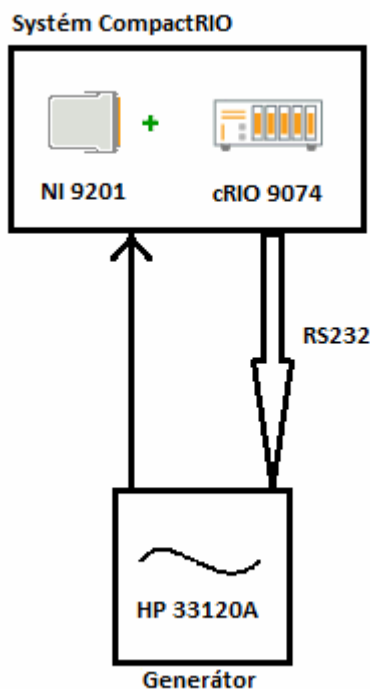
Obr. 7.14 Modul pro vkládání paměťových karet SD NI9802 [6]

8 POUŽITÁ HARDWAROVÁ KONFIGURACE

Při vypracování této práce jsem dostal k dispozici systém CompactRIO v následující konfiguraci. Jako Real-Time kontrolér posloužilo CompactRIO 9074 osazené procesorem s taktom 400 MHz, dále je vybaveno pamětí DRAM o hodnotě 128 Mb, vnitřní paměť s hodnotou 256 Mb. Systém je taky osazen portem RS232 a dvěma síťovými přípojkami. FPGA pole obsahuje 2 miliony hradel a do šasi je možné připojit až 8 vstupně/výstupních modulů.

Jako zdroj signálu slouží generátor HP33120A připojený právě pomocí rozhraní RS232 přímo k Real-Time kontroléru, jehož parametry můžeme nastavovat přímo v prostředí LabView.

Vstupní modul, pomocí kterého přijímám signál z generátoru je analogový vstupní modul NI 9201, který je vybaven 8 vstupními kanály jejichž vzorkovací frekvence je 500 Ks/s. Výstup z generátoru je tedy připojen na 1 vstupní kanál tohoto vstupního modulu, dle následujícího schématu.



Obr. 8.1 Hardwarová konfigurace

9 SOFTWAREVÁ ČÁST

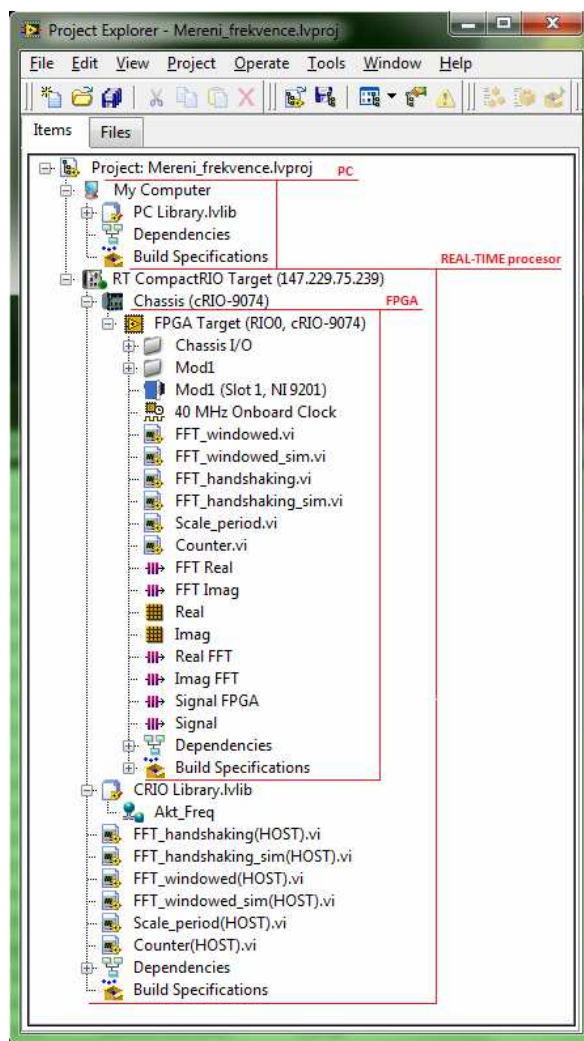
Softwarová část projektu byla vytvářena v programovém prostředí LabView od firmy National Instruments, které je připraveno na spolupráci s platformou CompactRIO, taktéž od firmy National Instruments.

9.1 STRUKTURA PROJEKTU

Samotný projekt v programu LabView a jeho strukturu lze rozčlenit do 3 hlavních částí. Při popisu této projektové struktury bych popis započal částí v projektu nazývanou RT CompactRIO Target. Tato část představuje vlastní zařízení CompactRIO, které je připojeno do internetové sítě pomocí Ethernet konektoru. Při počátečním nastavování projektu a při vkládání jednotlivých částí nás průvodce vyzve k zadání IP adresy na které je toto zařízení připojeno. Po zadání této adresy průvodce automaticky detekuje o jakou verzi CompactRIA se jedná a založí projekt. V projektovém stromu můžeme pod tuto část přímo vkládat VI, které běží na Real-Time procesoru uvnitř zařízení CompactRIO. Stejně tak do ní můžeme vkládat například knihovny s proměnnými, které tato VI využívají.

Poté co máme nakonfigurováno samotné CompactRIO, musíme do něho vložit šasi pomocí kterého ke CompactRIO připojujeme přes programovatelné hradlové pole FPGA vstupní nebo výstupní moduly které v projektu využíváme, toto šasi je v projektu značeno Chassis. Jeho vložení opět probíhá téměř automaticky pomocí průvodce. Po vložení tohoto šasi, a rozkliknutí stromové struktury v projektu vidíme v podnabídce položku FPGA Target, což představuje samostatné programovatelné hradlové pole. Pokud opět rozklikneme tuto nabídku vidíme zde několik ikon, které si přidá průvodce automaticky. My do této nabídky vkládáme položky související s VI, které běží na tomto programovatelném hradlovém poli, včetně VI samotných. V tomto konkrétním případě zde máme vloženy dva paměťové bloky a několik FIFO pamětí, které jsou v projektu využívány.

Ještě zde máme položku My Computer, kde jsou VI a potřebné programové komponenty k těmto VI, které běží přímo na PC a předávají si data se zařízením přes síťové připojení. V tomto projektu žádné VI na PC neběží, veškerou činnost obstarává CompactRIO.



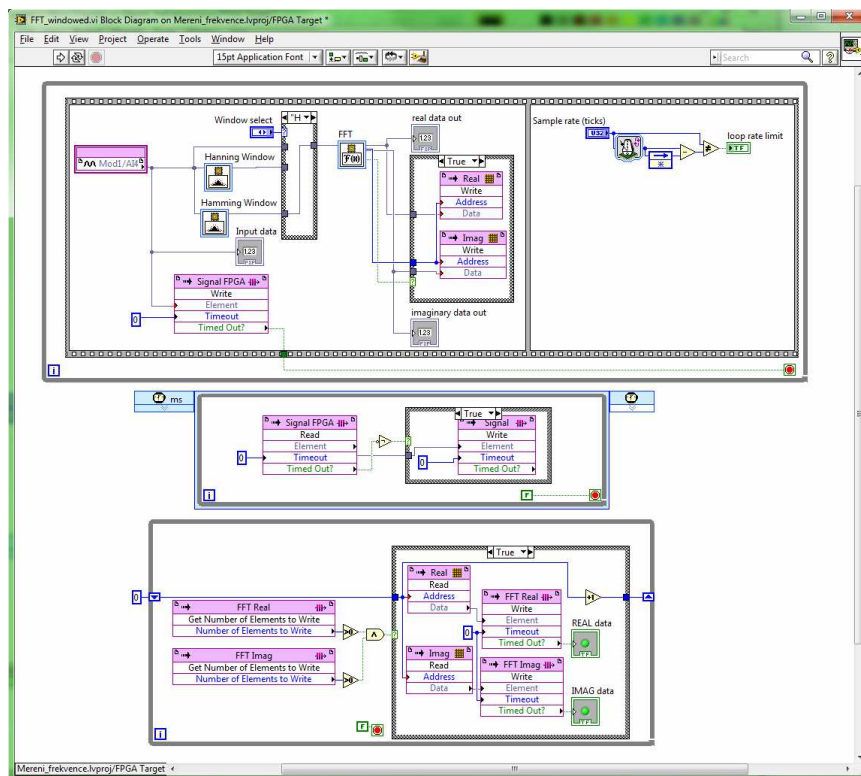
Obr. 9.1 Struktura projektu v programu LabView

9.2 PROGRAM FFT_WINDOWED

První program, který je součástí projektu, je program pojmenovaný FFT_Windowed, jedná se o program, který počítá a zobrazuje frekvenční spektrum vstupního signálu a to pomocí rychlé Fourierovy transformace FFT. Samotný program se skládá ze dvou částí, tedy ze dvou VI. Jedno VI běží Real-Time procesoru a jedno běží na programovatelné hradlovém poli FPGA, jehož popisem začneme.

9.2.1 FPGA VI PRO FFT_WINDOWED

VI, které běží na programovatelném hradlovém poli FPGA pro program FFT_Windowed zajišťuje získání reálných a imaginárních složek FFT transformace. Vidíme, že program je rozčleněn do 3 částí.



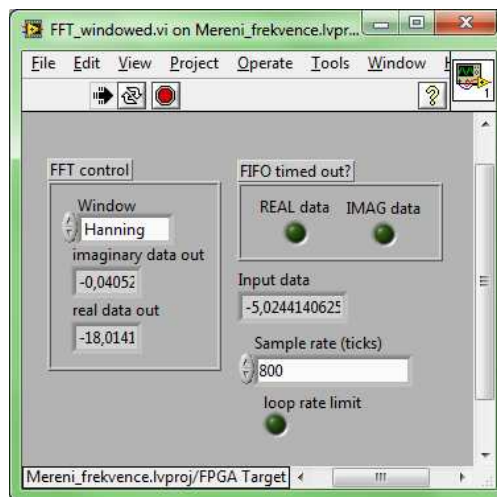
Obr. 9.2 FPGA VI programu FFT_WINDOWED

V první části je ze vstupního modulu čten signál z generátoru pomocí bloku FPGA I/O Node. Dále je signál veden do bloku FIFO paměti pojmenovaného Signal FPGA, který slouží k přenosu průběhu signálu do nadřazeného VI. Blok Input data, který je taktéž na tento signál napojen nám zobrazuje aktuální hodnotu vstupního signálu. Signál je veden dále směrem k bloku FFT který zajišťuje získání reálné a imaginární složky signálu pomocí rychlé Fourierovy transformace. Cestou k tomuto bloku ovšem stojí signálu v cestě bloky zajišťující okénkování. Uživatelí je zde nabídnuta volba mezi Hanningovým oknem, Hammingovým oknem nebo bez okna. Jak již bylo řečeno z bloku FFT vystupuje reálná a imaginární složka, tyto složky jsou vedeny do paměťových bloků označených Real a Imag, pomocí kterýchž jsou poté předávány do FIFO pamětí k přenosu do nadřazeného VI. Rovněž jsou vyvedeny indikátory zobrazující jejich aktuální hodnotu. Toto zapojení je vnořeno do Flat Sequenc Structure, které zajišťuje vykonávání tohoto zapojení, v pravidelných časových

intervalech jež jsou definovány v druhé části Flat Sequenc Structure. Interval, ve kterém je zapojení v pravé části vykonáváno definuje kontrolní prvek Sample rate (ticks) který je ovládán z nadřazeného VI, jak bude popsáno dále. Toto celé je ještě vnořeno do While Loop, která zajišťuje nepřerušované vykonávání bloků uvnitř dokud není ukončeno STOP prvkem, který je v tomto případě ovládán výstupem z bloku Signal FPGA, zabraňující přetečení této paměti.

Druhá část tohoto programu je provedena v bloku Time Loop. Tato část zajišťuje předání dat z FIFO paměti Signal FPGA do FIFO paměti Signal, toto předání dat proběhne vždy po naplnění FIFO paměti Signal FPGA, pomocí Case Structure.

Třetí část programu má podobnou funkci jako část druhá, slouží ovšem k předání dat z paměťových bloků Real a Imag do FIFO pamětí pro přenos do nadřazeného VI. Předání opět probíhá ve struktuře Case Structure.

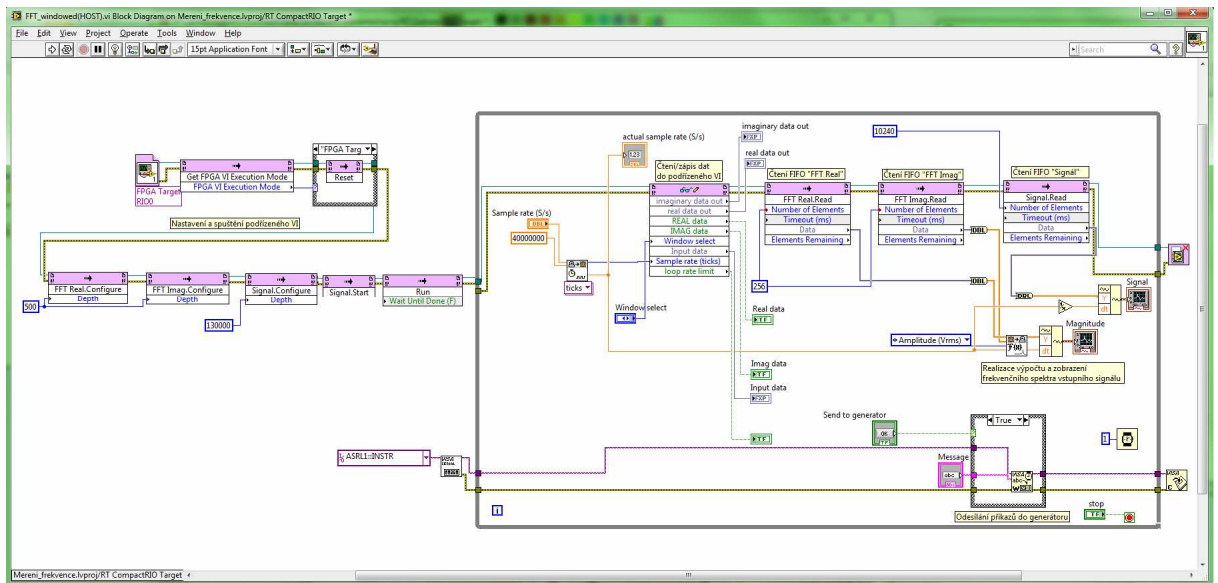


Obr. 9.3 Ovládací panel FPGA VI programu FFT_WINDOWED

Nyní se dostáváme k ovládacímu panelu tohoto VI kde vidíme vyvedené všechny indikátory a ovládací prvky využívané v tomto VI. Máme zde možnost sledovat aktuální hodnoty reálné a imaginární složky, stejně jako aktuální hodnotu vstupního signálu. Dále je zde možnost volby využitého okna. Můžeme zde i nastavit Sample rate, který nám udává v jakých časových intervalech bude vykonáváno zapojení ve Flat Sequenc Structure. Důležitou vlastností je možnost ovládat a číst všechny prvky umístěné na tomto ovládacím panelu z nadřazeného VI.

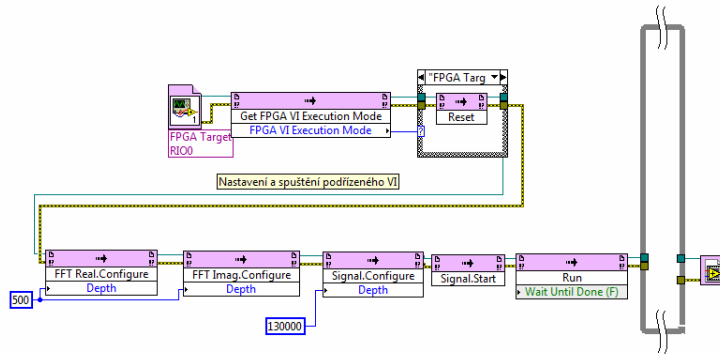
9.2.2 REAL-TIME VI PRO FFT_WINDOWED

Toto VI, které pracuje v Real-Time procesoru CompactRIO, zajišťuje zpracování dat která přicházejí z VI, které běží v FPGA hradlovém poli. Na obr. 8.4 vidíme kompletní zapojení tohoto VI, které zajišťuje jak komunikaci a předávání dat z a do podřízeného VI, tak komunikaci a nastavování připojeného generátoru Agilent 33120A a poté samotné výpočty frekvenčního spektra a jeho zobrazení. Pro popis tohoto programu bude jednodušší popsat jednotlivé části samostatně.



