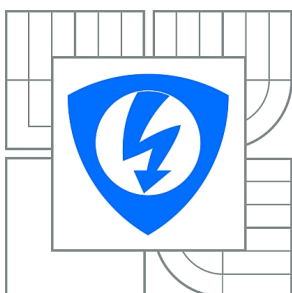


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

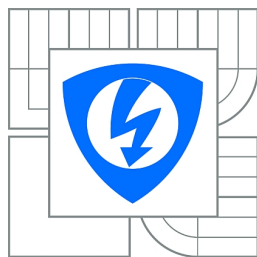
MARTIN MILOTA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV ČEJKA, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Martin Milota

ID: 98555

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Měření frekvence

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1/Seznamte se s metodami měření frekvence základní harmonické signálu, popsaného časovou řadou
- 2/Navrhněte SW prostředky pro ověření vybraných metod
- 3/SW řešení realizujte a porovnejte získané výsledky s vlastnostmi, udávané v literatuře nebo používané v komerčních SW
- 4/Zhodnoťte dosažené výsledky - zaměřte se na nejistoty měření

DOPORUČENÁ LITERATURA:

HOFFNER, Václav. Úvod do teorie signálů. Praha SNTL 1979

JAN, Jiří..Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálu. VUTIUM Brno 2002.

NOVÁK, M.Využití korelačních metod pro stanovení změn frekvence signálu. Automatizace, listopad 2008, č.11, str.702

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Čejka, CSc.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstract

Tématem mé bakalářské práce je ověření autokorelační metody pro stanovení změn frekvence a návrh dalších softwarových prostředků pro měření frekvence . V mé práci využívám mimo již zmíněné autokorelační metody, metodu Zero-crossing.

Výstupem je porovnání navrženého software s komerčně používaným a zhodnocení výsledků měření z hlediska nejistot.

Klíčová slova: Měření frekvence, Autokorelační metoda, Zero-crossing

Abstract

The topic of my dissertation is to verify the autocorrelation method for determining changes in frequency and other design software tools for measuring frequency. In my work I use outside the above-mentioned autocorrelation methods, Zero-crossing.

The output is compared with the commercially designed software used and evaluate the results in terms of measurement uncertainties.

Keywords: Frequency measurement, autocorrelation method, Zero-crossing

MILOTA, M. : Měření frekvence. Bakalářská práce FEKT VUT v Brně 2010. 63 s.,
4 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloslav Čejka, CSc.

Prohlášení

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

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **27. května 2010**

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: **27. května 2009**

.....
podpis autora

1. SEZNAM OBRÁZKŮ	8
2. SEZNAM TABULEK	9
3. ÚVOD	10
4. FREKVENCE A JEJÍ MĚŘENÍ	11
4.1 ANALOGOVÉ METODY MĚŘENÍ KMITOČTU	11
4.1.1 MĚŘENÍ KMITOČTU POMOCÍ SELEKTIVNÍCH OBVODŮ	11
4.1.2 MĚŘENÍ KMITOČTU POROVNÁVACÍMI METODAMI.....	12
4.1.3 MĚŘENÍ KMITOČTU S PŘÍMÍM ÚDAJEM.....	12
4.2 ČÍSLICOVÉ METODY MĚŘENÍ KMITOČTU	13
4.2.1 PŘÍMÉ ČÍSLICOVÉ MĚŘENÍ KMITOČTU	13
4.2.2 NEPŘÍMÉ ČÍSLICOVÉ MĚŘENÍ KMITOČTU	14
5. CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	14
5.1 CHYBY MĚŘENÍ	14
5.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ	15
5.2.1 POPIS NEJISTOT MĚŘENÍ.....	15
5.2.2 ZDROJE NEJISTOT	16
5.2.3 STANDARDNÍ NEJISTOTA u_A - PŘÍMÉ MĚŘENÍ JEDNÉ VELIČINY	16
5.2.4 STANDARDNÍ NEJISTOTA u_B - PŘÍMÉ MĚŘENÍ JEDNÉ VELIČINY	18
5.2.5 KOMBINOVANÁ STANDARDNÍ NEJISTOTA u_C - PŘÍMÉ MĚŘENÍ..	18
5.2.6 UDÁVÁNÍ NEJISTOT	19
6. AUTOKORELAČNÍ METODA.....	20
6.1 MATEMATICKÁ PODSTATA METODY.....	20
6.2 OVĚŘENÍ METODY	23
6.3 SIMULACE MĚŘENÍ.....	28
6.4 VÝSLEDKY SIMULACE.....	32
7. METODA ZERO-CROSSING	33
7.1 ČASOVÉ ŘADY	33
7.2 SIMULACE METODY	35
7.3 VÝSLEDKY SIMULACE.....	36
8. FÁZOVÝ ZÁVĚS (PLL)	40

8.1 ANALOGOVÝ FÁZOVÝ ZÁVĚS (PLL)	41
8.2 DIGITÁLNÍ FÁZOVÝ ZÁVĚS(DPLL)	42
8.3 SIMULACE MĚŘENÍ.....	42
8.4 VÝSLEDKY SIMULACE.....	44
9. KOMEREČNÍ METODY	45
9.1 EXTRACT SINGLE TONE	45
9.1.1 VÝSLEDKY SIMULACE	47
10. ZÁVĚR	50
11. POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	52
12. SEZNAM ZKRATEK	52
13. SEZNAM PŘÍLOH	53

1. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1 Měření frekvence pomocí selektivních obvodů.....	11
Obr. 4.2 Blokové schéma přímo ukazujícího měřiče kmitočtu.....	12
Obr. 4.3 Blokové schéma číslicového měřiče kmitočtu.....	13
Obr. 6.1 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -2000 Hz až 2000 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 4275$ Hz.....	24
Obr. 6.2 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -50 Hz až 50 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 4275$ Hz.....	24
Obr. 6.3 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -150 Hz až 150 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 275$ Hz.....	26
Obr. 6.4 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -50 Hz až 50 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 275$ Hz.....	26
Obr. 6.5 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -100 až 100 Hz pro φ v rozsahu -8 do 8° pro signál $f = 4275$ Hz.....	27
Obr. 6.6 Rozhodování o tom zda-li je frekvence neznámého signálu nižší nebo vyšší.....	28
Obr. 6.7 Zapojení pro simulaci v LabView pro čistě harmonické signály a signály se zkreslením.....	30
Obr. 6.8 Ovládací panel pro simulaci v LabView pro harmonický signál.....	30
Obr. 6.9 Ovládací panel pro simulaci v LabView pro zkreslený signál.....	31
Obr. 6.10 Zapojení pro simulaci v LabView pro signál s vyššími harmonickými...31	
Obr. 6.11 Ovládací panel pro simulaci v LabView pro signál s vyššími harmonickými.....	32
Obr. 7.1 Místa průchodu signálu nulou.....	33
Obr. 7.2 Zapojení pro získávání číselných řad z LabView pro signály harmonické a s zkreslením.....	34
Obr. 7.3 Zapojení pro získávání číselných řad z LabView pro signály s vyššími harmonickými.....	34
Obr. 8.1 Shodné signály.....	40
Obr. 8.2 Rozdílné signály.....	41

Obr. 8.3 Blokové schéma fázového závěsu.....	42
Obr. 8.4 Zapojení v LabView pro simulaci měření pomocí fázového závěsu.....	43
Obr. 8.5 Ovládací panel pro simulaci měření pomocí fázového závěsu – signály nejsou shodné.....	43
Obr. 8.6 Ovládací panel pro simulaci měření pomocí fázového závěsu – signály jsou shodné.....	44
Obr. 9.1 Zapojení v LabView pro měření signálu s vyššími harmonickými.....	45
Obr. 9.2 Ovládací panel pro měření signálu s vyššími harmonickými.....	46
Obr. 9.3 Zapojení v LabView pro měření signálu se zkreslením.....	46
Obr. 9.4 Ovládací panel pro měření signálu se zkreslením.....	47

2. SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1 Korekční koeficient.....	17
Tab. 7.1 Zero-crossing - 1. měření s vyššími harmonickými.....	36
Tab. 7.2 Zero-crossing - 2. měření s vyššími harmonickými.....	36
Tab. 7.3 Zero-crossing – nejistoty měření.....	37
Tab. 7.4 Zero-crossing - 1. měření se zkreslením.....	38
Tab. 7.5 Zero-crossing - 2. měření se zkreslením.....	38
Tab. 7.6 Zero-crossing – nejistoty měření.....	39
Tab. 9.1 EST - měření s vyššími harmonickými.....	47
Tab. 9.2 EST - 1. měření se zkreslením.....	48
Tab. 9.3 EST - 2. měření se zkreslením.....	48
Tab. 9.4 EST – nejistoty měření.....	49

3. ÚVOD

V mé bakalářské práci se zabývám problematikou měření frekvence základní harmonické složky signálu. Ověřil jsem autokorelační metodu pro stanovení změn frekvence signálu, jak pro harmonické signály, tak pro signály obsahující vyšší harmonické a signály ovlivněné zkreslením. A dále jsem se pokusil aplikovat jiné metody pro měření základních harmonických složek signálu jako je metoda sledování průchodu nulou nebo metodu fázového závěsu. Mnou navržená metoda průchodu nulou je schopná stanovit frekvenci jak harmonických signálů tak signálů s vyššími harmonickými. A metoda fázového závěsu stanovuje frekvenci pouze harmonických signálů. K realizaci výše popsaného jsem využil simulační software LabView a Matlab.

4. 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 své slunce s určitou periodou oběhu, až po akustické a elektromagnetické vlny, které kmitají s určitým kmitočtem. Doba trvání jednoho cyklu může dosahovat značně rozdílných hodnot, od 10^{-27} s

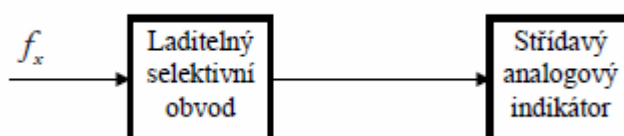
pro elektromagnetická pole spojená s kosmickým gamma zářením až po stovky let rotace galaxií ve vesmíru. Jednotkou frekvence je hertz [Hz], pojmenovaná po Heinrichu Hertzovi, který zkoumal povahu elektromagnetického záření. Převrácenou hodnotou frekvence je perioda, udávající časový interval trvání jednoho 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 a technice.

4.1 ANALOGOVÉ METODY MĚŘENÍ KMITOČTU

Analogové metody měření kmitočtu lze rozdělit do následujících skupin.

- využívající selektivní LC nebo RC obvody
- porovnávací metody
- metody s přímým údajem

4.1.1 MĚŘENÍ KMITOČTU POMOCÍ SELEKTIVNÍCH OBVODŮ



Obr. 4.1 Měření frekvence pomocí selektivních obvodů

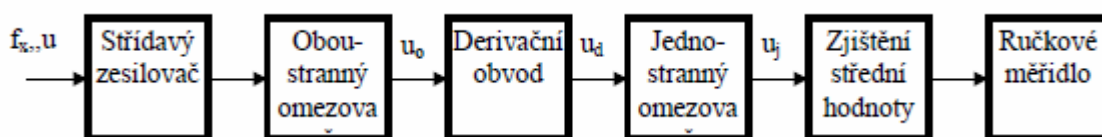
Princip těchto měření je znázorněn na Obr. 4.1. Vstupní napětí o měřené frekvenci f_x je přivedeno na selektivní obvod. Výstup z tohoto obvodu je přiváděn na střídavý analogový indikátor, což je střídavý voltmetr s potřebnou citlivostí. Selektivní obvod má charakter buď frekvenční zadržky, např. Wienův most (mostová metoda), nebo dvojité T-články, či přemostěné T-články. Zadržovaná frekvence je nastavitelná. Hodnota frekvence je určena parametry (RC členy) zadržky. Nevýhodou je naladění obvodu pouze na jeden kmitočet, případný signál obsahující vyšší harmonické znemožní přesné vyvážení. Tyto obvody se používají jen zřídka.