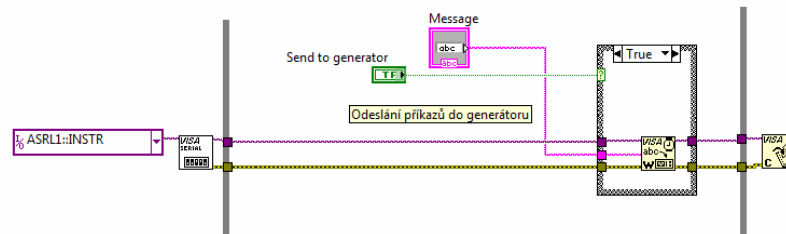
Obr. 9.4 REAL-TIME VI programu FFT_WINDOWED

Jako první se zaměříme na vytvoření komunikace s podřízeným VI a nastavení pamětí používaných v tomto podřízeném VI. Bloky zajišťující následující činnosti jsou z venku připojeny k While Loop, ve které probíhá samotný program. Část programu, která je věnovaná této komunikaci vidíme na obr.8.5. Jako první je zde blok FPGA Target ve kterém volíme jaké VI běžící v FPGA chceme otevřít pro další práci. Následuje blok GET FPGA VI Execution Mode které připraví podřízené VI k činnosti, poté následuje Case Structure ve kterém dojde k restartování tohoto VI a připravení samotného FPGA pole. Poté následují bloky, které zajišťují nastavení velikosti pamětí v podřízeném VI. A jako poslední je blok, který uvede samotné VI běžící v programovatelném hradlovém poli do chodu. Z druhé části While Loop následuje blok, pojmenovaný Close FPGA VI, který po vypnutí VI běžícího na Real-Time procesoru ukončí i chod VI běžícího v FPGA.



Obr. 9.5 Část programu zajišťující komunikaci s podřízeným VI programu FFT_Windowed

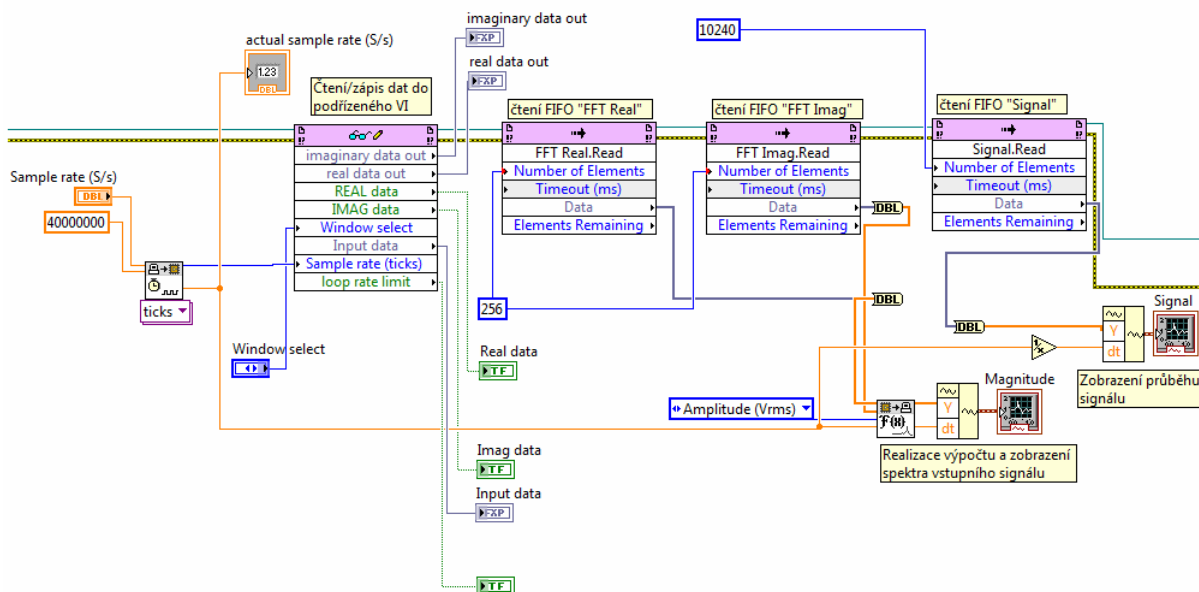
Další částí je blokové zapojení zajišťující komunikaci s připojeným generátorem Agilent 33120A. Sestává z několika částí, bloky vně While Loop zajišťují nastavení komunikace a pomocí bloků uvnitř dochází k odesílání zpráv do generátoru. Máme zde blok Message, který je přístupný z ovládacího panelu a umožňuje nám zapsat zprávu, nebo-li příkaz pomocí kterého dochází přímo k ovládaní generátoru. Odeslání probíhá pomocí bloku VISA Write Function uvnitř bloku Case Structure, který je vykonán vždy po stisknutí tlačítka Send to generator.



Obr. 9.6 Programová část zajišťující komunikaci mezi VI a generátorem

Nyní si popíšeme programové zapojení uvnitř While Loop. Začneme zleva, zde je jako první kontrolní prvek pomocí kterého nastavujeme vzorkovací frekvenci (Sample rate) vstupní karty. Nastavená hodnota z tohoto prvku vstupuje do bloku Sample Rate Loop Time spolu s pevně nastavenou hodnotou hodinového signálu FPGA, která je zde pevně nastavena na 40 MHz. Výstupem tohoto bloku je aktuální hodnota vzorkovací frekvence vstupního modulu, která je vyvedena na indikátor na ovládacím panelu tohoto VI a je dále používána v programu. Dále z tohoto bloku vystupuje hodnota parametru Sample rate (ticks), kterou předáváme do podřízeného VI, touto hodnotou nastavujeme interval ve kterém je vykonáván program umístěný uvnitř bloku Flat Sequenc Structure v podřízeném VI. Toto předávání hodnot do a

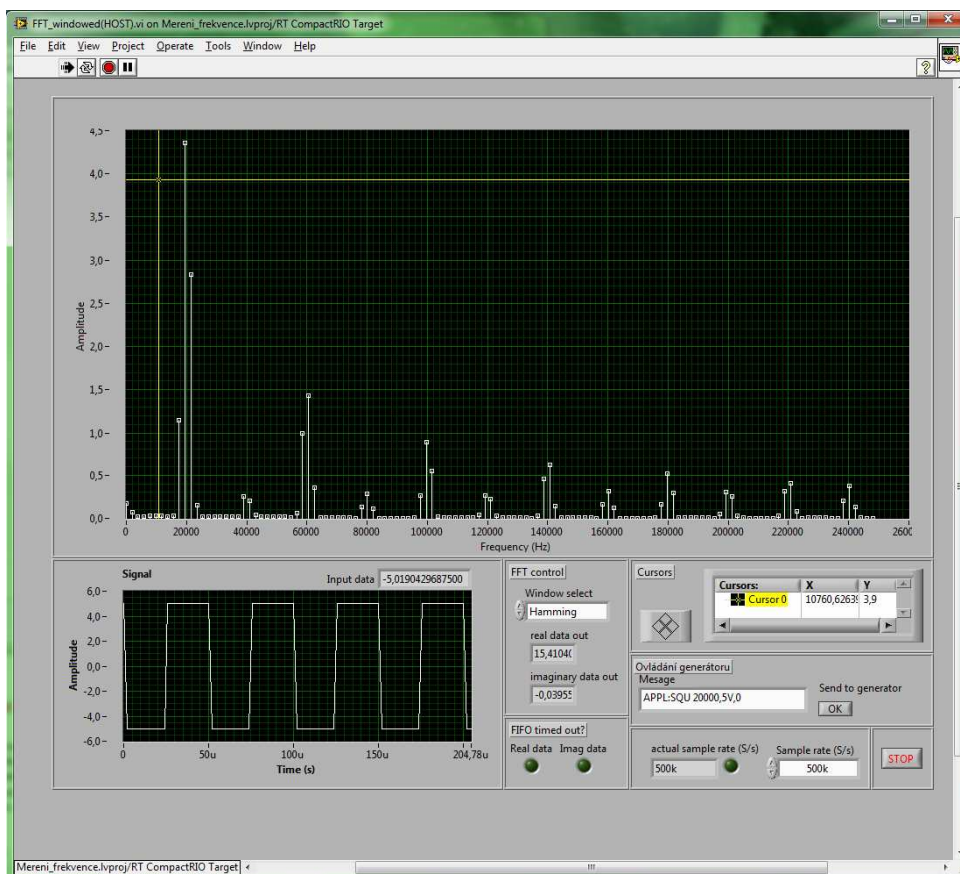
z podřízeného VI běžícího v programovatelném hradlovém poli dochází pomocí bloku Read/Write Control Function, tento blok nám umožňuje číst a zapisovat do všech kontrolních prvků a indikátorů, které máme vyvedené na ovládacím panelu podřízeného VI. V tomto konkrétním případě, tedy předáváme již zmíněnou hodnotu parametru Sample rate (ticks) pro řízení časových intervalu Flat Sequenc Structure a dále předáváme jaké okno chceme použít pro úpravu signálu, tedy žádné, Hammingovo nebo Hanningovo. Parametry které čteme z podřízeného VI jsou aktuální hodnota vstupního signálu a reálné a imaginární složky získané z FFT a několik indikátorů přetečení paměti. Poté následují dva bloky pro čtení FIFO pamětí z podřízeného VI, z těchto bloků získáváme hodnoty reálné a imaginární složky pro výpočet frekvenčního spektra. Tyto hodnoty jsou zavedeny spolu s hodnotou aktuální vzorkovací frekvence vstupního modulu do bloku FFT to Spectrum. Tento blok zajišťuje vlastní výpočet frekvenčního spektra, z jeho výstupů je pomocí bloku Build Waveform Function vytvořen signál nesoucí informaci o spektru signálu a je přiveden na grafický zobrazovač na ovládacím panelu. Stejně tak je z dalšího bloku čtena FIFO paměť předávající z podřízeného VI průběh vstupního signálu, která je taktéž přes blok Build Waveform Function opět přiveden na grafický zobrazovač na ovládacím panelu. To by bylo s programové části vše, nyní si popíšeme ovládací panel tohoto VI.



Obr. 9.7 Hlavní programová část uvnitř bloku While Loop programu FFT_Windowed

Jak můžeme vidět na obr. 8.8 ovládacímu panelu k tomuto VI dominuje grafický prvek zobrazující spektrum signálu. Hodnoty z tohoto grafického zobrazovače vyčítáme pomocí kurzorů. Tyto kurzory ovládáme pomocí prvků umístěných pod pravou částí tohoto zobrazovače, na témže místě najdeme i indikátor, který nám dává aktuální hodnotu bodu, kam kurzor ukazuje. Kurzorem můžeme pohybovat v obou osách. Po

levici od ovladače kurzorů máme prvky vztahující se k FFT. Můžeme zde ovládat volbu použitého okna a na přidružených indikátorech můžeme sledovat aktuální hodnotu reálné a imaginární složky. Pod tímto prvkem máme dva indikátory které indikují přetečení FIFO paměti. Úplně vlevo je umístěn další grafický indikátor, který zobrazuje aktuální průběh vstupního signálu. Vpravo dole máme okénko pro zápis příkazů pro ovládání připojeného generátoru, který dodává vstupní signál, který měříme. Odeslání příkazu do generátoru probíhá pomocí připojeného OK tlačítka, kdy po jeho stisknutí dojde k odeslání příkazu do přístroje. Pod touto částí máme část, pomocí které ovládáme vzorkovací frekvenci vstupní karty připojené přes programovatelné hradlové pole FPGA ke CopmactRIU. Pomocí kontrolního prvku tuto frekvenci zadáváme, nalevo od tohoto kontrolního prvku se nachází numerický indikátor, který nám ukazuje aktuální hodnotu této frekvence.



Obr. 9.8 Ovládací panel programu FFT_Windowed

9.2.3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Z naměřených dat, která byla sestavena do tabulek a umístěna jako příloha 1, můžeme říci, že tento program navržený pro zobrazení frekvenčního spektra signálu dosahuje v jistých frekvenčních oblastech velmi malých chyb, v některých naopak chyb značných. Abychom byly konkrétní řekněme, že největší chyby tato metoda dosahuje pro nejnižší frekvence na daném rozsahu, a se vzrůstající frekvencí chyba klesá, a to pro všechny typy testovaných signálů, kterými byli průběhy sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový.

Taktéž hodnoty frekvence pro základní harmonickou frekvenci všech signálů nabývali stejných hodnot, a při opakovaných měřeních se jejich hodnoty neměnili. Z tohoto důvodu jsem uskutečnil pouze dvě opakovaná měření pro každý typ signálu na každém rozsahu.

Například při nastavení vzorkovací frekvence na hodnotu 500 KS/s, což je maximální možná vzorkovací frekvence pro vstupní modul, který byl k dispozici, představuje horní mezní frekvenci hodnota 250 KHz. Měřili jsme na rozsahu od 2 – 240 KHz, ovšem z neznámého důvodu nebylo možné pro trojúhelníkový signál nastavit na generátoru větší hodnotu jak 100 KHz, proto pro trojúhelníkový signál bylo měřeno pouze na rozsahu 2 – 100 KHz. Pro tento rozsah byla největší chyba na frekvenci 5 KHz, dosahovala hodnoty 14%, se stoupající hodnotou frekvence měřeného signálu chyba klesla a pro nejvyšší hodnoty frekvencí měřeného signálu dosahovala řádově desetin procent. Chyba měření vykazovala stejný charakter pro všechny typy testovaných signálů.

Při měření se vzorkovací frekvencí nastavenou na hodnotu 50 KS/s, jsme měřili na rozsahu frekvencí v intervalu 0,2 – 20 KHz. Chyba měření vykazovala stejný charakter od nejvyšší hodnoty pro frekvenci 500 Hz s hodnotou 14 % až po nejnižší hodnoty chyby v řádech desetin procent pro nejvyšší frekvence tohoto rozsahu.

Z naměřených hodnot byli také stanoveny nejistoty. Při výpočtu nejistoty typu A jsme postupovali podle postupu, který je popsán v kapitole 5.2.2 s využitím vztahů (5.4), (5.5) a (5.6). Z důvodu malého počtu provedených měření byla výsledná hodnota korigována korekčním koeficientem z tab.1. a to $k = 7$ podle vztahu (5.7). Dále jsme stanovovali nejistotu typu B. K jejímu zjištění jsme využili technickou dokumentaci přístrojů. Jako první zdroj nejistot uvedme použitý generátor, z jeho technické dokumentace jsme zjistili jeho stabilitu o hodnotě 10 ppm z generovaného signálu. Dalším zdrojem nejistot byl použitý vstupní modul NI9201 platformy CompactRIO, z jeho technické dokumentace jsme zjistili chybu 0,04 % z čtené hodnoty, pro kalibrovaný modul pracující v provozní teplotě $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. A jako poslední zdroj nejistot v tomto měřicím řetězci je nejistota vzniklá při čtení frekvenčního spektra z jeho zobrazovače. Z dokumentace LabView k tomuto bloku, který zajišťuje výpočet frekvenčního spektra

jsme zjistili, že spektrum je rozděleno na 8192 pásem a tedy při nastavení vzorkovací frekvence na 500 KS/s při rozsahu frekvencí 250 KHz nám vychází hodnota 30,51 Hz na jedno pásmo, při vzorkovací frekvenci 50 KS/s, na měřitelné frekvenci 25 KHz získáváme hodnotu 3,05 Hz na jedno pásmo. Výsledná hodnota nejistoty B byla sestavena podle vztahu (5.9) z jednotlivých zdrojů nejistot. Poté byla podle vztahu (5.10) vypočtena kombinovaná nejistota. Hodnoty všech nejistot jsou uvedeny v tabulkách v příloze 1. V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty frekvence s jejich nejistotami, pro největší a nejmenší nejistotu, pro všechny testované signály.

Vzorkovací frekvence 500 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (240223,70 \pm 58,22) \text{ Hz}$	$f = (240223,71 \pm 58,22) \text{ Hz}$	$f = (99753,91 \pm 29,01) \text{ Hz}$
$f = (2035,70 \pm 17,63) \text{ Hz}$	$f = (2035,70 \pm 17,63) \text{ Hz}$	$f = (2035,70 \pm 17,63) \text{ Hz}$
Vzorkovací frekvence 50 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (19921,70 \pm 4,93) \text{ Hz}$	$f = (19921,70 \pm 4,93) \text{ Hz}$	$f = (19921,70 \pm 4,93) \text{ Hz}$
$f = (203,57 \pm 1,76) \text{ Hz}$	$f = (203,58 \pm 1,76) \text{ Hz}$	$f = (203,57 \pm 1,76) \text{ Hz}$

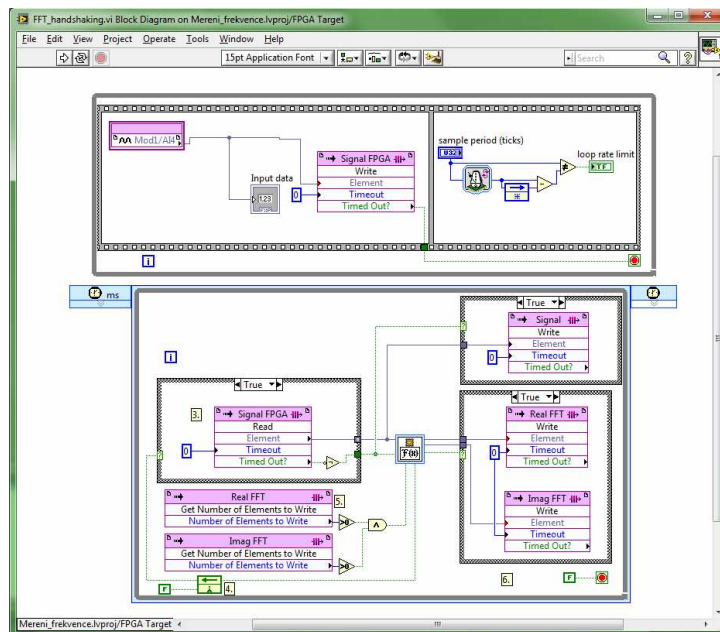
Tab. 3 Tabulka nejistot programu FFT_Windowed

9.3 PROGRAM FFT_HANDSHAKING

Druhý program, který je v tomto projektu zařazen je program s názvem FFT_Handshaking, tento program také zajišťuje výpočet frekvenčního spektra signálu, ovšem programové zapojení je odlišné od předchozího programu.