4.1.2 MĚŘENÍ KMITOČTU POROVNÁVACÍMI METODAMI

Tyto metody pro svou činnost vyžadují existenci známého harmonického signálu se známým kmitočtem f_n . Porovnávají pak měřený signál o kmitočtu f_x s známým kmitočtem f_n . Porovnání se děje buď směřováním obou signálů (záznějová metoda) nebo pomocí osciloskopu. Přesnost metody je značná, dána přesností kmitočtu f_n . Je použitelná v širokém spektru kmitočtů. I když se jednalo o analogové přístroje, bylo s nimi dosahováno značné přesnosti a citlivosti (řádově 10^{-4}). Dnes se již tato metoda používá výjimečně.

4.1.3 MĚŘENÍ KMITOČTU S PŘÍMÝM ÚDAJEM

Předchozí metody neumožňovali přímý odečet kmitočtu. Přístroj na kterém můžeme přímo odečítat se nazývá měřič kmitočtu s přímým údajem, jehož blokové schéma je uvedeno na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Blokové schéma přímo ukazujícího měřiče kmitočtu

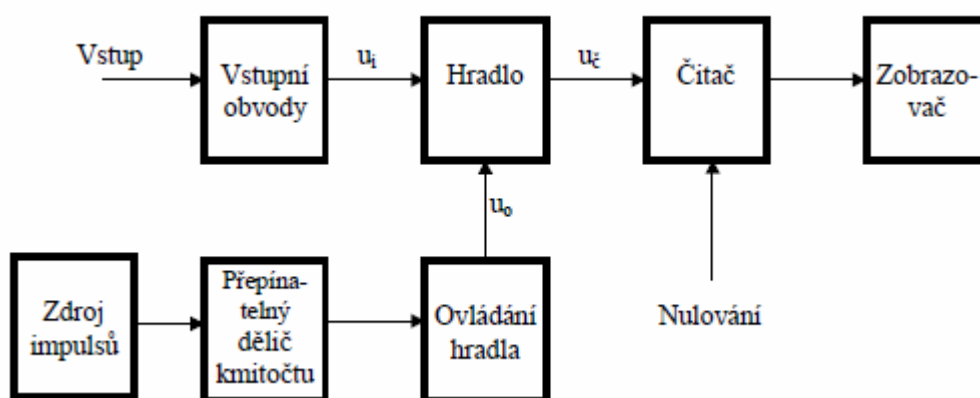
4.2 ČÍSLICOVÉ METODY MĚŘENÍ KMITOČTU

I když má číslicové měření řadu výhod, může někdy vést, zvláště u zkreslených signálů ke zcela chybným výsledkům.

Číslicové metody měření kmitočtu lze rozdělit do následujících skupin.

- přímé číslicové měření kmitočtu
- nepřímé číslicové měření kmitočtu

4.2.1 PŘÍMÉ ČÍSLICOVÉ MĚŘENÍ KMITOČTU



Obr. 4.3 Blokové schéma číslicového měřiče kmitočtu

Přímé číslicové měření vychází z toho, že frekvence je převrácená hodnota periody. Čítáním se určuje počet period měřeného signálu N , za určitý časový interval T . Pro $N \gg 1$ platí

$$f_x = \frac{N}{T} \quad (3.1)$$

U jednodušších přístrojů je hodnota T celistvý násobek (podíl) $1s$ a dělení se řeší jen posunem desetinné tečky na zobrazovači, u přístrojů složitějších lze hodnotu

T spojitě měnit a přístroj poté realizuje dělení. Je nutno si uvědomit, že tyto přístroje udávají průměrnou frekvenci vstupního signálu za dobu T.

4.2.2 NEPŘÍMÉ ČÍSLICOVÉ MĚŘENÍ KMITOČTU

Tyto metody mají za cíl odstranit nevýhody přímého číslicového měření kmitočtu. Při měření nízkých kmitočtů je vhodné místo měření frekvence měřit periodu signálu a poté přepočtem převést na frekvenci.

5. CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ

5.1 CHYBY MĚŘENÍ

Chyby měření, určují přesnost měření, která je hlavním kritériem pro posouzení kvality takového měření. Vyjadřuje míru blízkosti naměřené hodnoty k hodnotě skutečné. A kvantitativně je vyjádřena chybou měření.

Absolutní chyba

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

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 měřicí metody.

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

5.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ

5.2.1 POPIS NEJISTOT MĚŘENÍ

Nejistoty měření stanovujeme při vyhodnocování měření ve výzkumu a technické praxi při:

1. experimentálním ověřování fyzikálních zákonů a určování hodnot fyzikálních konstant
2. definičních měření, 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 měřeních 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 mohou odchylovat od hodnoty skutečné, resp. pravděpodobnost, s jakou se v intervalu stanovenou nejistotou může nacházet hodnota skutečná.

5.2.2 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 měřicího signálu. Velmi výrazně se také projevují rušivé vlivy prostředí. Níže je uveden výpis nejistot které působí v následujících měřeních:

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

5.2.3 STANDARDNÍ NEJISTOTA u_A - PŘÍMÉ MĚŘENÍ JEDNÉ VELIČINY

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 vztah

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

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

9	8	7	6	5	4	3	2
1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

Tab. 5.1 Korekční koeficient

5.2.4 STANDARDNÍ NEJISTOTA u_B - PŘÍMÉ MĚŘENÍ JEDNÉ VELIČINY

Postup pro zjištění standardní nejistoty typu B:

Vytipují se možné zdroje nejistot Z_j : jimiž mohou být např. nedokonalé měřicí přístroje, použité měřicí metody, nepřesné hodnoty konstant, způsob vyhodnocování a někdy i malé zkušenosti pracovníků v laboratoři. Následně odhadneme rozsah odchylek $\pm \Delta Z_{\max}$ od jmenovité hodnoty tak, aby jeho překročení bylo málo pravděpodobné. Dále se odhadne, jakému rozdělení pravděpodobnosti odpovídají odchylky ΔZ v intervalu $\pm \Delta Z_{\max}$ a určí nejistoty u_z ze vztahu $u_z = \Delta Z_{\max} / m$. Hodnota m závisí na druhu rozdělení:

- pro normální rozdělení $m = 2$
- pro rovnoměrné rozdělení $m = 1,73$
- pro trojúhelníkové rozdělení $m = 2,45$

Výsledná standardní nejistota typu B se vypočítá ze vztahu

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m U_{z_j}^2} \quad (5.8)$$

5.2.5 KOMBINOVANÁ STANDARDNÍ NEJISTOTA u_C - PŘÍMÉ MĚŘENÍ

Tato nejistota se určí ze vztahu

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} \quad (5.9)$$

5.2.6 UDÁVÁNÍ NEJISTOT

Údaje o nejistotách musí obsahovat formulace a zápis výsledných hodnot, způsobu výpočtu a nutné informace o pramenech.

Výpočet nejistot je neoddělitelnou částí zpracování výsledků měření. Nejistoty musí být specifikovány. Pokud chceme udávat rozšířené nejistoty musíme uvést použitý koeficient rozšíření (k), popř. odpovídající konfidenční pravděpodobnost. Lze udávat jak absolutní, tak i relativní nejistoty, popř. oboje. Hodnoty nejistot se zásadně zaokrouhlují na dvě platná místa a to přednostně nahoru.

Je třeba také uvádět odkazy na použité normativní dokumenty. Některé tyto dokumenty přímo předepisují náležitosti a formulace při udávání výsledků měření včetně nejistot.

Do certifikátů o kalibraci se uvádí výsledek měření s rozšířenou nejistotou ve formě $(y \pm U)$ s následujícím dodatkem: „Uvedená nejistota představuje dvě směrodatné odchylky. Směrodatná odchylka byla vypočtena z nejistoty měřicího etalonu, kalibračních metod, vnějších vlivů, krátkodobého vlivu kalibrovaného objektu“

6. AUTOKORELAČNÍ METODA

Metoda pracuje s nerovnoměrností veličin a odchylek od ustálených stavů těchto veličin.

6.1 MATEMATICKÁ PODSTATA METODY

Máme dva harmonické signály $x(t)$ a $y(t)$. Signál $x(t)$ má svoji základní frekvenci f a signál $y(t)$ má svoji základní svoji základní frekvenci $f + \Delta f$, tedy má frekvenci stejnou jako signál $x(t)$, pouze posunutou o Δf a fázový posun ϕ . Oba signály jsou tedy popsány vztahy

$$\begin{aligned}x(t) &= \sin(2\pi f t) \\ y(t) &= \sin(2\pi(f + \Delta f)t + \phi)\end{aligned}\tag{6.1}$$

Pro další řešení budeme využívat vzájemného korelačního koeficientu (resp. vzájemné korelační funkce) mezi signály $x(t)$ a $y(t)$ a nezávislosti frekvenčního posunu Δf signálu $y(t)$ a vůči signálu $x(t)$. Fázový posun signálu $x(t)$ budeme uvažovat nulový. Potom je korelační koeficient definován jako

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y}\tag{6.2}$$

kde $\text{cov}(x,y)$ je kovariace signálů $x(t)$ a $y(t)$, tj. střední hodnota součinu obou signálů a odečtením jejich středních hodnot

$$\text{cov}(x,y) = E((x - E x)(y - E y))\tag{6.3}$$

a jsou směrodatné odchylky definované podle vztahů

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{x(t) - \mu_x\}^2 dt}\tag{6.4}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{y(t) - \mu_y\}^2 dt} \quad (6.5)$$

kde μ_x, μ_y jsou střední hodnoty signálů, tedy

$$\mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi f t) dt = 0 \quad (6.6)$$

Toto odpovídá tvrzení, říkájící, že střední hodnota harmonického signálu počítaná přes dobu jeho periody se rovná nule. Hodnota směrodatné odchylky harmonické ho signálu je tedy popsána

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{x(t) - \mu_x\}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{\sin(2\pi f t) - 0\}^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (6.7)$$

Střední hodnota signálu $y(t)$ vede ke složitějšímu výpočtu, neboť střední hodnota je počítána přes původní délku periody T , odpovídající původní frekvenci f , ale signál $y(t)$ má frekvenci změněnou o Δf , tedy $f + \Delta f$

$$\begin{aligned} \mu_y &= \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi(f + \Delta f)t + \phi) dt = \\ &= \frac{-\cos(\phi) \cos(\pi \Delta f T)^2 + \cos(\phi) + \sin(\phi) \sin(\pi \Delta f T) \cos(\pi \Delta f T)}{\pi(1 + \Delta f T)} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Platnost tohoto výpočtu můžeme ověřit dosazením $\Delta f = \phi = 0$, dostáváme $\mu_x = 0$
Dále počítáme směrodatnou odchylku

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{y(t) - \mu_y\}^2 dt} = \sqrt{\frac{B}{16\pi^2(1 + 2\Delta f T + \Delta f^2 T^2)}} \quad (6.9)$$

Kde

$$B = -2\pi \sin(4\pi \Delta f T + 2\phi) + 4\cos(2\pi \Delta f T + 2\phi) + 8T^2 \Delta f^2 \pi^2 + 2\pi \sin(2\phi) + 8\pi^2 + \\ + 2T\pi \Delta f \sin(2\phi) - 2\cos(2\phi) - 2T\Delta f \pi \sin(4\pi \Delta f T + 2\phi) + 16T\pi^2 \Delta f - 2\cos(4\pi \Delta f T + 2\phi) - \\ - 4\cos(2\pi \Delta f T) - 4 \quad (6.10)$$

Ověření provedeme opět dosazením $\Delta f = \phi = 0$ a dostáváme

$$\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{2}} = \sigma_y \quad (6.11)$$

Tímto jsme ověřili, že směrodatná odchylka je pro oba signály, jak $x(t)$ tak $y(t)$ stejná, pokud je $\Delta f = \phi = 0$.