9.3.1 FPGA VI PRO FFT_HANDSHAKING

Část programu FFT_Handshaking představující VI běžící na programovatelném hradlovém poli FPGA si nyní popíšeme.



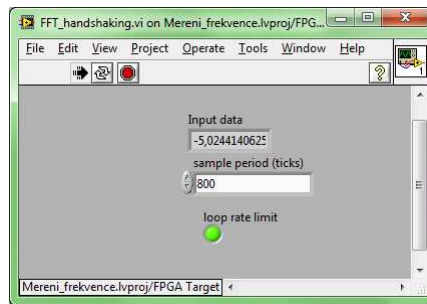
Obr. 9.9 FPGA VI programu FFT_Handshaking

Vidíme, že program je rozdělen na dvě části. První část tvoří While Loop, do které je vnořena Flat Sequenc Structure v jejíž levé části je programové zapojení zajišťující čtení signálu ze vstupního kanálu a předávání tohoto signálu do FIFO paměti označené Signal FPGA, pomocí které je předáván do druhé části programu. Ještě je zde vyveden indikační prvek zobrazující aktuální hodnotu vstupního signálu. V pravé části Flat Sequenc Structure máme zapojení zajišťující vykonávání zapojení v levé části Flat Sequenc Structure v pravidelných časových intervalech, které určujeme pomocí kontrolního prvku Sample period (ticks).

Druhou část tohoto VI tvoří blok Time Loop, ve kterém je získáván signál z bloku FIFO paměti Signal FPGA předávaný z první části VI. Tento signál je přiváděn na blok FFT, který zajišťuje získání reálné a imaginární složky frekvenčního spektra

vstupního signálu. Obě tyto složky jsou potom zapisovány do FIFO pamětí Real FFT a Imag FFT stejně jako je do FIFO paměti Signal předáván průběh měřeného signálu. Všechny tyto data jsou pomocí těchto FIFO pamětí předávány do nadřazeného VI.

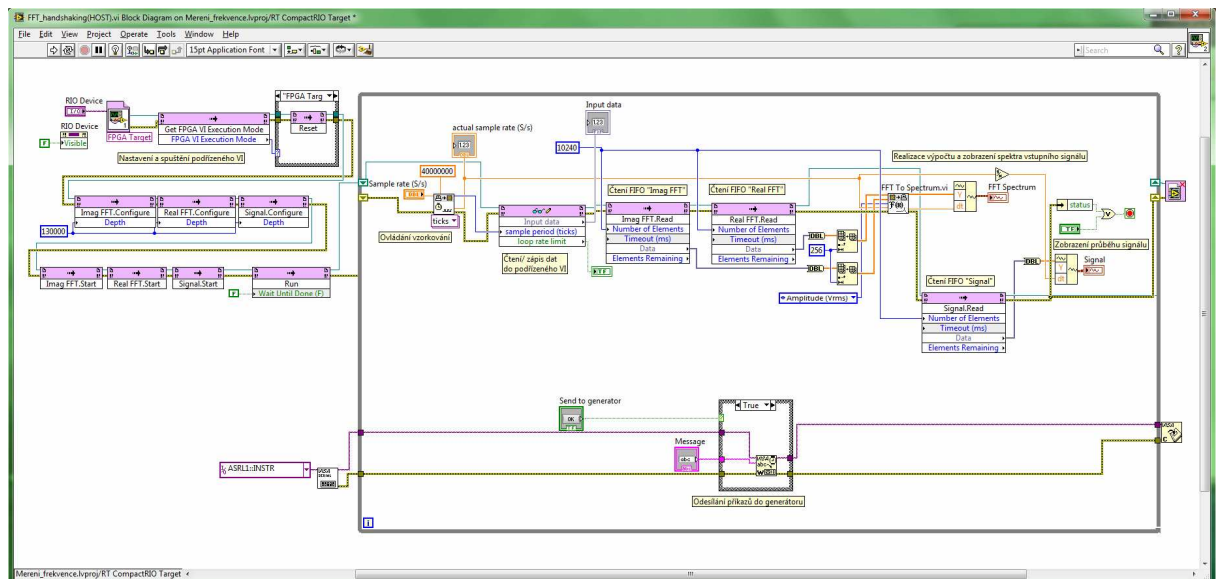
Ještě si popíšeme ovládací panel tohoto VI, který je vidět na obr. 8.10. Můžeme vidět, že v případě tohoto VI je ovládací panel značně minimalizovaný a není na něj vyvedeno nic, kromě indikátoru aktuální hodnoty vstupního signálu a kontrolního prvku pro nastavení časového intervalu určujícího vykonávání zapojení v levé části bloku Flat Sequenc Structure zajišťující získávání dat ze vstupního kanálu.



Obr. 9.10 Ovládací panel FPGA VI programu FFT_Handshaking

9.3.2 REAL_TIME VI PRO FFT_HANDSHAKING

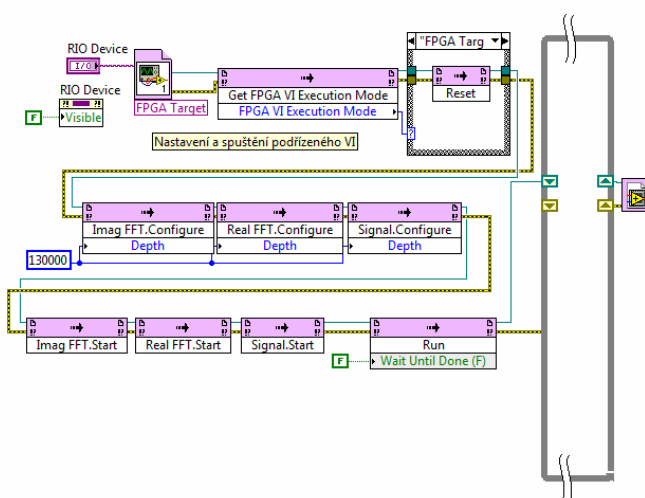
Dostáváme se k VI, které běží na Real-Time procesoru a spolupracuje s podřízeným VI, popsáním výše. Základní uspořádání je stejné jako v předchozím programu. Můžeme si jej opět rozdělit na 3 základní části.



Obr. 9.11 REAL_TIME VI programu FFT_Handshaking

Část zajišťující komunikaci a odesílání příkazů do generátoru je naprosto totožná jako v případě prvního programu uvedeného v kapitole 8.2.2, proto ji zde nebudu popisovat.

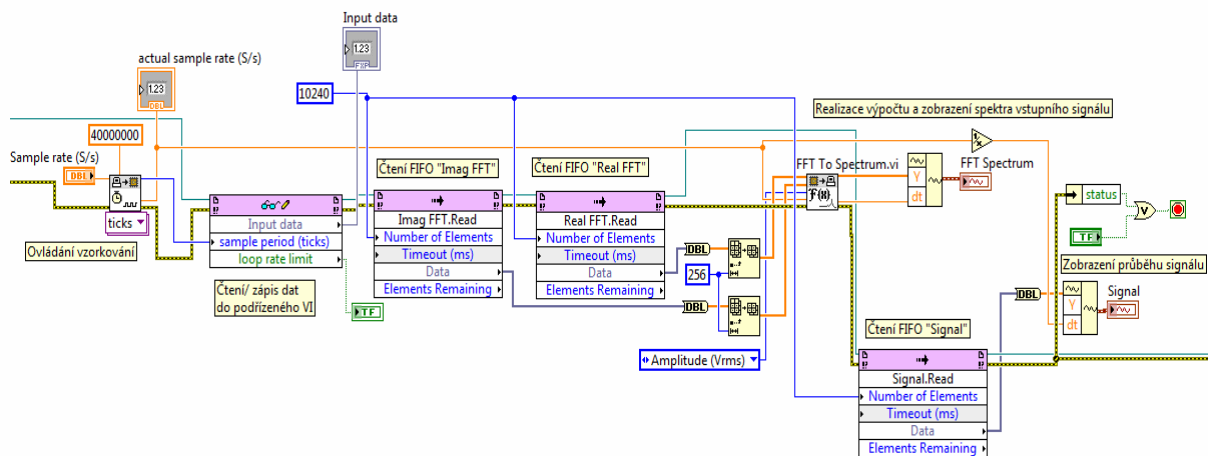
Přejdeme tedy k další části programu a tou je část, která se nachází vně While Loop, tedy jak již bylo popsáno v předchozím programu k části, která zajišťuje navázání komunikace a nastavení potřebných parametrů v podřízeném VI běžícím v programovatelném hradlovém poli FPGA. Opět zde máme blok FPGA Target ve kterém si zvolíme jaké podřízené VI chceme otevřít. Poté přes blok GET FPGA VI Execution Mode připravíme program v FPGA k činnosti. Poté dojde ještě k restartu programu v programovatelném hradlovém poli pomocí bloku umístěném v Case Structure. Následují bloky které nastavují velikosti FIFO pamětí sloužících k předávání dat z podřízeného VI do VI nadřazeného. Následují další 3 bloky, které uvedou tyto FIFO paměti do chodu. A jako poslední následuje blok, který uvede VI v programovatelném hradlovém poli do chodu, toto VI poté začne provádět svou činnost. I jako v předcházejícím případě po ukončení běžícího VI v Real-Time procesoru dojde k ukončení činnosti podřízeného VI a to pomocí bloku Close FPGA VI, který je připojen zprava ke bloku While Loop, ve kterém se provádí samotný program, který si nyní popíšeme.



Obr. 9.12 Programová část zajišťující komunikaci s podřízeným VI programu FFT_Hanshaking

Při popisu samotného programu umístěného uvnitř bloku While Loop začneme zleva, kde jako první je blok Sample Rate To Loop Time VI, jež má dva vstupy. Prvním vstupem je hodnota periody vzorkování vstupního modulu, kterou zadáváme pomocí kontrolního prvku na ovládacím panelu tohoto VI a druhým vstupem je hodnota hodinového signálu programovatelného hradlového pole, v tomto případě pevně

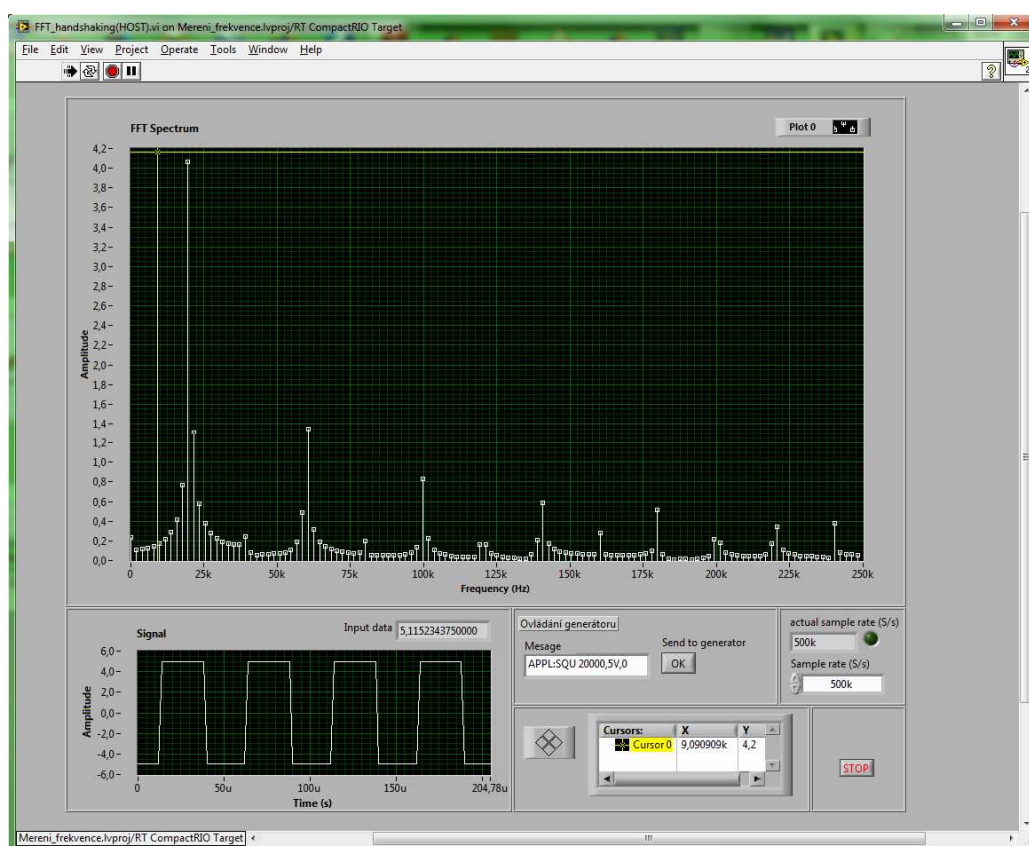
nastavená na 40 MHz. Výstupem tohoto bloku je aktuální hodnota vzorkovací frekvence, která je vyvedena na vlastní indikátor, a parametr který nám udává časové intervaly pro vykonávání programu uvnitř Flat Sequenc Structure v podřízeném VI, které jsou tomuto podřízenému VI předávány. Toto předávání probíhá v dalším bloku, tento blok je nazýván Read/Write Control Function, a slouží jak pro čtení a tak pro zápis parametrů podřízeného VI. V tomto případě do podřízeného VI předáváme pouze výše zmíněnou hodnotu časových intervalů pro vykonávání programu ve Flat Sequenc Structure, a čteme z podřízeného VI pouze aktuální hodnotu vstupního signálu na vstupním modulu. Pokračujeme dále zleva doprava přes dva bloky čtení FIFO pamětí. Pomocí těchto bloků dostáváme z podřízeného VI vypočtené hodnoty reálné a imaginární složky frekvenčního spektra vstupního signálu, které zde z těchto paměťových bloků vyčítáme a ukládáme do dvou příslušejících polí, které jsou poté zavedeny do bloku FFT to spektrum, kde je z těchto hodnot vypočítáváno spektrum vstupního signálu, které je přes blok Build Waveform Function vedeno na grafický zobrazovací prvek na ovládacím panelu VI. V programovém zapojení tohoto VI máme ještě jeden blok čtení FIFO paměti. Z tohoto bloku vyčítáme data obsahující průběh signálu připojeného na vstupní modul. Tyto data opět přes blok Build Waveform Function připojujeme na grafický zobrazovací prvek, který je umístěn na ovládacím panelu VI a zobrazuje časový průběh signálu.



Obr. 9.13 Hlavní programová část uvnitř smyčky While Loop programu FFT_Handshaking

To bylo z programové části tohoto VI vše, nyní si popíšeme ovládací panel tohoto VI. Dominantním prvkem ovládacího panelu tohoto VI je stejně jako v předchozím programu grafický zobrazovač na němž se nám zobrazuje frekvenční spektrum vstupního měřeného signálu. Máme zde ještě jeden grafický zobrazovač, na kterém se nám zobrazuje časový průběh tohoto signálu. Máme zde také ovládací prvek, pomocí kterého ovládáme kurzory v grafickém zobrazovači spektra signálu, nalezneme zde i

indikátor, který nám ukazuje pozici těchto kurzorů v obou osách pro snadné odečítání hodnot. Další prvky které jsou do tohoto ovládacího panelu začleněny slouží pro zasílání příkazů generátoru připojenému ke CompactRIO. Je to okénko pro samotný zápis příkazu a tlačítko pro jeho vyslání. Dále zde máme jen ovládací prvek s indikátorem, pomocí kterého nastavujeme vzorkovací frekvenci vstupního modulu připojeného přes programovatelné hradlové pole FPGA.



Obr. 9.14 Ovládací panel programu FFT_Handshaking

9.3.3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Tabulky sestavené z naměřených dat jsou v tomto dokumentu opět umístěny jako příloha 2. Z nich můžeme vyčíst že chyba měření se vzrůstající frekvencí měřeného signálu klesá, od počátečních hodnot v řádech jednotek procent až po desetiny procent pro nejvyšší frekvence, a to pro všechny typy signálů.

Tato metoda pro měření frekvence vykazuje při měření základní harmonické složky měřeného signálu všech typů, stejné hodnoty a to i při opakovaném měření. Proto byly opět provedeny pouze dvě měření pro každý průběh na každém rozsahu.

Při konkrétnějším vyjádření chyb měření, při vzorkovací frekvenci 500 KS/s, tedy na rozsahu měřených frekvencí v intervalu 2 – 240 KHz, pro trojúhelníkový signál opět pouze v rozsahu 2 – 100 KHz, dosahuje největší chyba hodnoty 15% pro frekvenci 5 KHz a dále hodnota chyby klesá se vzrůstající frekvencí a od hodnoty 75 KHz výše dosahuje řádově desetin procenta z měřené hodnoty.

Při použití vzorkovací frekvence o hodnotě 50 KS/s, na rozsahu měřených frekvencí v intervalu 0,2 – 20 KHz nabývá nejvyšší chyba hodnoty přes 16% pro frekvenci 500 Hz a nejmenší chyba má hodnotu 0,21 % pro frekvenci 15 KHz.

V následující tabulce uvádím nejistoty pro jednotlivé typy signálů. Uvádím zde vždy hodnotu s největší a hodnotu s nejmenší nejistotou. Při výpočtu nejistot jsme postupovali stejně jako v předchozím případě. Nejistotu typu A byla vypočtena dle vztahů (5.4),(5.5) a (5.6) a poté byla korigována korekčním koeficientem $k = 7$, který jsme získali z tab. 1. podle vztahu (5.7). Nejistota typu B byla vypočtena z dílčích nejistot jednotlivých částí měřícího řetězce. Prvním zdroje nejistot byl použitý generátor Agilent 33120A jehož stabilita o hodnotě 10 ppm byla uvedena v technické dokumentaci přístroje. Dalším zdrojem nejistot byla vstupní analogová karta NI 9201 platformy CompactRIO, jejíž chyba nabývá hodnoty 0,04 % z čtené hodnoty, pro kalibrovaný modul pracující v provozní teplotě $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Poslední nejistota v tomto měřícím řetězci je nejistota vzniklá při čtení frekvenčního spektra z jeho zobrazovače. Z dokumentace LabView k tomuto bloku, který zajišťuje výpočet frekvenčního spektra jsme zjistili že spektrum je rozděleno na 8192 pásem a při nastavení vzorkovací frekvence na 500 KS/s při rozsahu frekvencí 250 KHz vychází hodnota 30,51 Hz na jedno pásmo, při vzorkovací frekvenci 50 KS/s, na měřitelné frekvenci 25 KHz získáváme hodnotu 3,05 Hz na jedno pásmo. Výsledná hodnota nejistoty B byla sestavena podle vztahu (5.9) z jednotlivých zdrojů nejistot. Poté byla podle vztahu (5.10) vypočtena kombinovaná nejistota. Hodnoty všech nejistot jsou uvedeny v tabulkách v příloze 2. V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty frekvence s jejich nejistotami, pro největší a nejmenší nejistotu, pro všechny testované signály.

Vzorkovací frekvence 500 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (240233,90 \pm 58,23) \text{ Hz}$	$f = (240233,00 \pm 58,23) \text{ Hz}$	$f = (99699,20 \pm 29,00) \text{ Hz}$
$f = (1954,88 \pm 17,63) \text{ Hz}$	$f = (1954,88 \pm 17,63) \text{ Hz}$	$f = (1954,88 \pm 17,63) \text{ Hz}$
Vzorkovací frekvence 50 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (19918,12 \pm 4,86) \text{ Hz}$	$f = (19917,57 \pm 4,86) \text{ Hz}$	$f = (19917,57 \pm 4,86) \text{ Hz}$
$f = (195,49 \pm 1,58) \text{ Hz}$	$f = (189,09 \pm 1,58) \text{ Hz}$	$f = (189,09 \pm 1,58) \text{ Hz}$

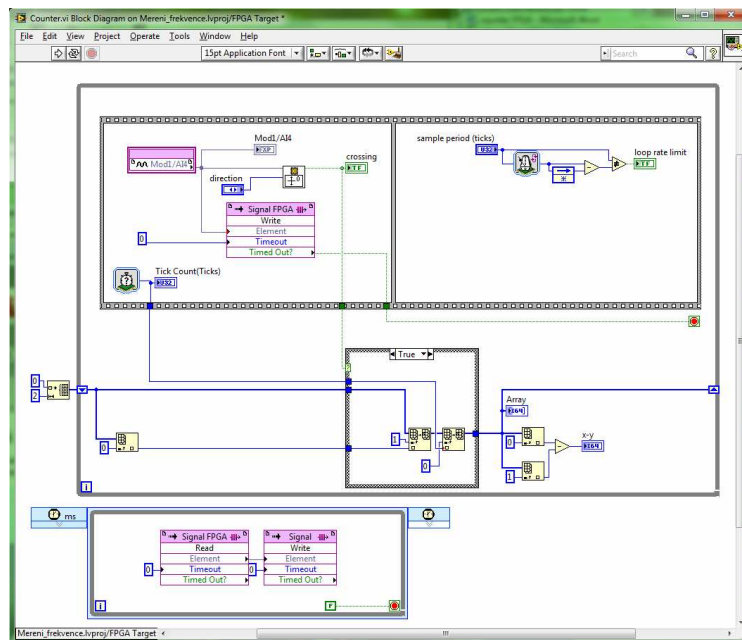
Tab. 4 Tabulka nejistot programu FFT_Handshaking

9.4 PROGRAM COUNTER

Následující program nesoucí pojmenování Counter nám dává informaci o frekvenci vstupního signálu získanou metodou impulsního čítače.

9.4.1 FPGA VI PRO PROGRAM COUNTER

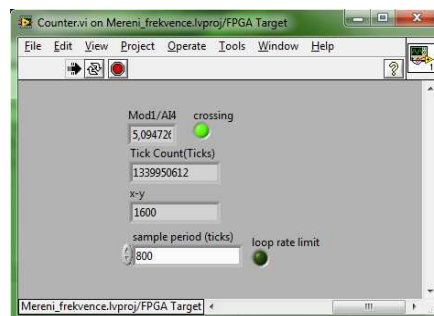
VI běžící na programovatelném hradlovém poli FPGA, které využívá program Counter má velice podobnou strukturu jako předchozí VI běžící na tomto hradlovém poli. Obecně lze toto VI opět rozdělit na dvě části. První část tvoří opět blok While Loop uvnitř kterého je umístěn blok Flat Sequenc Structure, jehož levá část slouží ke čtení dat ze vstupního modulu a předává tyto data do FIFO paměti pojmenované Signal FPGA. Tyto vstupní data jsou ještě vyvedeny na indikační prvek, který zobrazuje aktuální hodnotu vstupního signálu a dále je tento signál zaveden do bloku Zero Crossing VI, který slouží k detekci průchodu signálu nulou. Pokud je zaznamenán průchod signálu nulou tento blok na svém výstupu generuje hodnotu 1, jinak je na výstupu 0. Vstupem tohoto bloku je mimo vstupního signálu ještě kontrolní prvek, který slouží k volbě, zda-li chceme detekovat průchod signálu ze záporných hodnot do kladných, či z kladných hodnot do záporných nebo chceme detekovat oba průchody. Pravá část opět obsahuje programové zapojení udávající časové intervaly, ve kterých je vykonávána levá část bloku Flat Sequenc Structure.



Obr. 9.15 FPGA VI programu COUNTER

Pod blokem Flat Sequenc Structure se uvnitř bloku While Loop nachází ještě programové zapojení zaznamenávající aktuální hodnotu vnitřních hodin programovatelného hradlového pole FPGA do pole o dvou prvcích. Aktuální hodnota vnitřních hodin programovatelného hradlového pole je zaznamenána vždy pokud je na výstupu bloku Zero Crossing VI hodnota 1, nebo-li vždy, když vstupní signál prochází nulovou hodnotou. Nová hodnota vnitřních hodin programovatelného hradlového pole je vždy zapsána na nultý prvek dvouprvkového pole a stará hodnota, která na tomto prvku byla dosud, se přesune na první prvek tohoto pole. Uvnitř tohoto pole tedy máme zaznamenané dvě hodnoty vnitřních hodin programovatelného hradlového pole, odpovídající hodnotám těchto hodin na začátku a na konci jedné periody vstupního signálu, popřípadě půl periody vstupního signálu v závislosti na nastavení bloku detekujícího průchody nulou. Zároveň je zde vypočítáván rozdíl těchto hodnot a je vyveden na ovládací panel tohoto VI v podobě numerického indikátoru, čímž jsme umožnili tuto hodnotu přenášet do nadřazeného VI.

Druhou částí tohoto programového zapojení je blok Timed Loop, který slouží pouze k předávání dat mezi FIFO pamětmi. Data jsou vyčítána z FIFO paměti Signal FPGA a jsou předávána do FIFO paměti Signál, která tyto data předává do nadřazeného VI, stejně jako v předchozích případech.

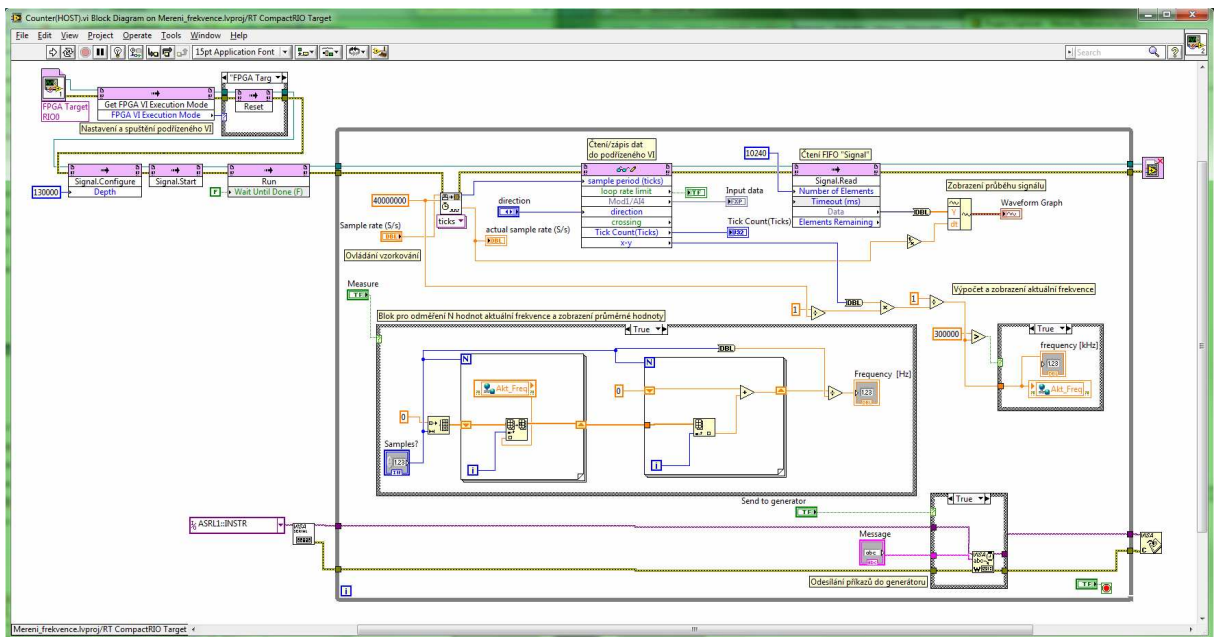


Obr. 9.16 Ovládací panel FPGA VI programu COUNTER

Mezi prvky vyvedenými na ovládací panel patří numerický indikátor zobrazující aktuální hodnotu vstupního signálu a grafický indikátor průchodu signálu nulou. Dále je zobrazován numerický indikátor s aktuální hodnotou vnitřních hodin programovatelného hradlového pole FPGA a numerický indikátor zobrazující kolik hodinových tiků náleží mezi dvěma průchody vstupního signálu nulou.

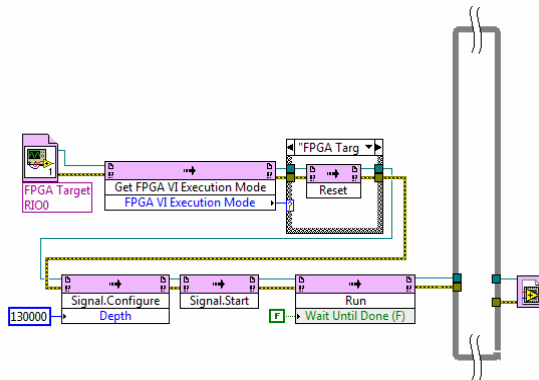
9.4.2 REAL-TIME VI PRO COUNTER

Nyní se dostáváme k VI příslušejícímu k programu Counter, toto VI je nadřazené VI pro VI se stejným jménem běžícím na programovatelném hradlovém poli FPGA. Při jeho popisu budeme postupovat jako v předcházejících případech. Nejdřív si popíšeme programovou část, kterou si opět rozdělíme na tři části. Část týkající se komunikace a odesílání příkazů generátoru připojeném k CompactRIO je totožná jako v předcházejících případech, proto si ji zde nebudeme popisovat. Její popis je možné najít v kapitole 8.2.2.

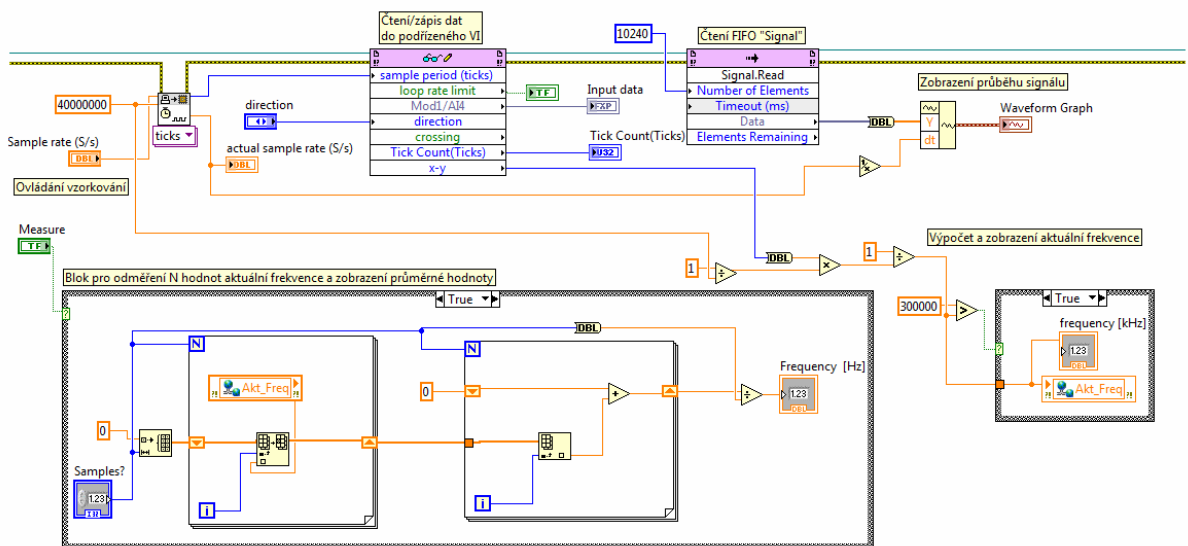


Obr. 9.17 REAL-TIME VI programu COUNTER

Další tedy druhou část programu, týkající se komunikace mezi nadřazeným a podřízeným VI si popíšeme zde. Na přiloženém obrázku vidíme, že se také neliší od předchozích dvou programů. Jedná se podstatě o její zjednodušenou verzi, protože v tomto programu využíváme pouze jednu FIFO paměť. Postupujme ale hezky popořadě, prvním blokem je opět FPGA Target, ve kterém vybereme vhodné podřízené VI, následuje připravení tohoto podřízeného VI pomocí bloku GET FPGA VI Execution Mode a jeho restart v následujícím bloku. Následují bloky, které nastaví velikost použité FIFO paměti a uvede tuto paměť do chodu. Následuje už jen blok, který spustí podřízené VI v programovatelném hradlovém poli FPGA. Toto vše je připojeno z levé strany k bloku While Loop, z pravé strany je opět pouze blok Close FPGA VI, ukončující podřízené VI při ukončení VI nadřazeného.