Kovariance signálů $x(t)$ a $y(t)$ je pak dána jako

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \mu_x) \cdot (y(t) - \mu_y) dt = \frac{\sin(2\pi \Delta f T) - \sin(\Delta \phi)}{4\pi \Delta f T + 2\pi \Delta f^2 T^2} \quad (6.12)$$

V případě, že oba signály mají shodnou frekvenci f , tedy Δf u signálu $y(t)$ je roven nule a jeho fázový posun $\Delta \phi$ je také roven nule, tedy oba signály si odpovídají, pak hodnota korelačního koeficientu je rovna 1 a kovariance je rovna $\frac{1}{2}$, tedy

$$\text{cov}(x, y) = 1/2 \quad (6.13)$$

Hledaný korelační koeficient tedy vypadá takto

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\frac{\sin(2\pi \Delta f T) - \sin(\phi)}{4\pi \Delta f T + 2\pi \Delta f^2 T^2}}{\sigma_x \frac{1}{\sqrt{2}}} \quad (6.14)$$

Po úpravě tedy dostaneme

$$\rho_{x,y} = \frac{2(\sin(2\pi\Delta f T + \phi) - \sin(\phi))(1 + \Delta f T)}{T\Delta f (2 + \Delta f T)\sqrt{A}} \quad (6.15)$$

Kde

$$A = 8\Delta f T \pi^2 + T\Delta f \pi \sin(2\phi) + 2\cos(2\pi\Delta f T) - \cos(2\phi) - T\Delta f \pi \sin(4\pi\Delta f T + 2\phi) - \cos(4\pi\Delta f T + 2\phi) - \pi \sin(4\pi\Delta f T + 2\phi) - 2 + 4T^2 \Delta f^2 \pi^2 + 4\pi^2 + \pi \sin(2\phi) + 2\cos(2\pi\Delta f T + 2\phi) \quad (6.16)$$

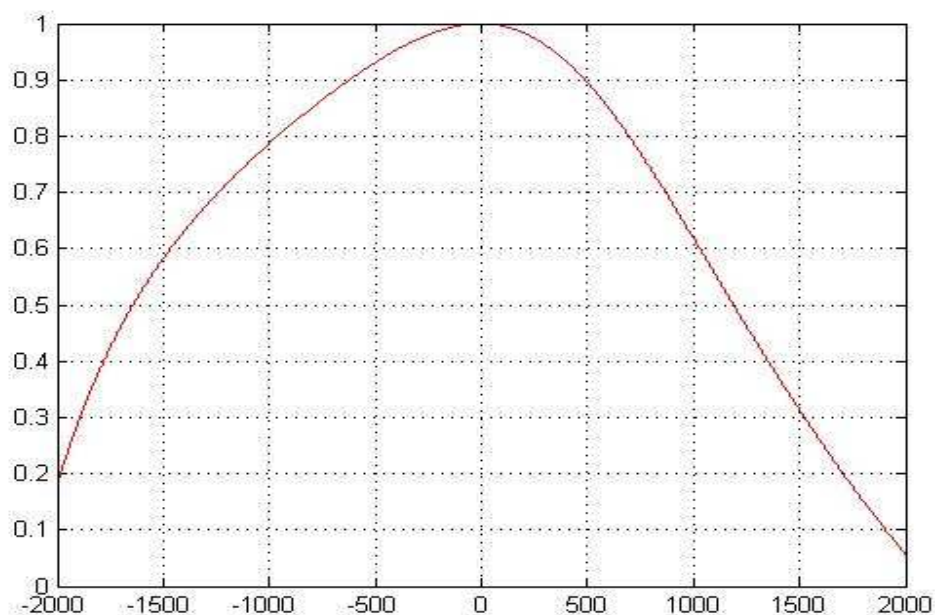
Ověření opět provedeme výpočtem pro $\phi = 0$, $\Delta f \rightarrow 0$, potom

$$\rho_{x,y} \rightarrow 1$$

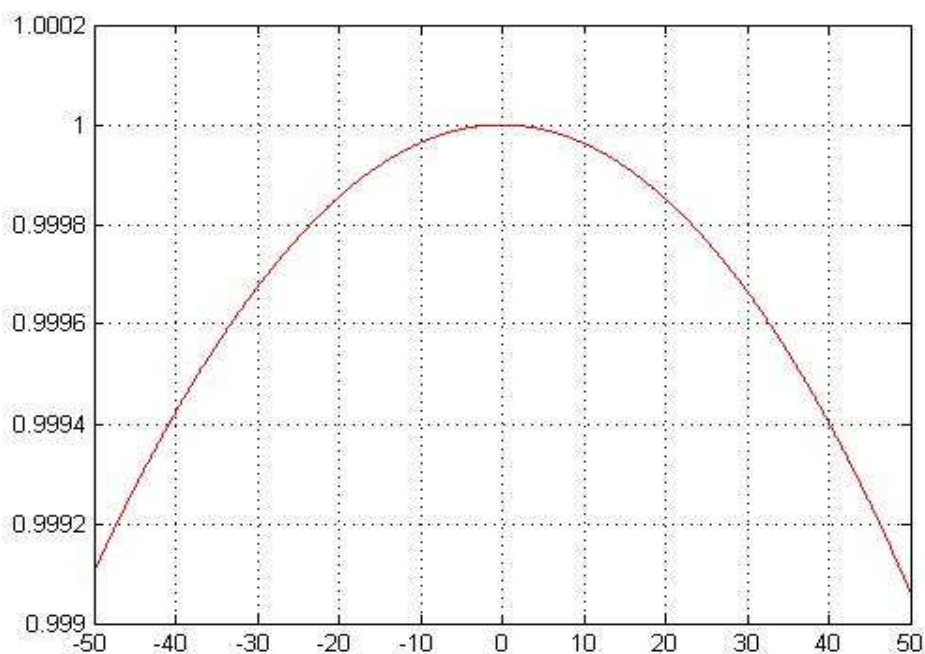
Výsledek odpovídá předpokladu, že pokud mají oba signály shodnou frekvenci a fázový posun, tak je korelační koeficient roven 1.

6.2 OVĚŘENÍ METODY

Matematické ověření jsem provedl pomocí matematického softwaru Matlab. Zavedl jsem si signál $x(t)$ o frekvenci $f = 4275$ Hz a poté jsem měnil velikost Δf signálu $y(t)$ a to v rozmezí od -2000 Hz do hodnoty 2000 Hz. Jelikož využití této metody je převážně určeno pro stanovení malých změn frekvence provedl jsem tutéž simulaci pro hodnoty Δf v rozmezí od -50 Hz do 50 Hz. Oba výpočty probíhaly za předpokladu $\phi = 0$. Získané grafické závislosti jsou zobrazeny níže. Výpočetní skript pro získání následujících grafických závislostí jsou uvedeny jako příloha č.1.

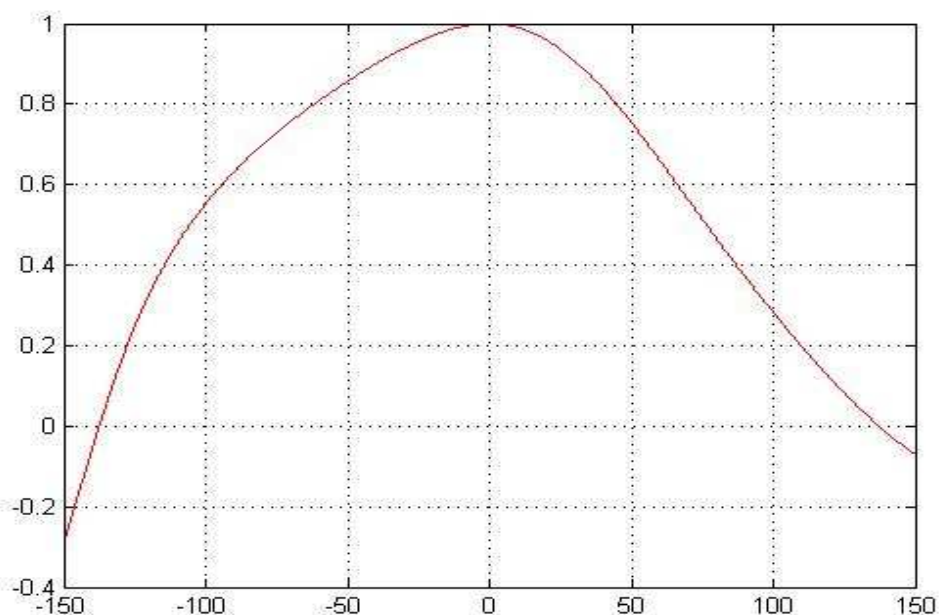


Obr. 6.1 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -2000 Hz až 2000 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 4275$ Hz

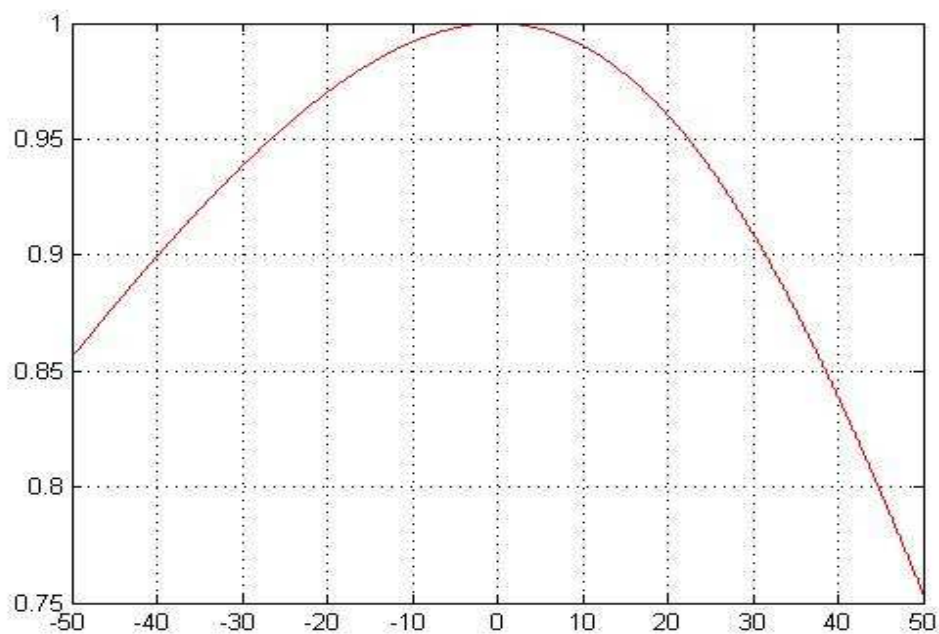


Obr. 6.2 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -50 Hz až 50 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 4275$ Hz

Máme zavedený signál o frekvenci $f=4750\text{Hz}$. Pokud porovnáme obě závislosti, jak pro Δf v rozmezí -2000 až 2000 Hz na Obr. 6.1 , tak pro Δf v rozmezí -50 až 50 Hz na Obr. 6.2 , vidíme, že v prvním případě, pokud je změna vůči signálu znatelná, hodnota koeficientu P_{xy} výrazně mění svoji hodnotu. Naopak pro malé změny signálu jsou tyto změny méně výrazné a hodnota koeficientu P_{xy} mění svoji velikost v řádu tisícín. Proto jsem provedl druhou simulaci tentokrát se signálem o nižší frekvenci, a to o frekvenci $f=275\text{Hz}$ a prováděl změnu frekvence Δf v prvním případě zobrazeném na Obr 6.3 v rozsahu -150 Hz až 150 Hz a v případě druhém zobrazeném na Obr 6.4 v rozsahu -50 Hz až 50 Hz. Opět vidíme značnou změnu hodnotu koeficientu P_{xy} pro signál $f = 275$ Hz, kde probíhá změna Δf v rozsahu -150 Hz až 150 Hz. Na Obr 6.4 pro změnu v rozsahu -50 Hz až 50 Hz není tato změna P_{xy} tak znatelná. Můžeme říci čím více se blížíme ke správné hodnotě frekvence, tím jsou změny v hodnotě korelačního koeficientu P_{xy} menší. Díky tomu lze konstatovat že nalezení správného signálu je tm přesnější na čím více desetinných míst máme tento korelační koeficient zobrazen.