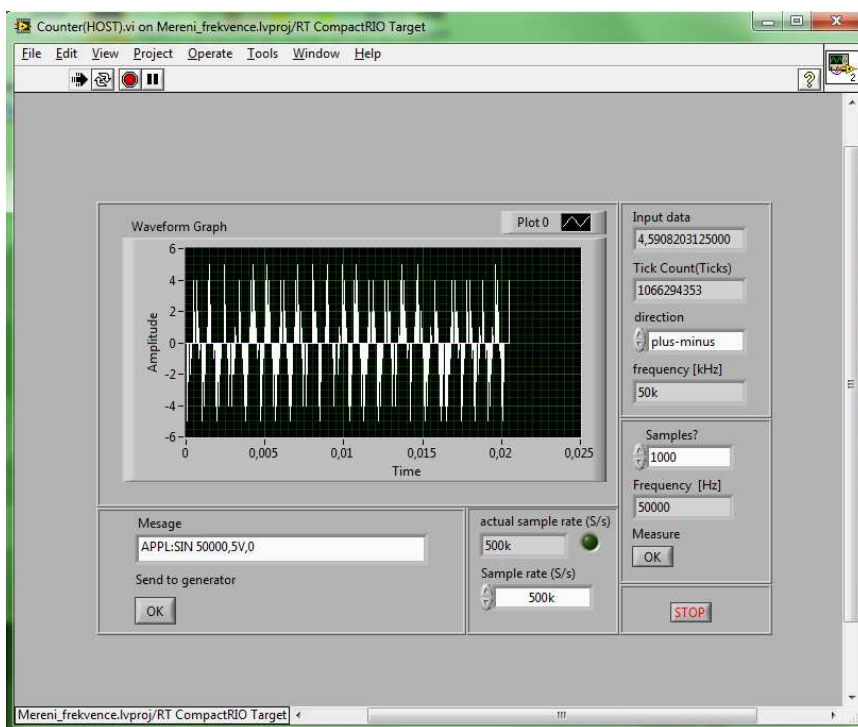
Obr. 9.18 Programová část zajišťující komunikaci s podřízeným VI programu Counter



Obr. 9.19 Hlavní programová část uvnitř bloku While Loop programu Counter

Postupme k popisu programového zapojení tohoto VI uvnitř While Loop, kde je umístěn program sám. V levé části programového zapojení se jako v předchozích dvou programech nachází blok Sample Rate To Loop Time VI, jehož dva vstupy tvoří kontrolní prvek nastavující aktuální vzorkovací frekvenci vstupního modulu a prvek nastavující frekvenci hodinového signálu pro programovatelné hradlové pole FPGA. Výstupem tohoto bloku je aktuální vzorkovací frekvence a hodnota časového intervalu určujícího vykonávání smyček v podřízeném VI. Hodnota tohoto časového intervalu je předávána do podřízeného VI pomocí bloku Read/Write Control Function spolu s parametrem určujícím jaký průchod nulou chceme detekovat, zda-li ze záporných hodnot do kladných, nebo z kladných do záporných popřípadě obě možnosti najednou. Parametry, které pomocí tohoto bloku z podřízeného VI vyčítáme jsou, aktuální hodnota

vstupního signálu, aktuální hodnota vnitřních hodin programovatelného hradlového pole a parametr určující kolik hodinových tiků vnitřních hodin programovatelného hradlového pole připadá mezi dva průchody vstupního signálu nulou. Dále je přes jednoduché programové zapojení vypočítána aktuální hodnota frekvence vstupního signálu podle vztahu (4.11). Tato hodnota je pak zobrazována pomocí numerického indikátoru na ovládacím panelu tohoto VI, zároveň je tato hodnota zapisována do pomocné proměnné Akt_Freq. Ve spodní části uvnitř bloku While Loop se nachází blok Case Structure který je ovládán pomocí tlačítka Measure. Uvnitř tohoto bloku se nachází mimo kontrolního prvku Samples?, kterým udáváme kolikrát chceme zaznamenat aktuální vypočítanou frekvenci vstupního signálu ještě dva For cykly. První z těchto For cyklů zapisuje aktuální hodnotu frekvence vstupního signálu do pole, které je vytvořeno uvnitř Case Structure. Tyto aktuální hodnoty frekvence jsou do tohoto For cyklu předávány právě pomocí proměnné Akt_Freq. V druhém For cyklu je prováděna sumace všech hodnot uvnitř tohoto pole, obsahujícího jednotlivé zaznamenané hodnoty aktuální frekvence vstupního signálu. A na výstupu tohoto For cyklu je hodnota představující sumu všech hodnot v poli podělena počtem prvku pole a je získána průměrná hodnota frekvence vstupního signálu, která je poté zobrazena na numerickém indikátoru. V programové části se ještě nachází blok pro čtení FIFO paměti Signal, pomocí kterého získáváme z podřízeného VI data nesoucí informaci o časovém průběhu vstupního signálu. Tyto data jsou přes blok Build Waveform Function připojena na grafický indikátor na ovládacím panelu tohoto VI.



Obr. 9.20 Ovládací panel programu COUNTER

A nyní už přejdeme k ovládacímu panelu tohoto VI. Při jeho popisu můžeme říct, že tomuto panelu dominuje grafický indikátor zobrazující průběh vstupního signálu. Napravo od tohoto grafického indikátoru je část věnovaná zobrazení dat měření. Vidíme zde numerický indikátor aktuální hodnoty vstupního signálu, dále je zde umístěn numerický indikátor zobrazující aktuální stav vnitřních hodin programovatelného hradlového pole a numerický indikátor zobrazující aktuální hodnotu frekvence měřeného signálu. Mezi tyto numerické indikátory je zařazen kontrolní prvek sloužící k volbě průchodu signálu nulou, který chceme detekovat, možnosti volby byly popsány výše. Pod touto částí ovládacího panelu je část, pomocí které ovládáme odměření libovolného počtu hodnot aktuální frekvence vstupního signálu a následné zprůměrnování těchto hodnot, vždy po stisknutí tlačítka Measure. Vidíme, že tato část kromě zmíněného tlačítka Measure pro zaznamenání požadovaného počtu hodnot, je ještě osazena kontrolním prvkem Samples?, kterým určujeme kolik hodnot chceme zaznamenat a numerickým indikátorem, který nám zobrazuje zprůměrnovanou hodnotu frekvence. Pod grafickým indikátorem průběhu vstupního signálu se nachází část pro ovládání připojeného generátoru. Máme tu prvek, do kterého zapisujeme příkazy pomocí kterých ovládáme generátor a tlačítko, kterým provedeme vyslání příkazu do generátoru. A poslední část slouží k ovládání vzorkování vstupního modulu. Máme zde tedy prvek, kterým zadáváme požadovanou vzorkovací frekvenci vstupního modulu a numerický indikátor, který nám zobrazuje skutečnou hodnotu této vzorkovací frekvence.

9.4.3 DOSAŽNÉ VÝSLEDKY

Příloha 3 představuje tabulky naměřených dat spolu s vypočtenými chybami a nejistotami pro tuto metodu měření kmitočtu.

Při ověřování měřitelných frekvenčních rozsahů touto metodou se měřili stejně jako v předchozích případech frekvence na rozsahu 2 – 240 KHz pro sinusový a obdélníkový průběh, a z důvodu nemožnosti nastavení na připojeném generátoru Agilent 33120A vyšší frekvenci než 100 KHz pro trojúhelníkový průběh, měříme pro tento průběh pouze na rozsahu 2 – 100 KHz. A to při vzorkovací frekvenci 500 KS/s. Při této metodě jsme zaznamenávali výslednou frekvenci zprůměrnováním požadovaného počtu aktuálních hodnot frekvence. Počet aktuálních hodnot frekvence pro zprůměrnování nabýval hodnot 100 a 1000 vzorků. Z příložených tabulek je patrné, že chyba měření vzrůstá se vzrůstajícím měřeným kmitočtem, ovšem pro 1000 vzorkové měření vidíme dosažení nepatrně lepších výsledků oproti měření 100 vzorkovému. Nejmenší chyby zde dosahují řádově setin % a začínají narůstat do řádově jednotek % pro kmitočty větší jak 150 KHz.

Při měření nižších kmitočtů na rozsahu 0,2 – 20 KHz, tedy se vzorkovacím kmitočtem 50 KS/s, jak při 100 i 1000 vzorkovém sběru aktuálních hodnot frekvencí vidíme, že chyby dosahují hodnot maximálně setin %. Vyrůstají až pro poslední hodnoty na měřeném rozsahu a to do jednotek %. Nejhorší chybu vykazuje metoda pro obdélníkový průběh při frekvenci 20 KHz a to 12,12 %.

Vzorkovací frekvence 500 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (213833,20 \pm 10658,36) \text{ Hz}$	$f = (209833,20 \pm 11088,89) \text{ Hz}$	$f = (74833,34 \pm 998,18) \text{ Hz}$
$f = (999,77 \pm 0,36) \text{ Hz}$	$f = (999,99 \pm 0,23) \text{ Hz}$	$f = (1000,11 \pm 0,29) \text{ Hz}$
Vzorkovací frekvence 50 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (21566,64 \pm 1207,61) \text{ Hz}$	$f = (21199,98 \pm 1290,02) \text{ Hz}$	$f = (21933,34 \pm 913,74) \text{ Hz}$
$f = (200,00 \pm 0,05) \text{ Hz}$	$f = (200,00 \pm 0,05) \text{ Hz}$	$f = (200,00 \pm 0,05) \text{ Hz}$

Tab. 5 Tabulka nejistot programu Counter pro 100 vzorků

Vzorkovací frekvence 500 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (216666,80 \pm 23353,73) \text{ Hz}$	$f = (216033,40 \pm 21942,10) \text{ Hz}$	$f = (76678,58 \pm 3539,46) \text{ Hz}$
$f = (1000,00 \pm 0,23) \text{ Hz}$	$f = (1000,00 \pm 0,23) \text{ Hz}$	$f = (1999,99 \pm 0,46) \text{ Hz}$
Vzorkovací frekvence 50 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (20315,00 \pm 2371,68) \text{ Hz}$	$f = (22758,34 \pm 1885,71) \text{ Hz}$	$f = (21228,32 \pm 2197,22) \text{ Hz}$
$f = (200,02 \pm 0,05) \text{ Hz}$	$f = (200,00 \pm 0,05) \text{ Hz}$	$f = (199,99 \pm 0,05) \text{ Hz}$

Tab. 6 Tabulka nejistot programu Counter pro 1000 vzorků

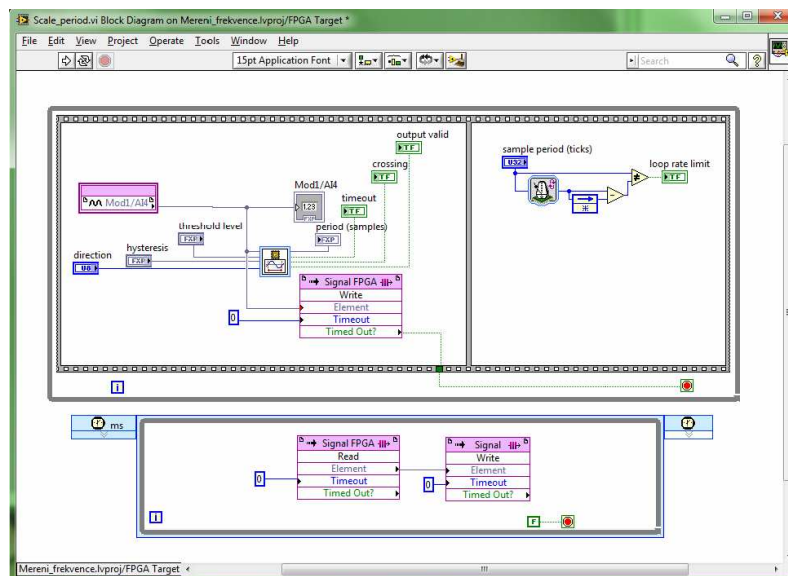
V tab.5 a tab.6 máme uvedeny největší a nejmenší nejistoty pro 100 a 1000 vzorkové měření pomocí programu Counter. Výpočet nejistoty typu A probíhal podle vztahů (5.4),(5.5) a (5.6) z naměřených hodnot a poté byl korigován korekčním koeficientem $k = 1,4$ podle vztahu (5.7). Nejistota typu B byla vypočtena podle vztahu (5.9) ze dvou zdrojů. Prvním zdrojem nejistoty byl generátor Agilent 33120A, jehož stabilita o hodnotě 10 ppm byla vyčtena z technické dokumentace přístroje. Druhým zdrojem nejistot byla analogová vstupní karta NI9201 platformy CompactRIO, jejíž chyba 0,04 % čtené hodnoty pro kalibrovanou kartu pracující v provozní teplotě $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ byla taktéž zjištěna z technické dokumentace karty.

9.5 PROGRAM SCALE_PERIOD

Poslední program figurující v tomto projektu je program s názvem Scale_period, jehož název je odvozen od názvu programového bloku implementovaného v LabView, který nám dává na svém výstupu délku periody vstupního signálu.

9.5.1 FPGA VI PRO PROGRAM SCALE_PERIOD

Podřízené VI Scale_period běžící na programovatelném hradlovém poli FPGA, spolupracující s VI Scale_period běžícím na Real-Time procesoru, si nyní popíšeme.

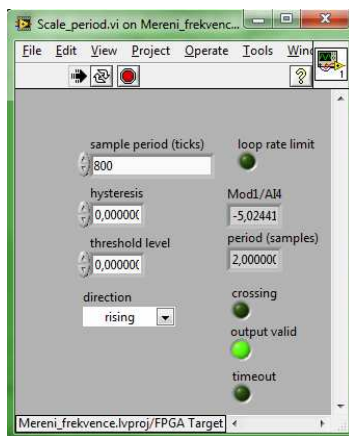


Obr. 9.21 FPGA VI programu SCALE_PERIOD

Začneme z levé strany, kde je pomocí bloku FPGA I/O Node čtena aktuální hodnota vstupního signálu připojeného pomocí vstupního modulu. Výstup tohoto bloku je přiveden na vstup numerického indikátoru, který nám zobrazuje aktuální hodnotu tohoto vstupního signálu. Dále je tento výstup veden na vstup bloku Analog Period Measurement Express VI, což je blok, který je součástí LabView a slouží pro měření periody signálu, který je přiveden na vstup tohoto bloku. Dalšími vstupy tohoto bloku jsou bloky sloužící k nastavení parametrů tohoto bloku. Mezi parametry, které můžeme nastavovat, jsou parametry Threshold level a Hysteresis, pomocí kterých nastavíme minimální úroveň, kterými musí signál procházet, aby byl tímto blokem měřen. Ještě je zde parametr Direction určující jestli měření periody začne náběžnou nebo sestupnou hranou signálu. Toto zapojení je umístěno uvnitř levé části bloku Flat Sequence Structure, v jeho pravé straně je opět umístěno zapojení určující časové intervaly, ve kterých je zapojení umístěné v pravé části Flat Sequence Structure

vykonáváno. Tyto časové intervaly jsou ovládány pomocí kontrolního prvku Sample period (ticks), který je ovládán z nadřazeného VI.

Dále je signál z bloku FPGA I/O Node veden na vstup FIFO paměti Signal FPGA, pomocí které je v druhé části programu v bloku Timed Loop, předáván do FIFO paměti Signal. FIFO paměť Signal slouží k předávání dat nesoucích informaci o časovém průběhu vstupního signálu do nadřazeného VI.

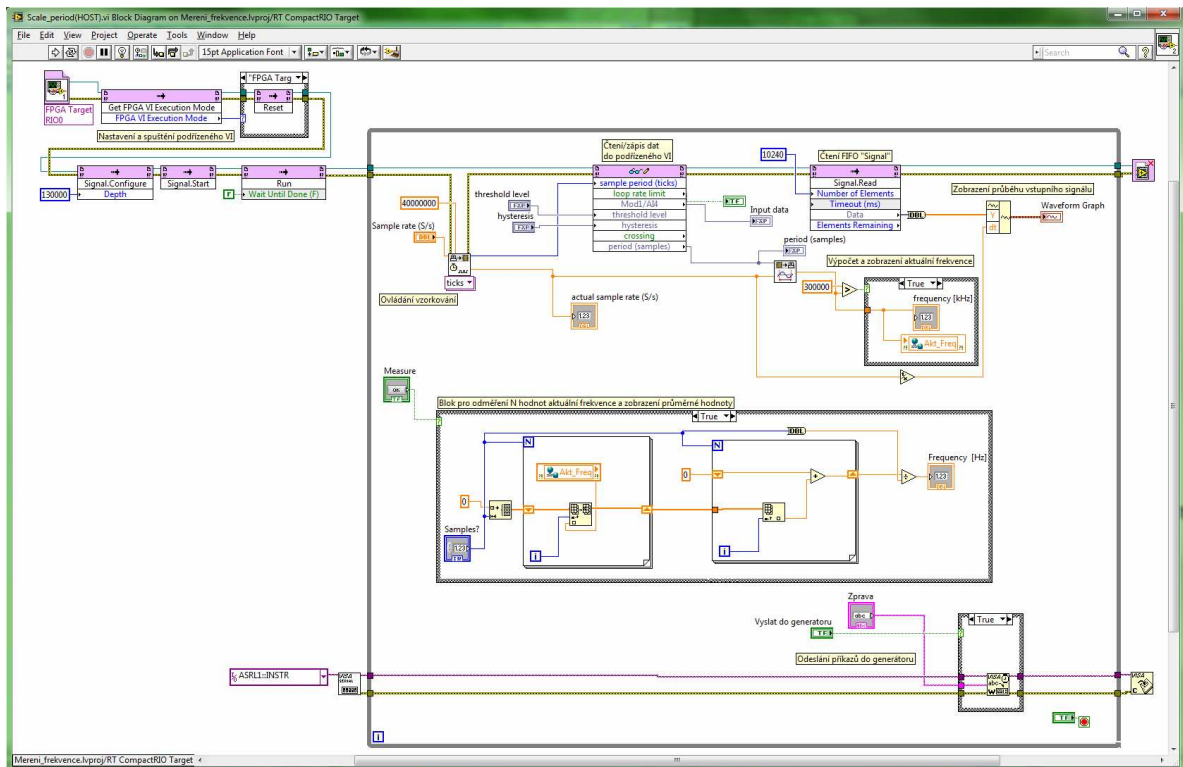


Obr. 9.22 Ovládací panel FPGA VI programu SCALE_PERIOD

Na ovládacím panelu, patřícímu k tomuto VI, máme zobrazeny indikační a kontrolní prvky používané v tomto VI. Jsou zde zmíněné kontrolní prvky bloku Analog Period Measurement Express VI, tedy Hysteresis, Threshold level a Direction, jejichž funkce jsou uvedeny výše v textu. Potom je zde indikační prvek, který je výstupem tohoto bloku a jehož hodnota udává periodu vstupního signálu, jednotkou této proměnné jsou vzorky vstupního signálu. Jako poslední je vyveden indikační prvek zobrazující aktuální hodnotu vstupního signálu a kontrolní prvek určující časové intervaly vykonávání bloku Flat Sequenc Structure.