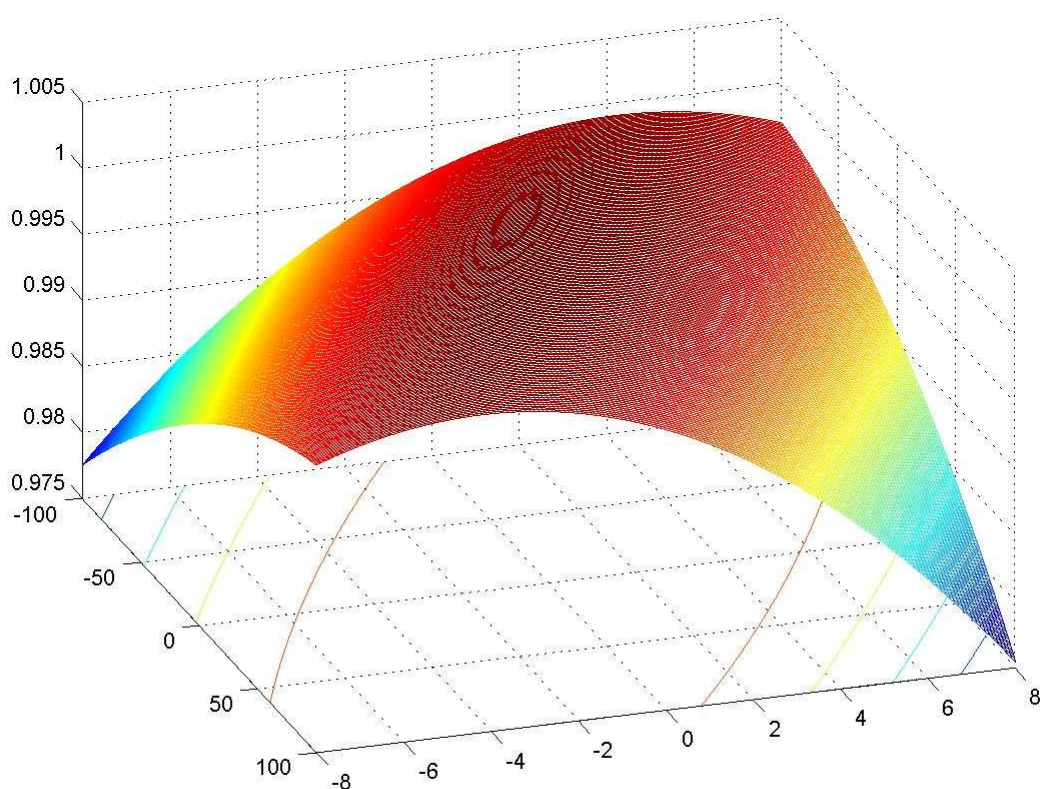


Obr. 6.3 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -150 Hz až 150 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 275$ Hz



Obr. 6.4 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -50 Hz až 50 Hz pro $\varphi = 0$ pro signál $f = 275$ Hz

Dále jsem chtěl zobrazit i závislost na změně ϕ . Proto jsem si zavedl signál o frekvenci $f = 4275$ a následně jsem měnil Δf signálu $y(t)$ a to v rozsahu od -100 po 100 Hz a zároveň docházelo k změně fázového posunu v rozsahu od -8 do 8 °. Výpočet probíhal podle skriptu, který je uveden jako příloha č.2.

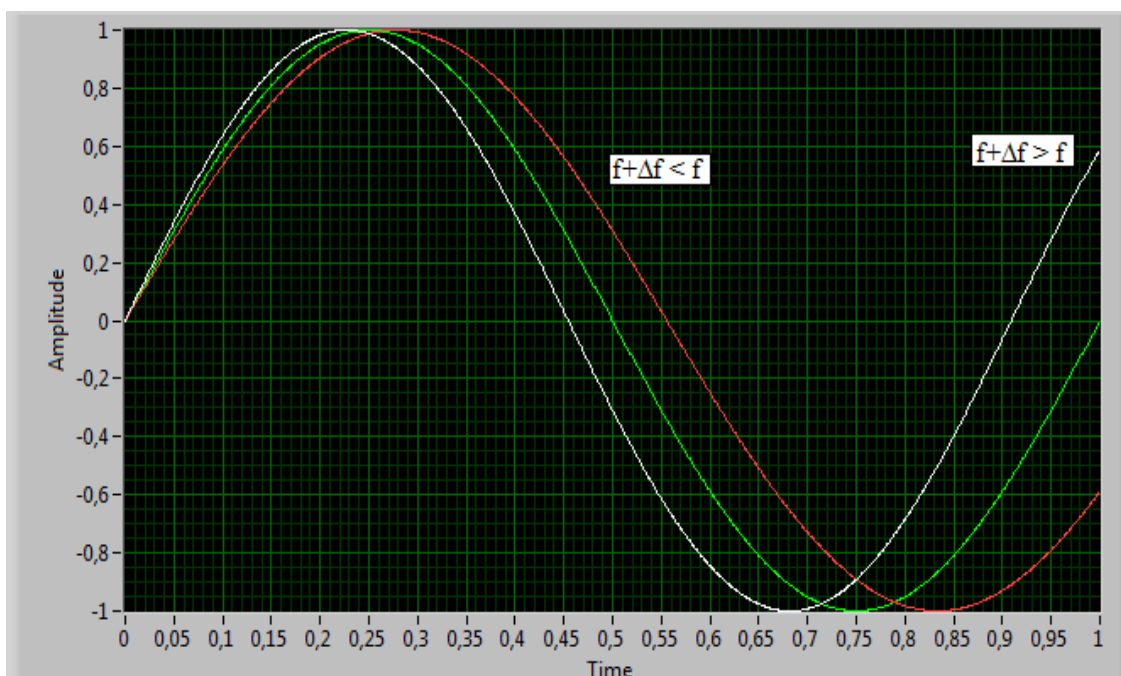


Obr. 6.5 Závislost korelačního koeficientu na změně frekvence v rozsahu -100 až 100 Hz pro ϕ v rozsahu -8 do 8 ° pro signál $f = 4275$ Hz

Na Obr. 6.5 vidíme závislost koeficientu P_{xy} na hodnotě Δf a ϕ . Vidíme že hodnota koeficientu P_{xy} se mění po malých číselných hodnotách, proto červená oblast zabírá značnou část grafu. A konečné přiblížení k hodnotě 1 koeficientu P_{xy} je ovlivňována jak změnou Δf tak i změnou ϕ .

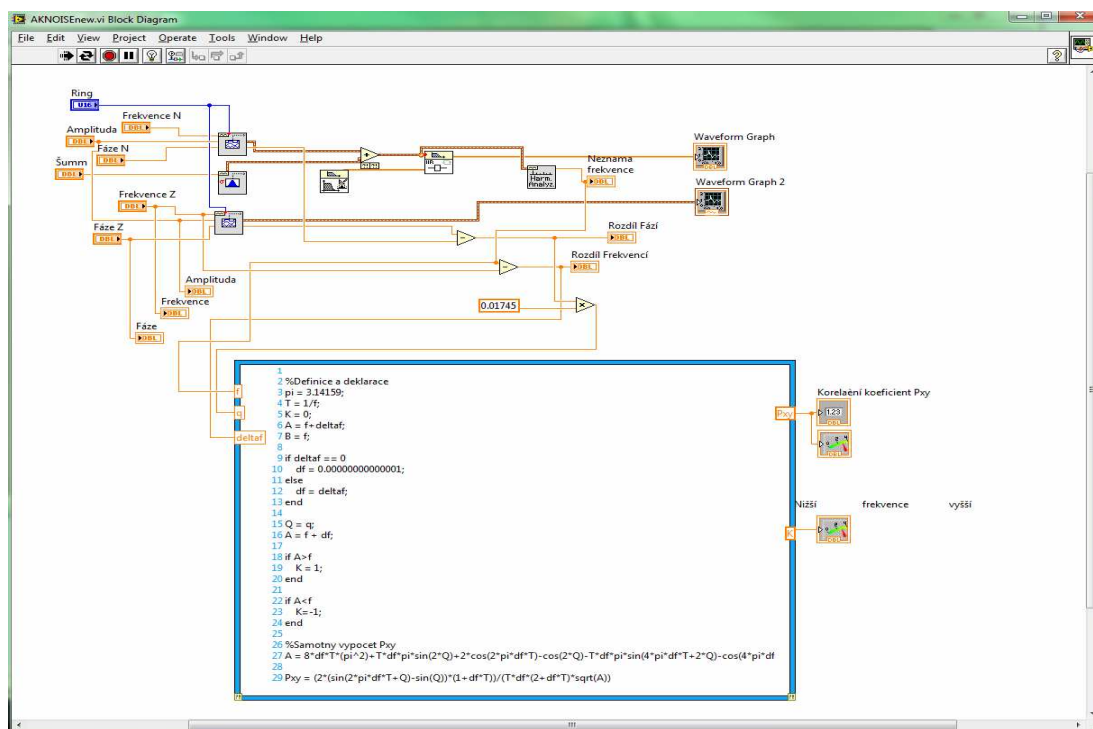
6.3 SIMULACE MĚŘENÍ

Samotnou simulaci měření jsem provedl pomocí softwaru LabView. V tomto programu jsem si vytvořil ovládací panel, na kterém můžu navolit parametry neznámého signálu včetně zkreslení a vyšších harmonických. Poté můžu začít nastavovat a měnit parametry signálu známého a pomocí hodnoty korelačního koeficientu, pokud má vzrůstající tendenci vidím že se přibližují hledanému signálu, pokud naopak hodnota korelačního koeficientu klesá, je patrné že se hledanému signálu vzdalují. Pro zjištění zda frekvence mnou nastavovaného signálu je nižší nebo vyšší než signál hledaný jsem umístil na tento panel indikátor pracující následovně. Protože je korelační koeficient počítán pouze přes jednu periodu analyzovaného signálu, je možné říci, že pokud je frekvence hledaného signálu $f + \Delta f$ vyšší než frekvence referenčního signálu f , bude při průchodu nulou znaménko signálu $f + \Delta f$ kladné, naopak tomu pokud je frekvence hledaného signálu $f + \Delta f$ nižší vůči signálu f bude toto znaménko záporné. Názorně je toto ilustrováno na Obr. 6.6.

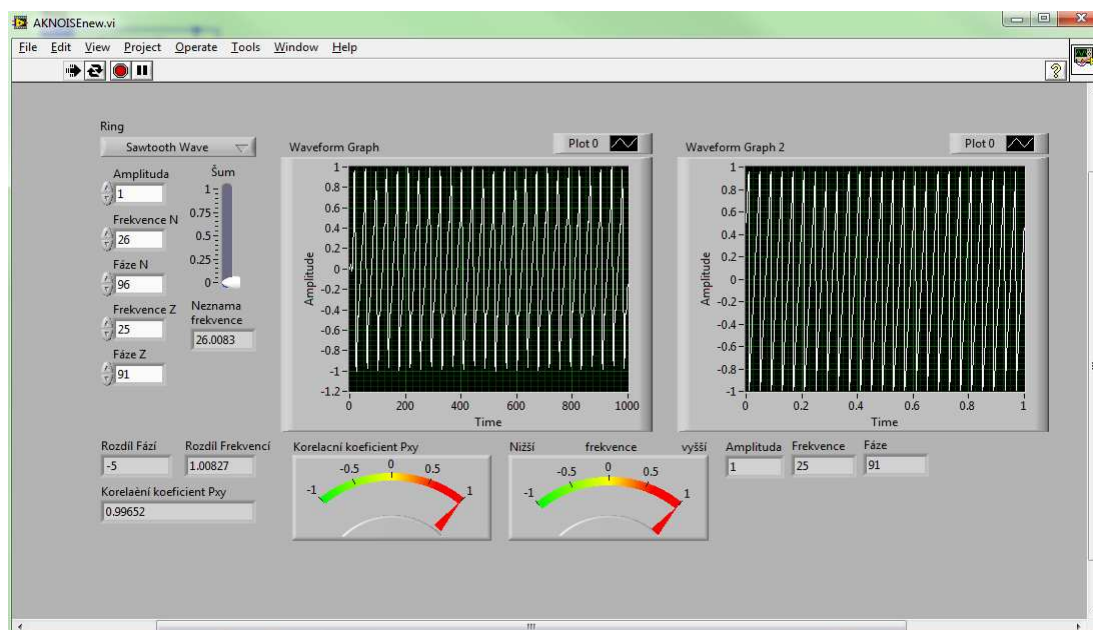


Obr. 6.6 Rozhodování o tom zda-li je frekvence neznámého signálu nižší
nebo vyšší

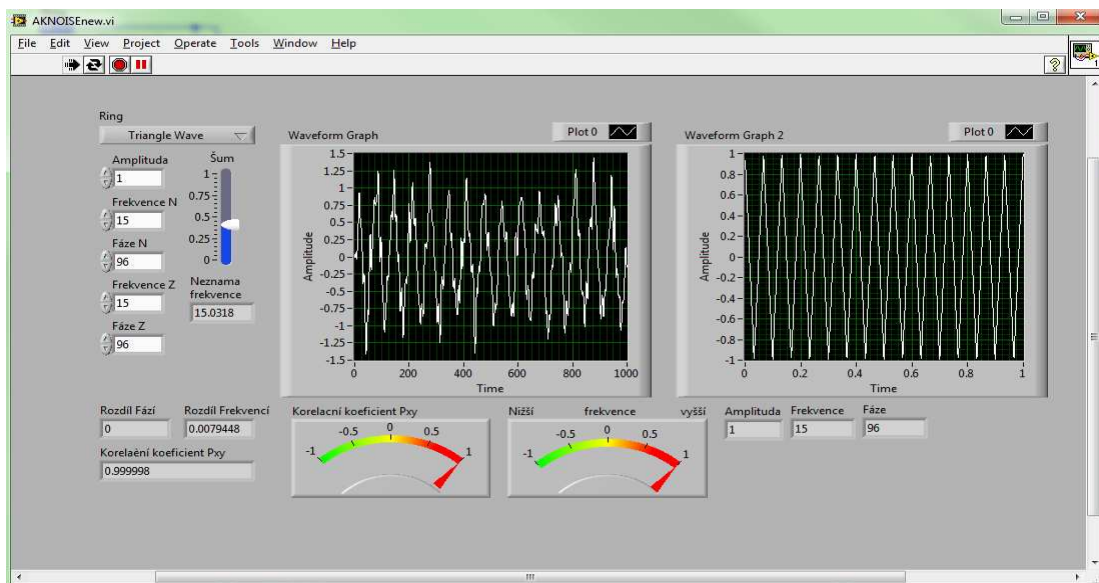
Simulace probíhá podle zapojení na Obr. 6.7 a na Obr. 6.10 Máme zde neznámý signál $y(t)$ nastavený na určitou frekvenci a s určitým fázovým posuvem. Dále zde máme signál $x(t)$, pro nás známý, jehož parametry můžeme měnit. Sledujeme hodnotu fázového posuvu na výstupu obou signálů a počítáme jejich rozdíl, tedy φ . Tuto hodnotu zavádíme do bloku MathSkript, dále do tohoto bloku zavádíme hodnotu f nám známého signálu $x(t)$ a hodnotu Δf . Samotný výpočet korelačního koeficientu je vypočítáván v bloku MathSkript, což je v podstatě skript pro Matlab. Tato kombinace mi přišla jako velice výhodná, jelikož pomocí Matlabu lze velice snad realizovat výpočty, které by pouze s pomocí LabView byla velice komplikované. V tomto skriptu je tedy realizován samotný výpočet koeficientu P_{xy} , dále je zde prováděn výpočet pro indikátor ukazující, zda-li je hledaná frekvence nižší nebo vyšší než námi nastavovaný signál. Výstupem z tohoto skriptu je tedy již zmíněný indikátor a dále je výstupem přímo hodnota koeficientu P_{xy} , tedy korelačního koeficientu. Vše je zobrazováno na ovládacím panelu, zobrazeném na obr. 9. Na tomto panelu máme možnost nastavovat oba signály, dále je zde umístěn grafické ukazatele průběhu obou signálů, vidíme zde i ukazatel hodnoty koeficientu P_{xy} . Dojde zde i k vypsání parametrů signálu, amplitudy, frekvence a fáze. Vytvořil jsem dvě varianty, jedna pracuje pro signály čistě harmonické a pro signály se zkreslením, tato varianta je na Obr. 6.8 a Obr. 6.9 a na Obr. 6.11 je varianta pro signály s vyššími harmonickými. V obou variantách je možné volit zda chceme signál sinusový, obdélníkový, pilový nebo trojúhelníkový.



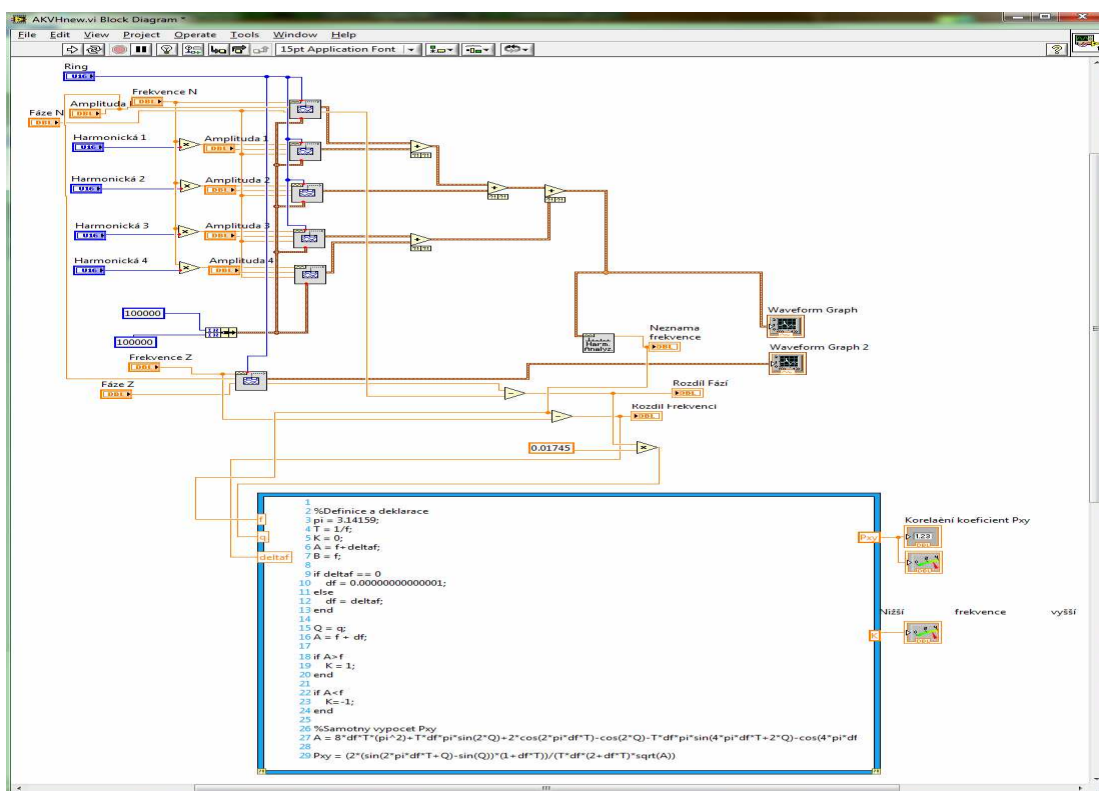
Obr. 6.7 Zapojení pro simulaci v LabView pro čistě harmonické signály a signály se zkreslením



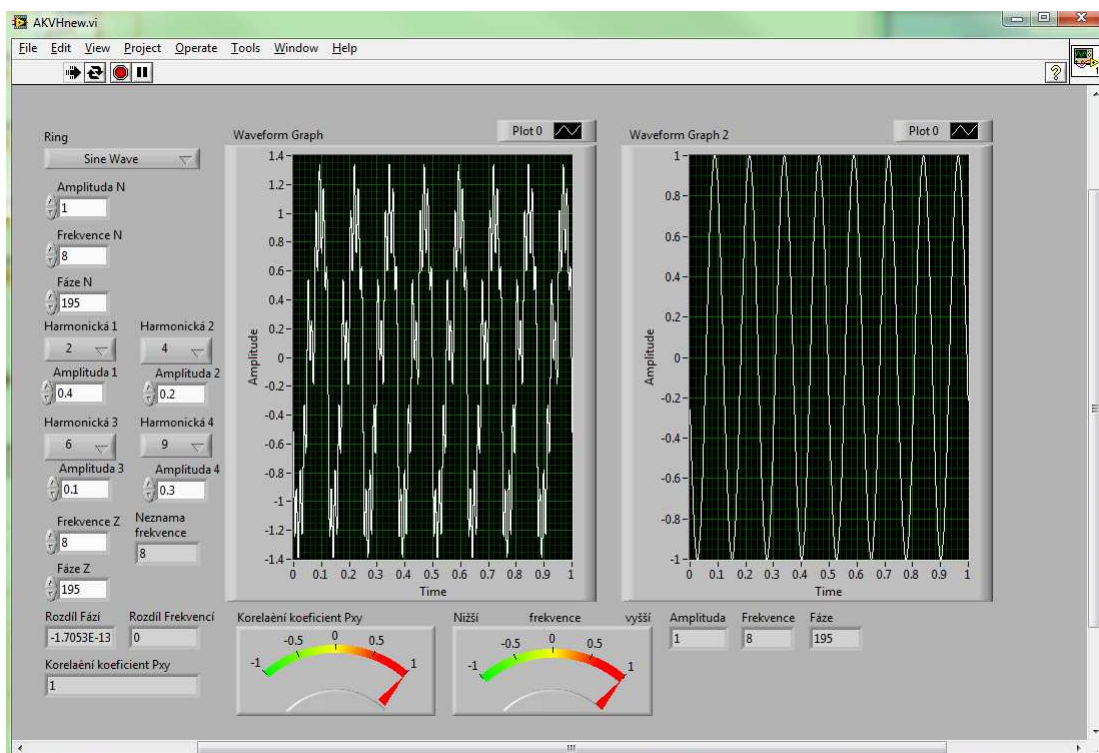
Obr. 6.8 Ovládací panel pro simulaci v LabView pro harmonický signál