9.5.2 REAL_TIME VI PRO SCALE_PERIOD

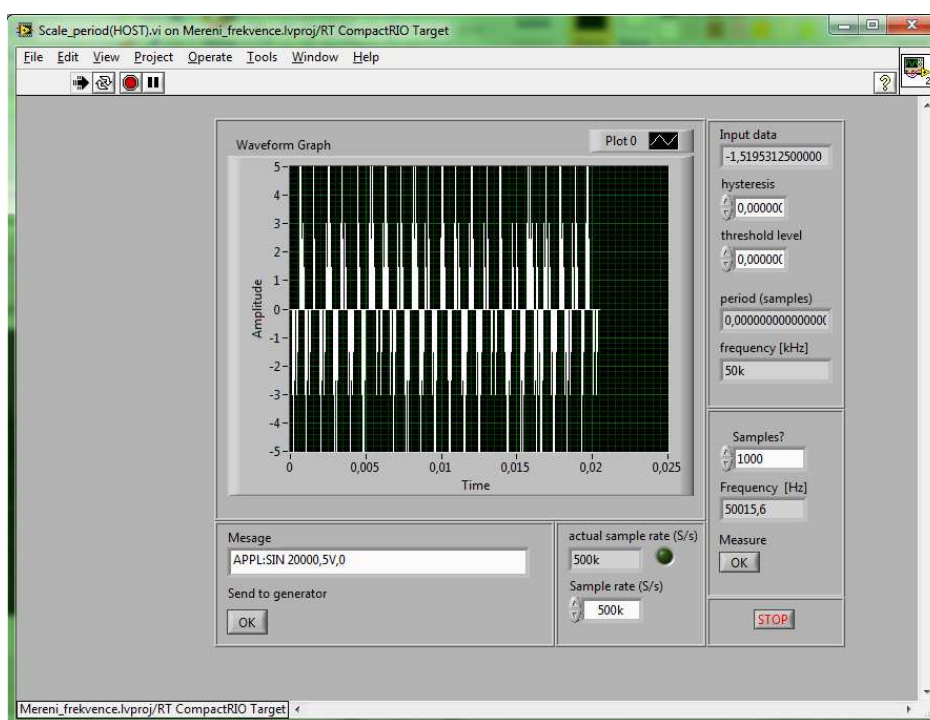
Nyní přistupme k popisu nadřazeného VI náležející programu Scale_period. Je opět složeno ze tří částí. Část zajišťující komunikaci mezi běžícím VI a připojeným generátorem je totožná s předchozími programy, proto odkážme na kapitolu 8.2.2, kde je tento popis uveden. Stejně tak při popisu části programu zajišťující komunikaci mezi tímto nadřazeným VI a podřazeným VI běžícím na programovatelném hradlovém poli FPGA je naprosto totožná se zapojením v programu Counter, proto opět odkážme na kapitolu 8.4.2, kde je tato část popsána.



Obr. 9.23 REAL-TIME VI programu SCALE_PERIOD

Zaměříme se tedy nyní na popis programové části VI uvnitř bloku While Loop, která zajišťuje samotné vykonávání programu. Začneme blokem Sample Rate To Loop Time VI umístěným v levé části, jehož vstupem je hodnota frekvence hodinového signálu programovatelného hradlového pole FPGA nastavena na 40 MHz a hodnota určující vzorkovací frekvenci vstupního modulu, kterou zadáváme pomocí příslušného kontrolního prvku. Výstupem je hodnota určující časové intervaly vykonávání programových smyček uvnitř podřízeného VI, která je do tohoto podřízeného VI předávána pomocí následujícího bloku. Tímto blokem je blok Read/Write Control Function, pomocí kterého do podřízeného VI předáváme ještě parametry Hysteresis a Threshold level, a parametry které pomocí tohoto bloku z podřízeného VI získáváme jsou aktuální hodnota vstupního signálu a parametr Period, udávající délku periody vstupního signálu, jejíž jednotkou je počet vzorků vstupního signálu, který patří do jedné periody vstupního signálu. Tuto hodnotu Period zavádíme ještě s hodnotou aktuální vzorkovací frekvence vstupního modulu do bloku Scale Period VI, který je součástí LabView a je svázán s blokem Analog Period Measurement Express VI, který pracuje v podřízeném VI a na jehož výstupu už přímo získáváme hodnotu aktuální frekvence vstupního signálu. Tato aktuální hodnota frekvence vstupního signálu je zobrazována na indikačním prvku umístěném uvnitř bloku Case Structure, kde je také zapisována do proměnné Akt_Freq. Ještě zde máme blok pro čtení z FIFO paměti

modulu a to pomocí příslušného kontrolního prvku. Napravo od grafického indikátoru časového průběhu vstupního signálu nalézáme několik indikačních a kontrolních prvků. Mezi kontrolní prvky zde patří prvek Hysteresis a Threshold level, pomocí kterých ovládáme vlastnosti měření v podřízeném VI v programovatelném hradlovém poli FPGA. A mezi indikátory je zde prvek zobrazující aktuální hodnotu vstupního signálu a dále zde máme numerický indikátor zobrazující velikost jedné periody vstupního signálu v počtu vzorků vstupního modulu a numerický indikátor zobrazující aktuální vypočtenou frekvenci. Pod touto částí je zde část ovládacího panelu kde nastavujeme počet vzorku pomocí kontrolního prvku Samples?, to jest kolikrát chceme zaznamenat aktuální hodnotu frekvence vstupního modulu pro výpočet její průměrné hodnoty, která je poté zobrazena na numerickém indikačním prvku Frequency.



Obr. 9.25 Ovládací panel programu SCALE_PERIOD

9.5.3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Při snaze interpretovat výsledky pro tuto metodu měření kmitočtu vycházíme z příslušných tabulek uvedených v příloze 4. Výsledná změřená frekvence uvedená v tabulkách naměřených hodnot této metody sestává z průměrné hodnoty frekvence, která je získána sběrem daného počtu aktuálních hodnot měřené frekvence. Počet

zaznamenaných vzorků aktuální frekvence je totožný s předchozí metodou a nabývá počtu 100 a 1000 vzorků.

Pro obdélníkový a sinusový průběh měříme na rozsahu frekvencí 2 – 240 KHz, a pro trojúhelníkový průběh na rozsahu 2 – 100 KHz. Vidíme, že tato metoda vykazuje největší chyby pro obdélníkový průběh, ovšem nijak výrazně nevybočuje z intervalů, které chyby nabývají pro ostatní druhy signálů. Nejmenší hodnoty dosahují chyby pro začátek intervalu měřených frekvencí až po hodnotu 175 KHz, a to řádově setin %. Poté začíná velikost chyby postupně stoupat až po jednotky procent pro konec intervalu měřených frekvencí. Konkrétně největší chyba nastává pro obdélníkový průběh pro frekvenci 220 KHz a nabývá hodnoty 9,82 %.

Na druhém měřeném intervalu 0,2 – 20 KHz dosahují chyby opět řádově setin %, a dosahují jednotek % až pro poslední frekvence z měřeného intervalu. Největší chyba dosahuje hodnoty okolo 8% opět pro obdélníkový průběh.

Vzorkovací frekvence 500 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (125055,90 \pm 625,28) \text{ Hz}$	$f = (125055,90 \pm 625,28) \text{ Hz}$	$f = (125055,90 \pm 625,28) \text{ Hz}$
$f = (5816,50 \pm 29,08) \text{ Hz}$	$f = (5816,50 \pm 29,08) \text{ Hz}$	$f = (5816,50 \pm 29,08) \text{ Hz}$
Vzorkovací frekvence 50 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (15035,79 \pm 75,18) \text{ Hz}$	$f = (15035,79 \pm 75,18) \text{ Hz}$	$f = (15035,79 \pm 75,18) \text{ Hz}$
$f = (581,65 \pm 2,91) \text{ Hz}$	$f = (581,65 \pm 2,91) \text{ Hz}$	$f = (581,65 \pm 2,91) \text{ Hz}$

Tab. 7 Tabulka nejistot programu Scale_Period pro 100 vzorků

Vzorkovací frekvence 500 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (125055,90 \pm 625,28) \text{ Hz}$	$f = (125055,90 \pm 625,28) \text{ Hz}$	$f = (125055,90 \pm 625,28) \text{ Hz}$
$f = (5816,50 \pm 29,08) \text{ Hz}$	$f = (5816,50 \pm 29,08) \text{ Hz}$	$f = (5816,50 \pm 29,08) \text{ Hz}$
Vzorkovací frekvence 50 KS/s		
Sinusový průběh	Obdélníkový průběh	Trojúhelníkový průběh
$f = (15035,79 \pm 75,18) \text{ Hz}$	$f = (15035,79 \pm 75,18) \text{ Hz}$	$f = (15035,79 \pm 75,18) \text{ Hz}$
$f = (581,65 \pm 2,91) \text{ Hz}$	$f = (581,65 \pm 2,91) \text{ Hz}$	$f = (581,65 \pm 2,91) \text{ Hz}$

Tab. 8 Tabulka nejistot programu Scale_Period pro 1000 vzorků

V tab.7 a tab.8 jsou uvedeny největší a nejmenší nejistoty pro 100 a 1000 vzorkové měření pomocí programu Scale_Period. Výpočet nejistoty typu A probíhal podle vztahů (5.4),(5.5) a (5.6) z naměřených hodnot a poté byl korigován korekčním koeficientem $k = 1,4$ podle vztahu (5.7). Výpočet nejistoty typu B byl počítán podle vztahu (5.9) ze dvou zdrojů. Prvním ze zdrojů nejistot byl generátor Agilent 33120A jehož stabilita o hodnotě 10 ppm byla vyčtena z technické dokumentace přístroje.

Analogová vstupní karta NI9201 platformy CompactRIO, jejíž chyba 0,04 % čtené hodnoty pro kalibrovanou kartu pracující v provozní teplotě $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ byla také zjištěna z technické dokumentace karty, byla druhým zdrojem nejistoty.

10 ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval platformou CompactRIO firmy National Instruments, a to jak hardwarovými možnostmi této platformy, tak i softwarovou částí. Byla popsána hlavní přednost tohoto systému v podobě programovatelného hradlového pole FPGA a jeho integrace do systému i možnost snadného programování tohoto hradlového pole bez znalosti jazyka VHDL. Platforma CompactRIO totiž ve spojení s grafickým programovacím jazykem LabView představují mocný nástroj pro tvorbu různorodých aplikací.

První část této práce byla věnována široké nabídce jednotlivých částí platformy CompactRIO firmy National Instruments, a to jak řídicím Real-Time procesorům, tak rozšiřujícím šasi, ale i různorodé nabídce vstupních a výstupních modulů, které nabízejí široké využití ve smyslu svého zaměření, tak i výkonů. V této práci jsem se ovšem nezabýval sortimentem třetích stran, který ale může přinést další rozšíření nabídky komponent platformy, hlavně vstupních a výstupních modulů. Zároveň bylo popsáno, jak lze jednotlivé části této platformy spojovat a vytvářet tak jedinečné přístroje s konkrétním zaměřením podle požadavků uživatele. Poté byla sestavena konkrétní hardwarová konfigurace založená na platformě CompactRIO, která byla zaměřena na měření frekvence analogového signálu.

Ve zbytku práce jsem se věnoval vytvoření softwarové výbavy pro toto zařízení založené na grafickém programovacím jazyce LabView se zaměřením na měření frekvence analogového signálu. Bylo vytvořeno několik různorodých programů, které využívali některé předpřipravené moduly, jež jsou součástí LabView, a na nich bylo vybudováno kompletní programové vybavení. Programy byly vytvářeny tak, aby veškerý běh programů zajišťovalo zařízení samotné a nepotřebovalo ke svému běhu PC. Pomocí programové výbavy je možné měřit frekvence v rozsahu, který nám dovoluje analogový vstupní modul NI9201, a to s velmi malou nepřesností. V oblasti frekvencí, kde by některý z programů už díky velkému zatížení výsledku chybou byl neuspokojivý, můžeme využít jiný, který tuto frekvenční oblast dokáže vyhodnotit s uspokojivou chybou. Lze tedy konstatovat, že s danou programovou výbavou jsme schopni uspokojivě pokrýt celé měřitelné spektrum kmitočtů tohoto konkrétního analogového modulu.

Domnívám se, že cíle této práce byly splněny. Práce dokáže poskytnout základní přehled a orientaci v nabídce komponent platformy CompactRIO. Pomocí programové výbavy jsme schopni měřit analogové signály a zobrazovat jejich spektra zcela autonomně pouze s pomocí tohoto zařízení. Jelikož je zařízení připojeno do sítě, je možné na něj vzdáleně přistupovat pomocí sítě Internet. Hlavní úskalí ovšem tkví v tom, že uživatel, který na něho chce přistoupit musí mít nainstalované na svém PC program LabView, se všemi potřebnými moduly, bez kterého se není možné na zařízení

připojit. Další vývoj lze směřovat k vytvoření webového rozhraní, které by zpřístupnilo ovládací panely všech programů s využitím aplikační platformy Silverlight pomocí internetových prohlížečů, a tím by bylo možné ovládat veškeré programy běžící na zařízení CompactRIO bez nutnosti instalovat na PC program LabView.

11 POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] WIKIPEDIE [online]. [6.5.2012]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Rudolf_Hertz
- [2] HEJL, T. Fourierovy transformace: Aplikace transformací ve zpracování diskrétních signálů. ČVUT PRAHA. [22.4.2012]. Dostupné z WWW: http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tns/Fourierovy_transformace.pdf
- [3] NATIONAL INSTRUMENTS [online]. [6.5.2012]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/7111/en>
- [4] BEJČEK, L.-ČEJKA, M.-REZ, J.-GESCHEIDTOVÁ, E.-STEIBAUER, M.: Měření v elektrotechnice. 241 stran
- [5] <http://www.fsid.cvut.cz/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS – COMPACTRIO [online]. [6.5.2012]. Dostupné z: <http://www.ni.com/compactrio/>
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS – Getting Started with CompactRIO and Labview [online]. [8.5.2012]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372596a.pdf>
- [8] ČEJKA, M.: Stručný úvod do problematiky nejistot měření.

12 SEZNAM ZKRATEK

DFT – Discrete Fourier transform

FFT – Fast Fourier transform

FPGA – Field-programmable gate array

PAC - programmable automation controller

VHDL - Very high speed integrated circuits hardware description language

FIFO – First in first out

VI – Virtual instrument

13 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 Naměřená data programu FFT_Windowed	70
PŘÍLOHA 2 Naměřená data programu FFT_Handshaking	72
PŘÍLOHA 3 Naměřená data programu Counter	74
PŘÍLOHA 4 Naměřená data programu Scale_Period.....	79

PŘÍLOHA 1 Naměřená data programu FFT_Windowed

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
2	2035,70	2035,79	2035,75	0,04	17,63	17,63	-35,74	1,76
5	5816,50	5816,55	5816,53	0,02	17,67	17,67	-816,53	14,04
10	9888,10	9888,14	9888,12	0,02	17,77	17,77	111,88	1,13
20	19458,40	19458,45	19458,43	0,02	18,18	18,18	541,57	2,78
50	50894,80	50894,85	50894,83	0,02	21,18	21,18	-894,82	1,76
75	74161,00	74161,00	74161,00	0,00	24,58	24,58	839,00	1,13
100	99753,90	99753,90	99753,90	0,00	29,01	29,01	246,10	0,25
125	125055,90	125055,90	125055,90	0,00	33,84	33,84	-55,90	0,04
150	150357,90	150357,90	150357,90	0,00	38,95	38,95	-357,90	0,24
175	175659,90	175659,90	175659,90	0,00	44,24	44,24	-659,90	0,38
200	199217,00	199217,00	199217,00	0,00	49,28	49,28	783,00	0,39
220	220738,20	220738,20	220738,20	0,00	53,95	53,95	-738,20	0,33
240	240223,70	240223,70	240223,70	0,00	58,22	58,22	-223,70	0,09

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
2	2035,79	2035,79	2035,79	0,00	17,63	17,63	-35,79	1,76
5	5816,55	5816,55	5816,55	0,00	17,67	17,67	-816,55	14,04
10	9888,14	9888,14	9888,14	0,00	17,77	17,77	111,86	1,13
20	19485,45	19485,45	19485,45	0,00	18,19	18,19	514,55	2,64
50	50894,85	50894,85	50894,85	0,00	21,18	21,18	-894,85	1,76
75	74161,07	74161,07	74161,07	0,00	24,58	24,58	838,93	1,13
100	99753,91	99753,91	99753,91	0,00	29,01	29,01	246,09	0,25
125	125055,92	125055,92	125055,92	0,00	33,84	33,84	-55,92	0,04
150	150357,94	150357,94	150357,94	0,00	38,95	38,95	-357,94	0,24
175	175659,95	175659,95	175659,95	0,00	44,24	44,24	-659,95	0,38
200	199217,00	199217,00	199217,00	0,00	49,28	49,28	783,00	0,39
220	220738,25	220738,25	220738,25	0,00	53,95	53,95	-738,25	0,33
240	240223,71	240223,71	240223,71	0,00	58,22	58,22	-223,71	0,09

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
2	2035,79	2035,79	2035,79	0,00	17,63	17,63	-35,79	1,76
5	5816,55	5816,55	5816,55	0,00	17,67	17,67	-816,55	14,04
10	9888,14	9888,14	9888,14	0,00	17,77	17,77	111,86	1,13
20	19485,45	19485,45	19485,45	0,00	18,19	18,19	514,55	2,64
50	50894,85	50894,85	50894,85	0,00	21,18	21,18	-894,85	1,76
75	74161,07	74161,07	74161,07	0,00	24,58	24,58	838,93	1,13
100	99753,91	99753,91	99753,91	0,00	29,01	29,01	246,09	0,25