Obr. 6.9 Ovládací panel pro simulaci v LabView pro zkreslený signál signál



Obr. 6.10 Zapojení pro simulaci v LabView pro signál s vyššími harmonickými



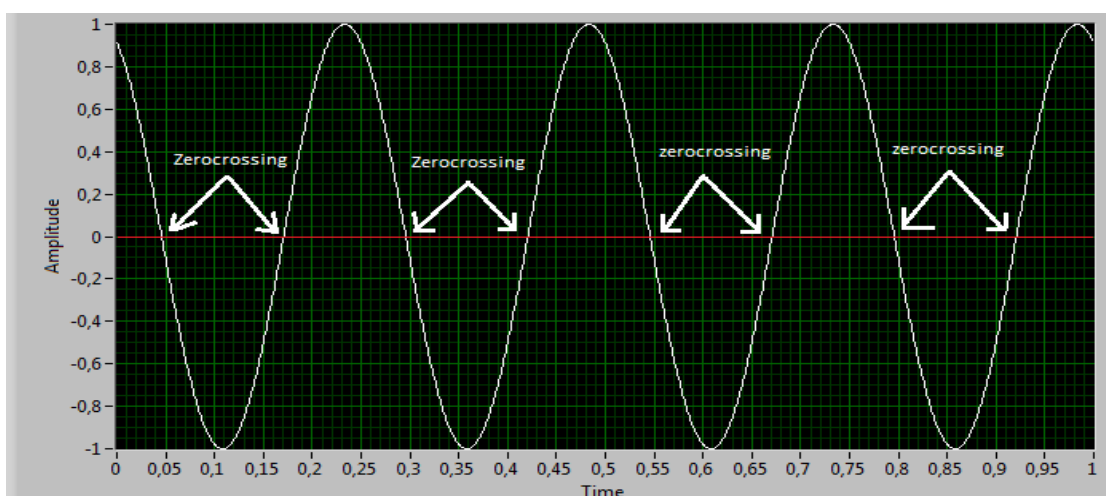
Obr. 6.11 Ovládací panel pro simulaci v LabView pro signál s vyššími harmonickými

6.4 VÝSLEDKY SIMULACE

Můžeme říct, že přesnost této metody je dána přesností zobrazení korelačního koeficientu. V našem případě je tato přesnost dána sedmi desetinnými místy umožňující sledovat změny korelačního koeficientu způsobené změnou fáze o jeden stupeň stejně jako změna frekvence o jednotky Hz. Snížením této zobrazovací přesnosti nezaznamenané malé změny jak frekvence tak fáze. Tuto metodu jsem vyzkoušel pro kmitočty v rozsahu 10 – 1000 Hz a změnu fáze v celém jejím rozsahu a ve všech případech došlo k přesnému vyladění kmitočtu na stejné parametry jakých dosahuje signál neznámý.

7. METODA ZERO-CROSSING

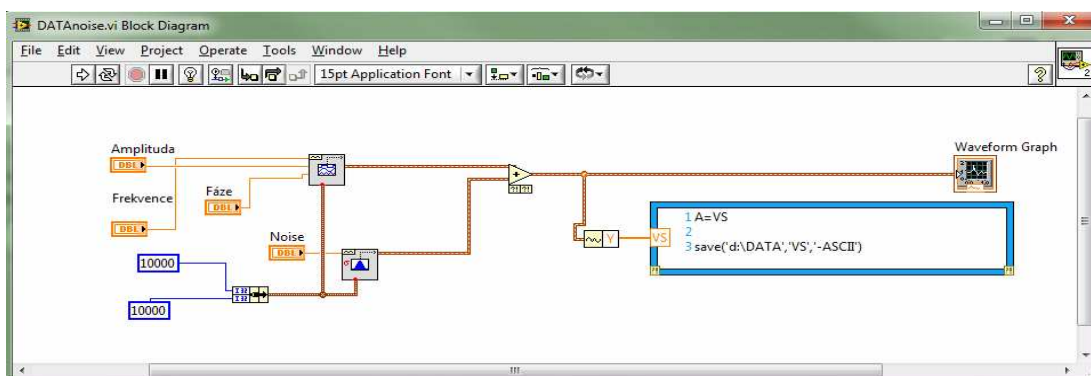
Metoda Zero-crossing (průchod nulou) je běžně používaná metoda v elektronice, matematice a zpracování obrazu. Metodou Zero-crossing hledáme místo, kde funkce mění znaménko (mapř. z pozitivní na negativní), překračuje osu x v grafu funkce. Jako je znázorněno na Obr. 7.1.



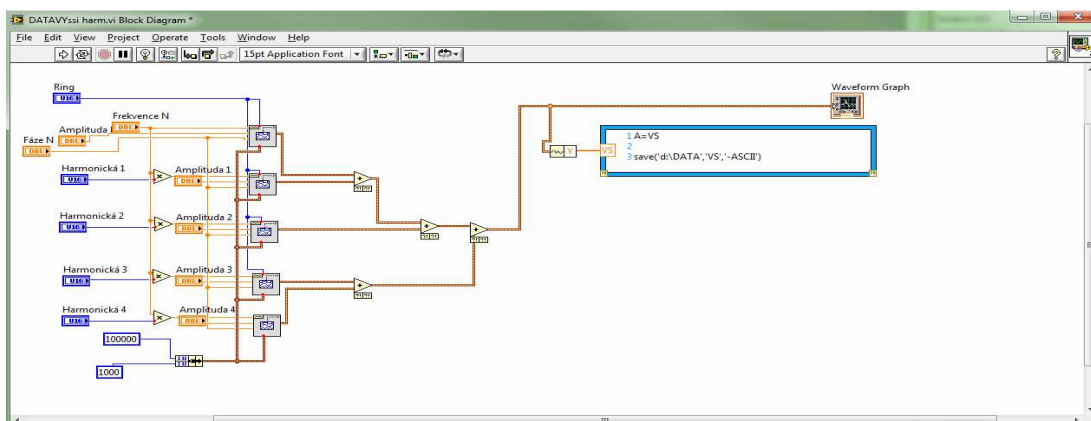
Obr. 7.1 Místa průchodu signálu nulou

7.1 ČASOVÉ ŘADY

Jelikož jsem pro simulaci této metody využíval program MATLAB, do kterého jsem dosazoval časové řady definující jednotlivé signály, bylo nutné tyto časové řady získat. K tomu jsem opět využil program LabView, ve kterém jsem generoval jednotlivé signály. Generoval jsem signály sinusové, obdélníkové, trojúhelníkové a pilové, tyto signály mohou dále obsahovat vyšší harmonické frekvence, nebo mohou být zkresleny. Na obrázku Obr. 7.2 je znázorněno zapojení pro získávání časových řad harmonických signálů a signálu se zkreslením a na obrázku Obr. 7.3 je znázorněno zapojení pro získávání časových řad s vyššími harmonickými.



Obr. 7.2 Zapojení pro získávání číselných řad z LabView pro signály harmonické a s zkršením



Obr. 7.3 Zapojení pro získávání číselných řad z LabView pro signály s vyššími harmonickými

7.2 SIMULACE METODY

Získané časové řady z programu Labview jsem poté v programu Matlab analyzoval podle následujících skriptů v příloze č.3. pro signály harmonické a signály obsahující vyšší harmonické a v příloze č.4. pro signály zkreslené.

Obě varianty programu pracuji velice podobně. Zadáme vektor U jakožto nevzorkovaný signál. Tento signál je zpracován do matice SI , se kterým probíhá přímo vyhledávání průchodů nulou. Nastavíme periodu vzorkování do proměnné N . Samotné vyhledávání průběhu nulou je následující, vždy porovnávám po sobě jdoucí vzorky signálu a zjišťuji zda došlo ke změně znaménka mezi těmito vzorky, pokud ano, tak dojde k zaznamenání indexu tohoto vzorku, jako začátek jedné periody, a hledám další průchody. Po dalších dvou průchodech nulou zaznamenám index vzorku udávající konec této jedné periody a zároveň začátek další periody. Při každém průchodu je navýšena proměnná $Pruchod$. Pokud je proměnná $Pruchod$ nastavena na hodnotu 3, došlo k dokončení periody a z indexů prvního a posledního vzorku je stanoven počet vzorků na periodu signálu. Poté je proměnná $Pruchod$ nastavena na hodnotu 1. V každé periodě signálu je zaznamenán počet vzorku připadající na tuto periodu a na konci jsou tyto hodnoty zprůměrnovány a je získán průměrný počet vzorků na periodu a ze známé hodnoty periody vzorkování je spočítána doba periody jednoho signálu a poté z převrácené hodnoty je získána frekvence signálu.

Rozšířením programu je výpočet fázového posunu signálu, který je počítán hned v první periodě signálu. Je vzata hodnota prvního vzorku a sledují se průchody nulou. Pokud jsou hodnoty vzorků kladné, nacházíme se v první půlperiodě signálu, pokud jsou záporné, nacházíme se v druhé půlperiodě. Podle toho v jaké půlperiodě se nacházíme čekáme buďto na druhý průchod nulou pro první půlperiodu nebo na jeden průchod pro druhou půlperiodu signálu. Z indexu vzorku určující konec první periody získáme počet vzorků udávající část periody. Tento počet vzorků vynásobím periodou vzorkování a získám dobu trvání části signálu. Porovnáním s dobou jedné celistvé periody signálu získám poměr udávající fázový posun signálu. Tato metoda

je ovšem neosvědčila pro všechny hodnoty fázového posuvu, nejhorší výsledky vykazovala pro hodnoty fázového posuvu blížící se hodnotám 180° a 360° .

7.3 VÝSLEDKY SIMULACE

Signály s vyššími harmonickými ($1 = 0.3; 3 = 0.2; 5 = 0.2; 7 = 0.1$)

1. měření

Harmonické $1 = 0.3; 3 = 0.2; 5 = 0.2; 7 = 0.1$					Chyby			
Nastaveno			Naměřeno		Frekvence		Fáze	
Amplituda	Frekvence	Fáze	Frekvence	Fáze	Absolutní	Relativní	Absolutní	Relativní
1.000	10.000	32.000	10	18	0.000	0.000	-14.000	77.778
1.000	25.000	68.000	27.991	67.689	2.991	10.686	-0.311	0.459
1.000	50.000	104.000	50	104.4	0.000	0.000	0.400	0.383
1.000	75.000	140.000	74.9949	154.814	-0.005	0.007	14.814	9.569
1.000	100.000	176.000	100	178.2	0.000	0.000	2.200	1.235
1.000	150.000	212.000	149.9949	190.818	-0.005	0.003	-21.182	11.101
1.000	300.000	248.000	300.001	248.399	0.001	0.000	0.399	0.161
1.000	500.000	284.000	500	284.4	0.000	0.000	0.400	0.141
1.000	750.000	320.000	749.995	334.801	-0.005	0.001	14.801	4.421
1.000	1000.000	356.000	1000	352.8	0.000	0.000	-3.200	0.907

Tab. 7.1 Zero-crossing - 1. měření s vyššími harmonickými

2.měření

Harmonické $1 = 0.3; 3 = 0.2; 5 = 0.2; 7 = 0.1$					Chyby			
Nastaveno			Naměřeno		Frekvence		Fáze	
Amplituda	Frekvence	Fáze	Frekvence	Fáze	Absolutní	Relativní	Absolutní	Relativní
1.000	10.000	32.000	10	19.44	0.000	0.000	-12.560	64.609
1.000	25.000	68.000	25	70.2	0.000	0.000	2.200	3.134
1.000	50.000	104.000	50	106.2	0.000	0.000	2.200	2.072
1.000	75.000	140.000	74.9949	156.626	-0.005	0.007	16.626	10.615
1.000	100.000	176.000	100	172.8	0.000	0.000	-3.200	1.852
1.000	150.000	212.000	149.9949	194.412	-0.005	0.003	-17.588	9.047
1.000	300.000	248.000	300.001	250.559	0.001	0.000	2.559	1.021
1.000	500.000	284.000	500	286.2	0.000	0.000	2.200	0.769
1.000	750.000	320.000	749.995	334.801	-0.005	0.001	14.801	4.421
1.000	1000.000	356.000	1000	352.8	0.000	0.000	-3.200	0.907

Tab. 7.2 Zero-crossing - 2. měření s vyššími harmonickými

Nejistoty měření

Harmonické 1 = 0.3; 3 = 0.2; 5 = 0.2; 7 = 0.1								
Nastaveno			Frekvence			Fáze		
Amplituda	Frekvence	Fáze	Ua	Ub	Uc	Ua	Ub	Uc
1.000	10.000	32.000	0	0	0	8.925E-30	7.6672	7.66721
1.000	25.000	68.000	0	0.8634	0.8634	1.428E-28	0.5453	0.54531
1.000	50.000	104.000	0	0	0	1.428E-28	0.7506	0.75056
1.000	75.000	140.000	0	0.0029	0.0029	5.712E-28	9.0761	9.07606
1.000	100.000	176.000	0	0	0	0	0.2887	0.28868
1.000	150.000	212.000	0	0.0029	0.0029	0	11.192	11.1921
1.000	300.000	248.000	0	0.0006	0.0006	5.712E-28	0.8539	0.8539
1.000	500.000	284.000	0	0	0	2.285E-27	0.7506	0.75056
1.000	750.000	320.000	0	0.0029	0.0029	0	8.5456	8.54559
1.000	1000.000	356.000	0	0	0	0	1.8475	1.84752

Tab. 7.3 Zero-crossing – nejistoty měření

Z naměřených hodnot a z nich zjištěných chyb a nejistot můžeme říci, že samotné měření frekvence je velice přesné, chyby se při tomto měření pohybují v tisícinách %. A nejistoty mají rozsah také v řádu tisícin až desetin Hz.

Ovšem při měření fázového posuvu už chyby nabývají vyšších hodnot. Pro nejnižší měřené frekvence vykazuje chybu v řádech desítek %, o čem se dá říci že v tomto případě ztrácí měřicí metoda vypovídací hodnotu. Ale se vzrůstající frekvencí se chyba měření fázového posuvu výrazně sníží a dosahuje hodnot okolo 1%, s výjimkami se blíží hodnotě 10%. Ve stejných řádech se pohybují i hodnoty nejistot.

Níže jsou uvedeny výsledky měření pro největší a nejnižší nejistotu:

$$f = (749.9959 \pm 0.0029) \text{ Hz}$$

$$f = (26.4955 \pm 0.8634) \text{ Hz}$$

$$\varphi = (175.5000 \pm 0.2886)^\circ$$

$$\varphi = (192.6148 \pm 11.1921)^\circ$$

Signály se zkreslením

Jako příklad uvádím měření pro šum = 0,22

1. měření

šum = 0.22			Chyby						
Nastaveno			Naměřeno		Frekvence		Fáze		
Amplituda	Frekvence	Fáze	Frekvence	Fáze	Absolutní	Relativní	Absolutní	Relativní	
1.000	10.000	32.000	9.98	49.9401	-0.020	0.200	17.940	35.923	
1.000	25.000	68.000	25.5238	72.4939	0.524	2.052	4.494	6.199	
1.000	50.000	104.000	50.5519	112.665	0.552	1.092	8.665	7.691	
1.000	75.000	140.000	75.991	304.732	0.991	1.304	164.732	54.058	
1.000	100.000	176.000	100.477	154.68	0.477	0.475	-21.320	13.783	
1.000	150.000	212.000	170.4874	150.475	20.487	12.017	-61.525	40.887	
1.000	300.000	248.000	295.4774	80.9367	-4.523	1.531	-167.063	206.412	
1.000	500.000	284.000	441.7671	327.996	-58.233	13.182	43.996	13.414	
1.000	750.000	320.000	587.8489	351.115	-162.151	27.584	31.115	8.862	
1.000	1000.000	356.000	657.6441	289.317	-342.356	52.058	-66.683	23.048	

Tab. 7.4 Zero-crossing - 1. měření se zkreslením

2. měření

šum = 0.22			Chyby						
Nastaveno			Naměřeno		Frekvence		Fáze		
Amplituda	Frekvence	Fáze	Frekvence	Fáze	Absolutní	Relativní	Absolutní	Relativní	
1.000	10.000	32.000	12.929	2.2003	2.929	22.654	-29.800	1354.347	
1.000	25.000	68.000	26.087	71.0609	1.087	4.167	3.061	4.307	
1.000	50.000	104.000	49.9896	97.2172	-0.010	0.021	-6.783	6.977	
1.000	75.000	140.000	75.5146	122.911	0.515	0.681	-17.089	13.904	
1.000	100.000	176.000	99.9796	345.64	-0.020	0.020	169.640	49.080	
1.000	150.000	212.000	149.9797	23.4212	-0.020	0.014	-188.579	805.163	
1.000	300.000	248.000	294.4428	73.2047	-5.557	1.887	-174.795	238.776	
1.000	500.000	284.000	445.1814	339.072	-54.819	12.314	55.072	16.242	
1.000	750.000	320.000	579.9719	205.936	-170.028	29.317	-114.064	55.388	
1.000	1000.000	356.000	683.7093	269.251	-316.291	46.261	-86.749	32.219	

Tab. 7.5 Zero-crossing - 2. měření se zkreslením

Nejistoty měření

šum = 0.22			Nejistoty					
Nastaveno			Frekvence			Fáze		
Amplituda	Frekvence	Fáze	Ua	Ub	Uc	Ua	Ub	Uc
1.000	10.000	32.000	2.231E-30	0.8398	0.8398	0	3.4236	3.42357
1.000	25.000	68.000	8.925E-30	0.465	0.465	0	2.1809	2.18088
1.000	50.000	104.000	3.57E-29	0.1563	0.1563	0	0.5433	0.54329
1.000	75.000	140.000	1.428E-28	0.4346	0.4346	5.712E-28	42.621	42.6208
1.000	100.000	176.000	0	0.1318	0.1318	0	42.816	42.8162
1.000	150.000	212.000	0	38.259	38.259	0	72.199	72.1988
1.000	300.000	248.000	2.285E-27	2.9098	2.9098	0	98.686	98.6861
1.000	500.000	284.000	2.285E-27	32.635	32.635	0	28.598	28.5984
1.000	750.000	320.000	0	95.892	95.892	5.712E-28	23.945	23.9452
1.000	1000.000	356.000	0	190.13	190.13	0	44.292	44.2919

Tab. 7.6 Zero-crossing – nejistoty měření

Z naměřených výsledků a z nich vypočtených chyb je patrné že tato metoda je pro signály se zkreslením vhodná jen částečně. Můžeme vidět že při měření frekvence dosahují chyby řádově jednotek % do frekvence 100 Hz, nad touto frekvencí se začíná velikost chyb zvětšovat a dosahují řádově desítek %. Stejně tak nejistoty tohoto měření začínají nad frekvencí 100 Hz dosahovat hodnot řádově desítek až stovek Hz.

Při měření fázového posuvu dosahují chyby v některých případech až stovek %, Nezávisle na frekvenci. Je to dáno postupem výpočtu, a tím že pokud je signál zkreslen šumem, může v některých případech zakmitat kolem nuly i v místě kdy by nemněl, a to může nepříznivě ovlivnit výpočet fázového posuvu. Proto lze konstatovat že tato metoda se nehodí pro měření fázového posuvu pro signály zkreslené šumem.

Níže jsou uvedeny výsledky měření pro největší a nejmenší nejistotu:

$$f = (100.2283 \pm 0.1318) \text{ Hz}$$

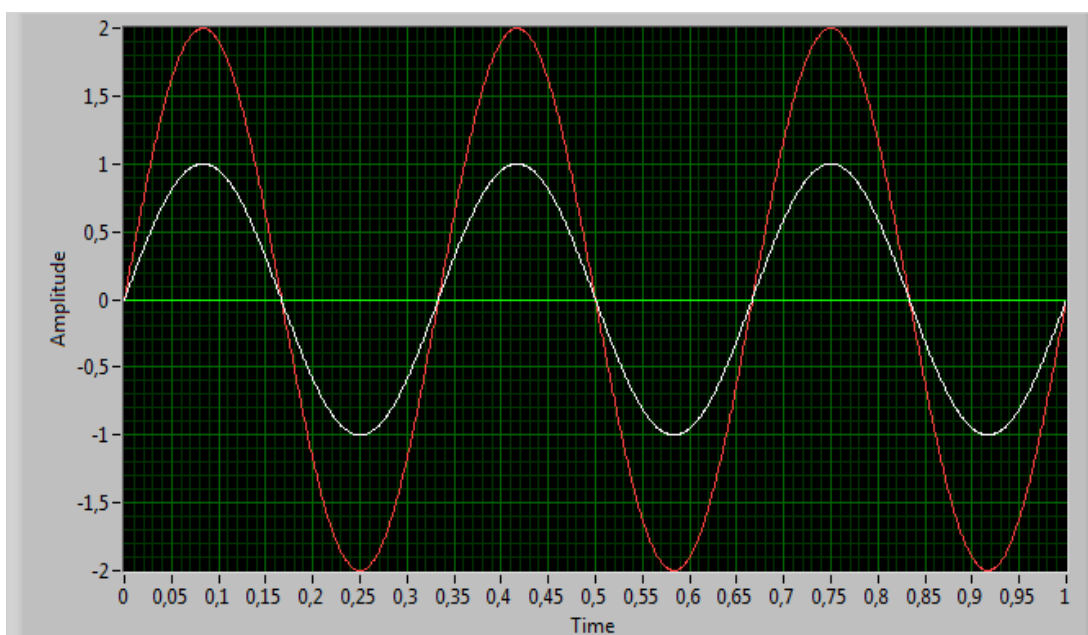
$$f = (670.6767 \pm 190.1300) \text{ Hz}$$

$$\varphi = (104.9410 \pm 0.5432)^\circ$$

$$\varphi = (77.0707 \pm 98.6861)^\circ$$

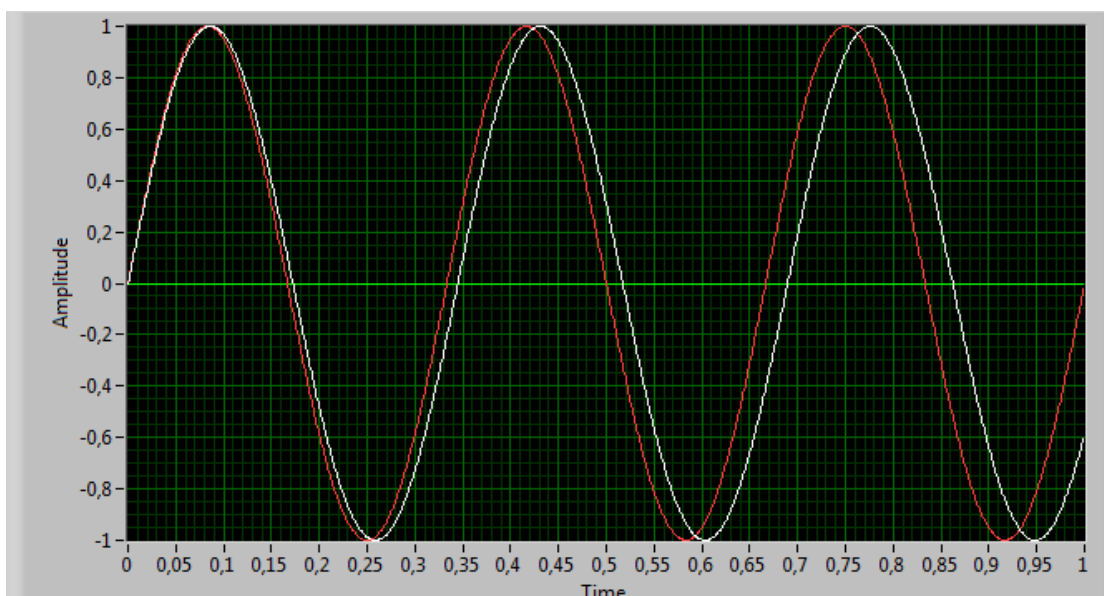
8. FÁZOVÝ ZÁVĚS (PLL)

Pokud máme dva signály mající konstantní rozdíl fáze, vzhledem k časové oblasti, můžeme říci, že jejich kmitočty jsou stejné.