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	203,57	203,57	203,57	0,00	1,76	1,76	-3,57	1,75
0,5	581,65	581,65	581,65	0,00	1,77	1,77	-81,65	14,04
1	988,81	988,81	988,81	0,00	1,78	1,78	11,19	1,13
2	1948,54	1948,54	1948,54	0,00	1,82	1,82	51,46	2,64
5	5089,48	5089,48	5089,48	0,00	2,12	2,12	-89,48	1,76
10	9975,39	9975,39	9975,39	0,00	2,90	2,90	24,61	0,25
15	15035,79	15035,79	15035,79	0,00	3,89	3,89	-35,79	0,24
20	19921,70	19921,70	19921,70	0,00	4,93	4,93	78,30	0,39

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	203,58	203,58	203,58	0,00	1,76	1,76	-3,58	1,76
0,5	581,65	581,65	581,65	0,00	1,77	1,77	-81,65	14,04
1	988,81	988,81	988,81	0,00	1,78	1,78	11,19	1,13
2	1948,54	1948,54	1948,54	0,00	1,82	1,82	51,46	2,64
5	5089,48	5089,48	5089,48	0,00	2,12	2,12	-89,48	1,76
10	9975,39	9975,39	9975,39	0,00	2,90	2,90	24,61	0,25
15	15035,79	15035,79	15035,79	0,00	3,89	3,89	-35,79	0,24
20	19921,70	19921,70	19921,70	0,00	4,93	4,93	78,30	0,39

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	203,57	203,57	203,57	0,00	1,76	1,76	-3,57	1,75
0,5	581,66	581,66	581,66	0,00	1,77	1,77	-81,66	14,04
1	988,81	988,81	988,81	0,00	1,78	1,78	11,19	1,13
2	1948,54	1948,54	1948,54	0,00	1,82	1,82	51,46	2,64
5	5089,48	5089,48	5089,48	0,00	2,12	2,12	-89,48	1,76
10	9975,39	9975,39	9975,39	0,00	2,90	2,90	24,61	0,25
15	15035,79	15035,79	15035,79	0,00	3,89	3,89	-35,79	0,24
20	19921,70	19921,70	19921,70	0,00	4,93	4,93	78,30	0,39

PŘÍLOHA 2 Naměřená data programu FFT_Handshaking

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
2	1954,88	1954,88	1954,88	0,00	17,63	17,63	45,12	2,31
5	5864,66	5864,66	5864,66	0,00	17,67	17,67	-864,66	14,74
10	9774,40	9774,40	9774,40	0,00	17,76	17,76	225,60	2,31
20	19548,80	19548,80	19548,80	0,00	18,19	18,19	451,20	2,31
50	50827,00	50827,00	50827,00	0,00	21,17	21,17	-827,00	1,63
75	74285,70	74285,70	74285,70	0,00	24,60	24,60	714,30	0,96
100	99699,20	99699,20	99699,20	0,00	29,00	29,00	300,80	0,30
125	124895,50	124895,50	124895,50	0,00	33,81	33,81	104,50	0,08
150	150309,10	150309,10	150309,10	0,00	38,94	38,94	-309,10	0,21
175	175722,60	175722,60	175722,60	0,00	44,25	44,25	-722,60	0,41
200	199181,20	199181,20	199181,20	0,00	49,27	49,27	818,80	0,41
220	220685,00	220685,00	220685,00	0,00	53,94	53,94	-685,00	0,31
240	240233,90	240233,90	240233,90	0,00	58,23	58,23	-233,90	0,10

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
2	1954,88	1954,88	1954,88	0,00	17,63	17,63	45,12	2,31
5	5864,66	5864,66	5864,66	0,00	17,67	17,67	-864,66	14,74
10	9774,43	9774,43	9774,43	0,00	17,76	17,76	225,57	2,31
20	19548,80	19548,80	19548,80	0,00	18,19	18,19	451,20	2,31
50	50827,00	50827,00	50827,00	0,00	21,17	21,17	-827,00	1,63
75	74285,70	74285,70	74285,70	0,00	24,60	24,60	714,30	0,96
100	99699,20	99699,20	99699,20	0,00	29,00	29,00	300,80	0,30
125	124895,00	124895,00	124895,00	0,00	33,81	33,81	105,00	0,08
150	150309,00	150309,00	150309,00	0,00	38,94	38,94	-309,00	0,21
175	175722,00	175722,00	175722,00	0,00	44,25	44,25	-722,00	0,41
200	199181,00	199181,00	199181,00	0,00	49,27	49,27	819,00	0,41
220	220685,00	220685,00	220685,00	0,00	53,94	53,94	-685,00	0,31
240	240233,00	240233,00	240233,00	0,00	58,23	58,23	-233,00	0,10

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
2	1954,88	1954,88	1954,88	0,00	17,63	17,63	45,12	2,31
5	5864,66	5864,66	5864,66	0,00	17,67	17,67	-864,66	14,74
10	9774,43	9774,43	9774,43	0,00	17,76	17,76	225,57	2,31
20	19548,80	19548,80	19548,80	0,00	18,19	18,19	451,20	2,31
50	50827,00	50827,00	50827,00	0,00	21,17	21,17	-827,00	1,63
75	74285,70	74285,70	74285,70	0,00	24,60	24,60	714,30	0,96
100	99699,20	99699,20	99699,20	0,00	29,00	29,00	300,80	0,30

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	195,49	195,49	195,49	0,00	1,58	1,58	4,51	2,31
0,5	586,47	586,47	586,47	0,00	1,58	1,58	-86,47	14,74
1	977,44	977,44	977,44	0,00	1,59	1,59	22,56	2,31
2	1954,88	1954,88	1954,88	0,00	1,64	1,64	45,12	2,31
5	5082,70	5082,70	5082,70	0,00	1,97	1,97	-82,70	1,63
10	9969,92	9969,92	9969,92	0,00	2,79	2,79	30,08	0,30
15	15030,91	15030,91	15030,91	0,00	3,81	3,81	-30,91	0,21
20	19918,12	19918,12	19918,12	0,00	4,86	4,86	81,88	0,41

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	189,09	189,09	189,09	0,00	1,58	1,58	10,91	5,77
0,5	598,78	598,78	598,78	0,00	1,58	1,58	-98,78	16,50
1	976,96	976,96	976,96	0,00	1,59	1,59	23,04	2,36
2	1953,93	1953,93	1953,93	0,00	1,64	1,64	46,07	2,36
5	5073,93	5073,93	5073,93	0,00	1,96	1,96	-73,93	1,46
10	9958,78	9958,78	9958,78	0,00	2,79	2,79	41,22	0,41
15	15032,72	15032,72	15032,72	0,00	3,81	3,81	-32,72	0,22
20	19917,57	19917,57	19917,57	0,00	4,86	4,86	82,43	0,41

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	189,09	189,09	189,09	0,00	1,58	1,58	10,91	5,77
0,5	598,78	598,78	598,78	0,00	1,58	1,58	-98,78	16,50
1	976,96	976,96	976,96	0,00	1,59	1,59	23,04	2,36
2	1953,93	1953,93	1953,93	0,00	1,64	1,64	46,07	2,36
5	5073,93	5073,93	5073,93	0,00	1,96	1,96	-73,93	1,46
10	9958,78	9958,78	9958,78	0,00	2,79	2,79	41,22	0,41
15	15032,72	15032,72	15032,72	0,00	3,81	3,81	-32,72	0,22
20	19917,57	19917,57	19917,57	0,00	4,86	4,86	82,43	0,41

PŘÍLOHA 3 Naměřená data programu Counter

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	999,90	999,98	1000,02	998,98	999,96	999,77	0,28	0,23	0,36	0,23	0,02
2	1999,80	2000,08	1999,76	1999,92	2000,00	1999,91	0,08	0,46	0,47	0,09	0,00
5	4999,50	4999,01	4981,19	5000,01	5000,00	4995,94	5,17	1,15	5,30	4,06	0,08
10	10002,00	9998,04	10000,00	10000,00	10004,10	10000,83	1,44	2,31	2,72	-0,83	0,01
20	19992,30	20000,00	20000,00	20008,30	20000,00	20000,12	3,54	4,62	5,82	-0,12	0,00
50	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	0,00	11,55	11,55	0,00	0,00
75	79404,80	73809,50	73571,40	74166,70	79404,80	76071,44	1909,79	17,57	1909,87	-1071,44	1,41
100	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	0,00	23,10	23,10	0,00	0,00
125	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	0,00	28,88	28,88	0,00	0,00
150	158750,00	155000,00	159167,00	137083,00	146667,00	151333,40	5895,52	34,96	5895,62	-1333,40	0,88
175	179167,00	173333,00	171667,00	172500,00	173333,00	174000,00	1859,43	40,20	1859,87	1000,00	0,57
200	192500,00	212500,00	225833,00	235000,00	203333,00	213833,20	10658,25	49,40	10658,36	-13833,20	6,47
220	235000,00	237500,00	235833,00	237500,00	236667,00	236500,00	680,32	54,63	682,51	-16500,00	6,98
240	245833,00	245000,00	245000,00	246667,00	247500,00	246000,00	680,32	56,83	682,69	-6000,00	2,44

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	999,98	1000,00	0,01	0,23	0,23	0,00	0,00
2	2000,00	2000,08	2000,00	2000,00	2000,00	2000,02	0,02	0,46	0,46	-0,02	0,00
5	4999,90	5000,05	5000,00	5000,00	5000,05	5000,00	0,04	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,20	10000,00	10000,00	10000,40	10000,00	10000,12	0,11	2,31	2,31	-0,12	0,00
20	20000,00	19999,20	20000,00	20000,00	20000,00	19999,84	0,22	4,62	4,63	0,16	0,00
50	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	0,00	11,55	11,55	0,00	0,00
75	71690,50	74321,40	71714,30	81428,60	71809,50	74192,86	2627,71	17,14	2627,77	807,14	1,09
100	100000,00	100000,00	100000,00	100025,00	100000,00	100005,00	7,00	23,10	24,14	-5,00	0,00
125	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	0,00	28,88	28,88	0,00	0,00
150	132167,00	165792,00	132083,00	157500,00	163000,00	150108,40	10446,73	34,68	10446,78	-108,40	0,07
175	167750,00	167833,00	177083,00	167917,00	171000,00	170316,60	2519,32	39,35	2519,63	4683,40	2,75
200	236167,00	247667,00	179750,00	247083,00	172667,00	216666,80	23353,68	50,05	23353,73	-16666,80	7,69
220	235750,00	189583,00	249083,00	242750,00	249000,00	233233,20	15658,90	53,88	15658,99	-13233,20	5,67
240	249500,00	249583,00	249667,00	246667,00	249417,00	248966,80	807,04	57,51	809,09	-8966,80	3,60

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,00	1000,00	999,98	1000,00	999,98	999,99	0,01	0,23	0,23	0,01	0,00
2	1999,92	2000,00	1999,92	2000,00	1999,92	1999,95	0,03	0,46	0,46	0,05	0,00
5	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	0,00	2,31	2,31	0,00	0,00
20	20000,00	20000,00	20000,00	20000,00	20000,00	20000,00	0,00	4,62	4,62	0,00	0,00
50	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	0,00	11,55	11,55	0,00	0,00
75	74404,80	73928,60	74285,70	73095,20	73690,50	73880,96	327,46	17,07	327,90	1119,04	1,51
100	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	0,00	23,10	23,10	0,00	0,00
125	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	0,00	28,88	28,88	0,00	0,00
150	157917,00	157083,00	159583,00	158750,00	159583,00	158583,20	680,22	36,63	681,21	-8583,20	5,41
175	173333,00	176667,00	178333,00	172500,00	175000,00	175166,60	1494,07	40,47	1494,61	-166,60	0,10
200	233333,00	222500,00	195833,00	205833,00	191667,00	209833,20	11088,79	48,47	11088,89	-9833,20	4,69
220	243333,00	231667,00	216667,00	233333,00	220000,00	229000,00	6746,38	52,90	6746,59	-9000,00	3,93
240	245833,00	245833,00	244167,00	245833,00	247500,00	245833,20	737,79	56,79	739,97	-5833,20	2,37

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,00	999,98	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	0,01	0,23	0,23	0,00	0,00
2	1999,99	2000,00	2000,00	2000,00	1999,99	2000,00	0,00	0,46	0,46	0,00	0,00
5	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	0,00	2,31	2,31	0,00	0,00
20	19999,20	20000,00	20000,00	19999,20	20000,00	19999,68	0,27	4,62	4,63	0,32	0,00
50	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	0,00	11,55	11,55	0,00	0,00
75	71785,70	74333,30	81857,10	71714,30	81845,20	76307,12	3236,78	17,63	3236,83	-1307,12	1,71
100	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	0,00	23,10	23,10	0,00	0,00
125	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	0,00	28,88	28,88	0,00	0,00
150	165917,00	128250,00	165583,00	165833,00	158875,00	156891,60	10198,03	36,24	10198,09	-6891,60	4,39
175	167917,00	168833,00	169417,00	173833,00	167583,00	169516,60	1577,91	39,16	1578,39	5483,40	3,23
200	176167,00	177917,00	180000,00	247833,00	182333,00	192850,00	19298,12	44,55	19298,17	7150,00	3,71
220	231583,00	176917,00	246417,00	179500,00	245750,00	216033,40	21942,10	49,91	21942,15	3966,60	1,84
240	227000,00	249417,00	249667,00	249583,00	249750,00	245083,40	6329,66	56,62	6329,91	-5083,40	2,07

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,02	999,92	1000,60	1000,02	999,98	1000,11	0,17	0,23	0,29	-0,11	0,01
2	1999,84	1999,92	2000,08	2000,00	1999,92	1999,95	0,06	0,46	0,47	0,05	0,00
5	4999,50	4999,01	4999,50	4999,51	4974,26	4994,36	7,03	1,15	7,13	5,64	0,11
10	10002,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,40	0,56	2,31	2,38	-0,40	0,00
20	20000,00	20000,00	19992,30	20000,00	20000,00	19998,46	2,16	4,62	5,10	1,54	0,01
50	50000,00	50000,00	50055,60	50000,00	50000,00	50011,12	15,57	11,55	19,39	-11,12	0,02
75	74523,80	74404,80	73928,60	77619,00	73690,50	74833,34	998,03	17,29	998,18	166,66	0,22
100	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	0,00	23,10	23,10	0,00	0,00

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1001,68	999,96	1000,00	1000,00	999,96	1000,32	0,48	0,23	0,53	-0,32	0,03
2	1999,98	1999,99	1999,99	2000,01	2000,00	1999,99	0,01	0,46	0,46	0,01	0,00
5	5000,00	4999,95	5039,80	5000,05	4999,95	5007,95	11,15	1,16	11,21	-7,95	0,16
10	10000,20	10000,20	10000,00	10000,00	10000,00	10000,08	0,07	2,31	2,31	-0,08	0,00
20	20000,00	20000,80	20000,00	19999,20	20000,00	20000,00	0,35	4,62	4,63	0,00	0,00
50	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	49995,50	49999,10	1,26	11,55	11,62	0,90	0,00
75	71690,50	82809,50	72166,70	73928,60	82797,60	76678,58	3539,41	17,71	3539,46	-1678,58	2,19
100	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	0,00	23,10	23,10	0,00	0,00

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	200,01	200,02	200,00	200,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00
0,5	500,00	500,00	499,90	500,10	499,95	499,99	0,05	0,12	0,12	0,01	0,00
1	1000,00	1000,00	1000,00	1000,20	1000,00	1000,04	0,06	0,23	0,24	-0,04	0,00
2	2000,00	2000,00	2000,00	2000,83	2000,00	2000,17	0,23	0,46	0,52	-0,17	0,01
5	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	0,00	2,31	2,31	0,00	0,00
15	15750,00	16125,00	16000,00	16166,70	15250,00	15858,34	235,95	3,66	235,98	-858,34	5,41
20	19333,30	19583,30	23083,30	23000,00	22833,30	21566,64	1207,60	4,98	1207,61	-1566,64	7,26

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	200,00	200,00	200,10	200,02	0,03	0,05	0,05	-0,02	0,01
0,5	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,12	0,12	0,00	0,00
1	1000,00	999,98	1000,00	1000,02	1000,00	1000,00	0,01	0,23	0,23	0,00	0,00
2	2000,00	1999,92	2000,00	2000,00	2000,00	1999,98	0,02	0,46	0,46	0,02	0,00
5	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	0,00	2,31	2,31	0,00	0,00
15	16575,00	16133,30	12729,20	16620,80	16591,70	15730,00	1057,79	3,63	1057,80	-730,00	4,64
20	24116,70	17983,30	17075,00	17633,30	24766,70	20315,00	2371,68	4,69	2371,68	-315,00	1,55

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	199,99	200,00	200,00	200,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00
0,5	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,12	0,12	0,00	0,00
1	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	0,00	0,23	0,23	0,00	0,00
2	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	0,00	0,46	0,46	0,00	0,00
5	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	0,00	2,31	2,31	0,00	0,00
15	13750,00	16125,00	16208,30	13916,70	16000,00	15200,00	783,35	3,51	783,36	-200,00	1,32
20	19333,30	23666,70	19333,30	20583,30	23083,30	21199,98	1290,01	4,90	1290,02	-1199,98	5,66

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00
0,5	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,12	0,12	0,00	0,00
1	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	0,00	0,23	0,23	0,00	0,00
2	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	0,00	0,46	0,46	0,00	0,00
5	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	0,00	2,31	2,31	0,00	0,00
15	13583,30	16016,70	16483,30	16362,50	16270,80	15743,32	763,58	3,64	763,59	-743,32	4,72
20	23666,70	23941,70	17416,70	24733,30	24033,30	22758,34	1885,71	5,26	1885,71	-2758,34	12,12

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	199,99	200,00	200,00	200,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00
0,5	500,00	500,00	500,05	500,00	500,00	500,01	0,01	0,12	0,12	-0,01	0,00
1	999,61	999,80	1000,00	1000,00	1000,00	999,88	0,11	0,23	0,26	0,12	0,01
2	2000,00	2000,00	2000,00	1999,23	2000,00	1999,85	0,22	0,46	0,51	0,15	0,01
5	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	1,16	1,16	0,00	0,00
10	10000,00	9983,33	10000,00	10000,00	10000,00	9996,67	4,67	2,31	5,21	3,33	0,03
15	16041,70	16000,00	14083,30	15958,30	15875,00	15591,66	529,33	3,60	529,35	-591,66	3,79
20	21166,70	23333,30	22666,70	22750,00	19750,00	21933,34	913,73	5,07	913,74	-1933,34	8,81

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	199,94	200,00	200,00	199,99	0,02	0,05	0,05	0,01	0,01
0,5	500,01	500,01	500,01	500,00	500,00	500,00	0,00	0,12	0,12	0,00	0,00
1	1000,00	1000,00	1000,00	999,98	1001,45	1000,29	0,41	0,23	0,47	-0,29	0,03
2	2000,17	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,03	0,05	0,46	0,46	-0,03	0,00
5	5000,00	4999,55	5000,00	5000,00	5000,00	4999,91	0,13	1,16	1,16	0,09	0,00
10	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	0,00	2,31	2,31	0,00	0,00
15	16483,30	16587,50	15758,30	16333,30	16595,80	16351,64	218,01	3,78	218,04	-1351,64	8,27
20	24725,00	23625,00	17275,00	17633,30	22883,30	21228,32	2197,21	4,90	2197,22	-1228,32	5,79

PŘÍLOHA 4 Naměřená data programu Scale_Period

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,06	999,98	999,90	1000,05	999,93	999,98	0,04	0,23	0,24	0,02	0,00
2	2000,25	1999,84	1999,66	1999,79	1999,55	1999,82	0,17	0,46	0,49	0,18	0,01
5	4999,03	4999,80	4999,99	5000,32	5000,76	4999,98	0,40	1,16	1,22	0,02	0,00
10	9997,78	10001,50	9999,22	9999,98	10000,00	9999,70	0,85	2,31	2,46	0,30	0,00
20	19997,10	20000,00	19996,90	19999,80	19999,70	19998,70	0,97	4,62	4,72	1,30	0,01
50	49999,20	49999,60	49983,60	49990,20	49999,80	49994,48	4,57	11,55	12,42	5,52	0,01
75	74908,20	74964,60	74905,40	74991,83	74908,80	74935,77	25,01	17,31	30,42	64,23	0,09
100	100003,00	100001,00	99998,40	99998,40	99966,40	99993,44	9,54	23,10	24,99	6,56	0,01
125	125004,00	125001,00	124994,00	125001,00	124996,00	124999,20	2,56	28,88	28,99	0,80	0,00
150	150178,00	147979,00	151014,00	152024,00	146941,00	149627,20	1324,59	34,57	1325,04	372,80	0,25
175	173312,00	175371,00	175534,00	179420,00	176118,00	175951,00	1383,68	40,65	1384,28	-951,00	0,54
200	206818,00	204493,00	201278,00	197575,00	203701,00	202773,00	2201,07	46,84	2201,57	-2773,00	1,37
220	229690,00	229461,00	229337,00	229810,00	213848,00	226429,20	4404,96	52,31	4405,27	-6429,20	2,84
240	233914,00	242530,00	244391,00	245154,00	244307,00	242059,20	2913,78	55,92	2914,31	-2059,20	0,85

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,23	999,87	999,87	1000,00	1000,00	999,99	0,09	0,23	0,25	0,01	0,00
2	1999,69	2000,00	1999,70	2000,22	1999,94	1999,91	0,14	0,46	0,48	0,09	0,00
5	4999,61	4999,08	4999,41	5000,00	4999,64	4999,55	0,21	1,15	1,17	0,45	0,01
10	10000,00	9999,12	10001,00	9999,23	10000,00	9999,87	0,47	2,31	2,36	0,13	0,00
20	20000,00	19997,00	20002,50	20000,00	19996,90	19999,28	1,48	4,62	4,85	0,72	0,00
50	50000,00	50000,00	50000,20	49999,80	50017,30	50003,46	4,84	11,55	12,53	-3,46	0,01
75	75255,80	74861,60	75276,90	75027,80	74914,80	75067,38	119,86	17,34	121,11	-67,38	0,09
100	99999,90	100000,00	99999,90	100000,00	99999,90	99999,94	0,03	23,10	23,10	0,06	0,00
125	125000,00	125000,00	125000,00	124992,50	125000,00	124998,50	2,10	28,88	28,95	1,50	0,00
150	147333,00	152260,00	153587,00	150972,00	154092,00	151648,80	1691,15	35,03	1691,51	-1648,80	1,09
175	182238,00	174372,00	180270,00	172467,00	183175,00	178504,40	3009,16	41,24	3009,44	-3504,40	1,96
200	219436,00	184765,00	185715,00	219935,00	217118,00	205393,80	11539,98	47,45	11540,08	-5393,80	2,63
220	237385,00	190020,00	197277,00	230414,00	225971,00	216213,40	13243,83	49,95	13243,92	3786,60	1,75
240	195467,00	242073,00	201023,00	247285,00	241637,00	225497,00	15686,12	52,09	15686,20	14503,00	6,43

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,01	1000,00	999,99	999,89	1000,00	999,98	0,03	0,23	0,23	0,02	0,00
2	1999,94	2000,03	2000,00	1999,94	1999,97	1999,98	0,02	0,46	0,46	0,02	0,00
5	5000,00	4999,80	4999,62	4999,99	4999,41	4999,76	0,16	1,16	1,17	0,24	0,00
10	10000,00	9999,26	9999,43	9999,01	9999,99	9999,54	0,28	2,31	2,33	0,46	0,00
20	19999,90	19997,80	20000,00	19997,90	19999,80	19999,08	0,70	4,62	4,67	0,92	0,00
50	50000,20	49999,80	50010,40	49999,60	49999,40	50001,88	2,99	11,55	11,93	-1,88	0,00
75	73178,20	73276,80	73923,50	74280,50	73613,60	73654,52	286,13	17,02	286,64	1345,48	1,83
100	99998,40	100002,00	99997,70	100002,00	100022,00	100004,42	6,28	23,10	23,94	-4,42	0,00
125	124996,00	124995,00	124999,00	125051,00	125000,00	125008,20	15,04	28,88	32,56	-8,20	0,01
150	140429,00	159009,00	158808,00	144446,00	158021,00	152142,60	5622,50	35,15	5622,61	-2142,60	1,41
175	173339,00	175573,00	171224,00	170882,00	172468,00	172697,20	1179,66	39,90	1180,33	2302,80	1,33
200	202550,00	207389,00	210387,00	188989,00	210997,00	204062,40	5675,18	47,14	5675,38	-4062,40	1,99
220	237228,00	230420,00	230830,00	202080,00	210405,00	222192,60	9452,97	51,33	9453,11	-2192,60	0,99
240	244093,00	243827,00	240361,00	245092,00	245579,00	243790,40	1281,09	56,32	1282,33	-3790,40	1,55

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	999,00	1000,00	1000,00	999,99	999,99	999,80	0,28	0,23	0,36	0,20	0,02
2	2000,00	1999,97	2000,00	2000,00	2000,00	1999,99	0,01	0,46	0,46	0,01	0,00
5	5000,00	4999,80	5000,19	4998,81	5000,00	4999,76	0,34	1,16	1,21	0,24	0,00
10	9999,98	9999,99	9998,44	10000,00	10000,00	9999,68	0,43	2,31	2,35	0,32	0,00
20	19997,20	20000,00	20000,00	19997,00	19997,20	19998,28	0,98	4,62	4,72	1,72	0,01
50	50000,00	50000,00	49999,90	50000,00	49982,80	49996,54	4,81	11,55	12,51	3,46	0,01
75	78237,50	75507,40	73061,30	71633,50	72041,60	74096,26	1728,85	17,12	1728,93	903,74	1,22
100	100000,00	99999,80	100074,00	99999,80	99999,90	100014,70	20,76	23,10	31,06	-14,70	0,01
125	125000,00	125000,00	125000,00	125000,00	125119,00	125023,80	33,32	28,88	44,10	-23,80	0,02
150	162774,00	158970,00	130955,00	165904,00	142536,00	152227,80	9340,11	35,17	9340,18	-2227,80	1,46
175	173243,00	167587,00	185630,00	168295,00	174993,00	173949,60	4541,67	40,18	4541,84	1050,40	0,60
200	234238,00	221801,00	178878,00	195530,00	242764,00	214642,20	16772,07	49,58	16772,15	-14642,20	6,82
220	241259,00	248934,00	245602,00	235960,00	247971,00	243945,20	3354,44	56,35	3354,92	-23945,20	9,82
240	249501,00	237824,00	249567,00	249110,00	249113,00	247023,00	3222,40	57,06	3222,90	-7023,00	2,84

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	999,8	999,8	1000,04	999,97	999,79	999,87	0,08	0,23	0,24	0,13	0,01
2	2000,0	2000,0	2000,50	1999,81	1999,98	2000,06	0,16	0,46	0,49	-0,06	0,00
5	4998,4	5001,0	4999,96	4999,82	5000,55	4999,95	0,60	1,16	1,30	0,05	0,00
10	10002,2	9998,5	10000,8	10001,40	9999,17	10000,41	0,97	2,31	2,50	-0,41	0,00
20	20004,2	20000,9	19999,80	20000,00	19849,90	19970,96	42,39	4,61	42,64	29,04	0,15
50	49998,8	50000,4	49999,60	50000,40	50001,40	50000,12	0,61	11,55	11,57	-0,12	0,00
75	75014,4	74989,3	74987,60	74995,50	74989,30	74995,22	6,97	17,32	18,68	4,78	0,01
100	99995,3	99998,4	99998,40	100042,00	99986,70	100004,16	13,58	23,10	26,80	-4,16	0,00

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 500 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
1	1000,3	1000,0	1000,04	1000,09	1000,01	1000,08	0,07	0,23	0,24	-0,08	0,01
2	2000,2	2000,0	2000,28	2000,00	2000,31	2000,15	0,09	0,46	0,47	-0,15	0,01
5	4999,8	5002,1	5000,00	5001,16	5001,17	5000,85	0,60	1,16	1,30	-0,85	0,02
10	10002,3	9998,5	10000,00	9998,48	9999,23	9999,69	0,99	2,31	2,52	0,31	0,00
20	20000,3	20004,9	20003,10	19997,00	20000,00	20001,06	1,91	4,62	5,00	-1,06	0,01
50	49997,8	50000,0	50000,10	49999,90	49981,40	49995,84	5,09	11,55	12,62	4,16	0,01
75	74947,6	75152,8	75026,20	74835,30	74772,50	74946,88	94,72	17,31	96,29	53,12	0,07
100	99999,9	100000,0	99999,80	99999,90	99982,90	99996,50	4,76	23,10	23,59	3,50	0,00

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,06	200,00	199,99	199,97	200,02	200,01	0,02	0,05	0,05	-0,01	0,00
0,5	499,93	500,15	500,00	500,02	499,92	500,00	0,06	0,12	0,13	0,00	0,00
1	999,93	999,91	999,86	999,75	999,94	999,88	0,05	0,23	0,24	0,12	0,01
2	2000,00	1999,86	1999,79	1999,79	2000,00	1999,89	0,07	0,46	0,47	0,11	0,01
5	5000,04	4998,97	5000,02	4999,96	4998,98	4999,59	0,35	1,15	1,21	0,41	0,01
10	9999,92	10000,20	9999,84	9999,92	10000,50	10000,08	0,17	2,31	2,32	-0,08	0,00
15	14834,60	15014,50	14748,60	15073,50	14866,70	14907,58	83,55	3,44	83,62	92,42	0,62
20	19342,40	19564,60	19823,10	20713,80	20517,00	19992,18	374,33	4,62	374,35	7,82	0,04

Sinusový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,03	200,01	200,01	199,97	200,02	200,01	0,01	0,05	0,05	-0,01	0,00
0,5	500,00	500,00	500,00	500,04	500,10	500,03	0,03	0,12	0,12	-0,03	0,01
1	999,93	999,99	1000,15	1000,00	999,92	1000,00	0,06	0,23	0,24	0,00	0,00
2	2000,30	2000,00	1999,70	1999,74	2000,00	1999,95	0,15	0,46	0,49	0,05	0,00
5	5001,64	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,33	0,46	1,16	1,24	-0,33	0,01
10	9999,98	10000,00	9999,99	10000,00	10005,40	10001,07	1,51	2,31	2,76	-1,07	0,01
15	15301,30	14960,90	14440,20	14612,30	15314,80	14925,90	248,01	3,45	248,03	74,10	0,50
20	21425,20	21185,50	19050,60	21178,80	20714,40	20710,90	603,06	4,78	603,08	-710,90	3,43

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00
0,5	499,96	500,00	500,00	500,00	499,99	499,99	0,01	0,12	0,12	0,01	0,00
1	1000,00	999,93	999,99	999,99	1000,00	999,98	0,02	0,23	0,23	0,02	0,00
2	2000,00	2000,00	1999,98	2000,00	2000,00	2000,00	0,01	0,46	0,46	0,00	0,00
5	4999,00	5000,04	4999,98	5000,74	4999,98	4999,95	0,39	1,16	1,22	0,05	0,00
10	9999,92	9999,84	10003,60	9999,84	10003,80	10001,40	1,32	2,31	2,66	-1,40	0,01
15	15787,90	16036,70	15826,50	15971,00	13868,80	15498,18	573,84	3,58	573,86	-498,18	3,21
20	22824,30	22679,90	22420,60	19328,30	19955,00	21441,62	1042,02	4,95	1042,03	-1441,62	6,72

Obdélníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	199,96	200,00	200,00	200,00	199,99	0,01	0,05	0,05	0,01	0,00
0,5	500,00	499,79	500,00	500,00	500,00	499,96	0,06	0,12	0,13	0,04	0,01
1	1000,00	1000,00	1000,00	1000,08	1000,00	1000,02	0,02	0,23	0,23	-0,02	0,00
2	2000,00	1999,85	2000,00	2000,00	2000,00	1999,97	0,04	0,46	0,46	0,03	0,00
5	5000,00	4998,15	5000,00	5001,85	4999,99	5000,00	0,82	1,16	1,42	0,00	0,00
10	10000,00	9999,98	10000,00	10000,00	9992,78	9998,55	2,02	2,31	3,07	1,45	0,01
15	16572,30	16306,20	16381,20	15917,60	16564,30	16348,32	167,18	3,78	167,22	-1348,32	8,25
20	17074,60	24218,40	24747,80	17628,60	17686,40	20271,16	2414,81	4,68	2414,81	-271,16	1,34

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 100 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	199,91	199,94	199,98	200,02	199,97	0,03	0,05	0,05	0,03	0,02
0,5	500,00	500,09	500,02	499,98	500,00	500,02	0,03	0,12	0,12	-0,02	0,00
1	999,87	999,81	1000,18	999,99	999,73	999,92	0,11	0,23	0,26	0,08	0,01
2	1999,94	2000,02	1999,96	2000,24	2000,07	2000,05	0,08	0,46	0,47	-0,05	0,00
5	4999,94	4999,16	4999,04	4999,96	5000,92	4999,80	0,47	1,16	1,25	0,20	0,00
10	10000,20	10004,10	9999,84	10000,00	10000,20	10000,87	1,14	2,31	2,57	-0,87	0,01
15	14987,50	15033,10	14995,40	15020,90	14998,90	15007,16	11,94	3,47	12,43	-7,16	0,05
20	19526,00	20071,20	20687,20	20300,50	19640,80	20045,14	298,81	4,63	298,85	-45,14	0,23

Trojúhelníkový průběh, napětí 5V, perioda vzorkování 50 Ks/s, 1000 vzorků

f	f _{m1}	f _{m2}	f _{m3}	f _{m4}	f _{m5}	f _{mprum}	u _A	u _B	u _C	Δ	δ
[KHz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
0,2	200,00	200,00	200,05	200,00	199,99	200,01	0,02	0,05	0,05	-0,01	0,00
0,5	500,14	499,88	500,00	500,08	499,89	500,00	0,07	0,12	0,14	0,00	0,00
1	1000,53	1000,04	1000,13	1000,15	999,77	1000,12	0,17	0,23	0,29	-0,12	0,01
2	2000,00	1999,40	2000,29	1999,40	1999,43	1999,70	0,26	0,46	0,53	0,30	0,01
5	4999,99	4998,30	4999,99	5000,00	5000,03	4999,66	0,48	1,15	1,25	0,34	0,01
10	10000,00	10000,00	10000,00	9999,98	9999,98	9999,99	0,01	2,31	2,31	0,01	0,00
15	15041,50	14984,70	15001,70	15008,60	15019,50	15011,20	13,23	3,47	13,68	-11,20	0,07
20	19146,90	21213,20	21325,70	21253,80	19456,90	20479,30	676,90	4,73	676,92	-479,30	2,34