Obr. 8.1 Shodné signály

Mějme dva signály $x(t)$ a $y(t)$, oba začínají v čase $t=0$ se vzájemným nulovým fázovým posuvem. Mají-li oba signály stejný kmitočet, tak se jejich hodnota vzájemného posuvu v čase nemění, v našem případě budou mít nulový fázový posuv i v čase $t=T$. Proto můžeme říci že jejich kmitočty jsou totožné. Toto je znázorněno na Obr. 8.1.

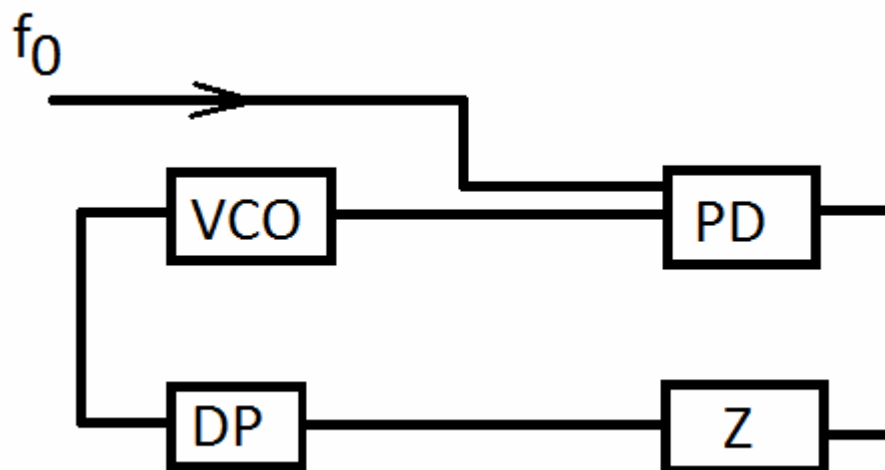


Obr. 8.2 Rozdílné signály

Ovšem pokud jsou kmitočty signálů $x(t)$ a $y(t)$ rozdílné, tak se hodnota jejich vzájemného fázového posuvu mění v čase, jak je znázorněno na Obr. 8.2. Vidíme že v čase $t=0$ je jejich vzájemný posuv roven nule. Ale v čase $t=T$ je už fázový posun nenulový. Z tohoto můžeme vyvodit rozdíl kmitočtů signálů $x(t)$ a $y(t)$.

8.1 ANALOGOVÝ FÁZOVÝ ZÁVĚS (PLL)

Blokové schéma znázorněné na Obr. 8.3 ukazuje princip fázového závěsu. Je zde napětím řízený oscilátor VCO(Voltage Controlled Oscillator) vytvářející signál, který fázový detektor PD(Phase Detektor) porovnává se vstupním signálem. Výstup PD je zesilován zesilovačem odchylky Z, filtrován dolní propustí DP a takto získaným napětím je řízen kmitočet VCO. Touto zpětnou vazbou se zajišťuje doladování VCO na kmitočet vstupního signálu. Napětí na výstupu dolní propusti je úměrné kmitočtu vstupního signálu.



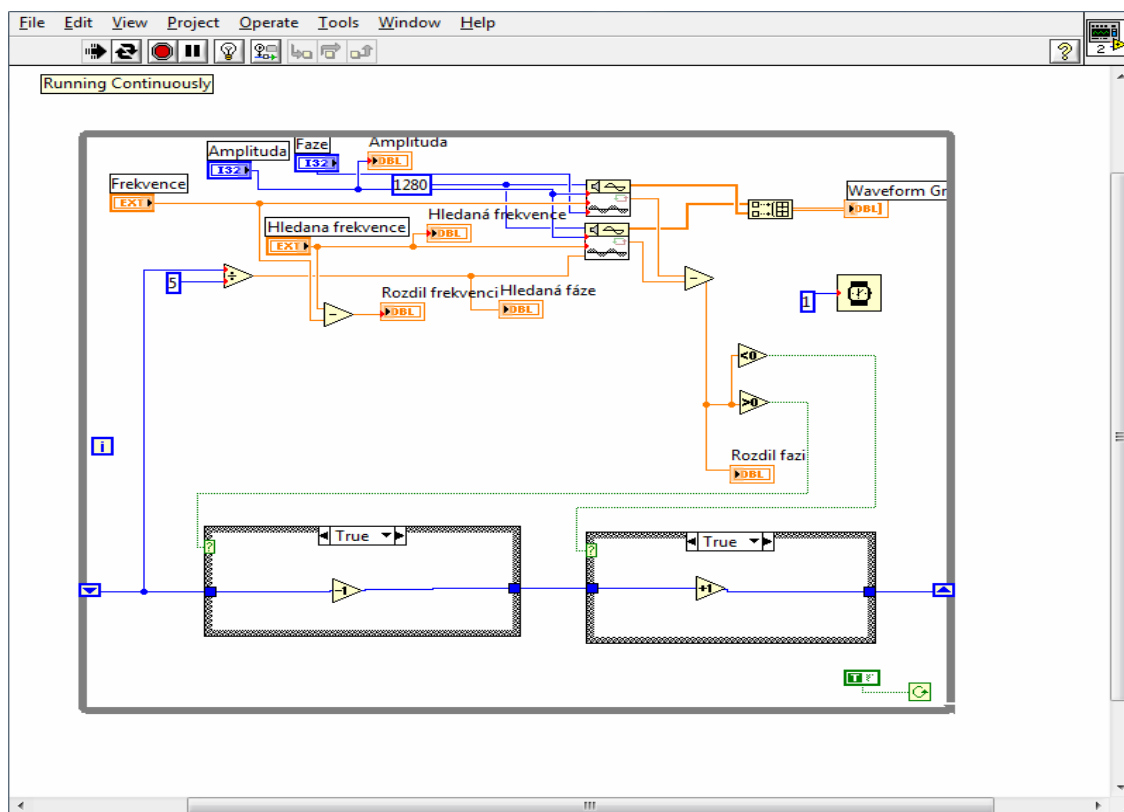
Obr. 8.3 Blokové schéma fázového závěsu

8.2 DIGITÁLNÍ FÁZOVÝ ZÁVĚS(DPLL)

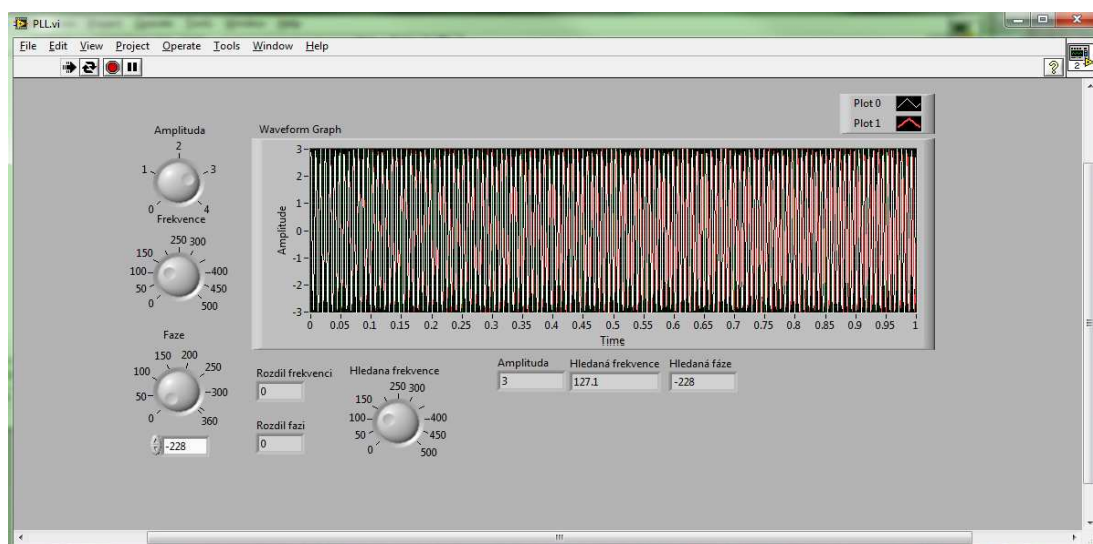
Digitální fázový závěs pracuje obdobně jako analogový fázový závěs, ale je založen na logických obvodech. Na místo napětím řízeného oscilátoru VCO, DPLL využívá referenční hodinový signál a čítač, nahrazující funkci oscilátoru.

8.3 SIMULACE MĚŘENÍ

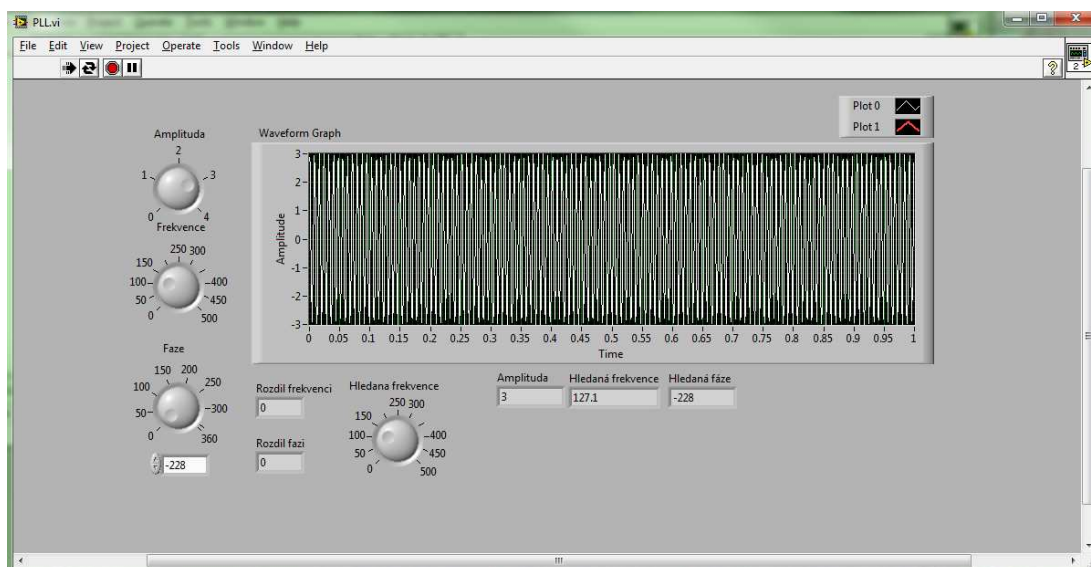
K simulačnímu ověření metody jsem opět využil program LabView. Vytvořil jsem si zapojení znázorněné na Obr. 8.4. Máme zde dva signály, jeden je definován jako neznámý, jehož parametry nastavíme. Druhý signál definovaný jako známý, slouží k porovnání se signálem neznámým. Na výstupu obou signálu jsou sledovány jejich fázové posuvy a automaticky je vyrovnáván jejich rozdíl, aby oba signály měly stejnou hodnotu fázového posuvu. Frekvence je nastavována manuálně na ovládacím panelu. Oba signály jsou graficky znázorněny na grafu. Postupným přeladováním frekvence nalezneme její správnou hodnotu. Oba signály budou totožné. Parametry hledaného signálu budeme mít zobrazeny na ovládacím panelu Obr. 8.5. a Obr. 8.6.



Obr. 8.4 Zapojení v LabView pro simulaci měření pomocí fázového závěsu



Obr.8.5 Ovládací panel pro simulaci měření pomocí fázového závěsu –
signály nejsou shodné



Obr.8.6 Ovládací panel pro simulaci měření pomocí fázového závěsu –
signály jsou shodné

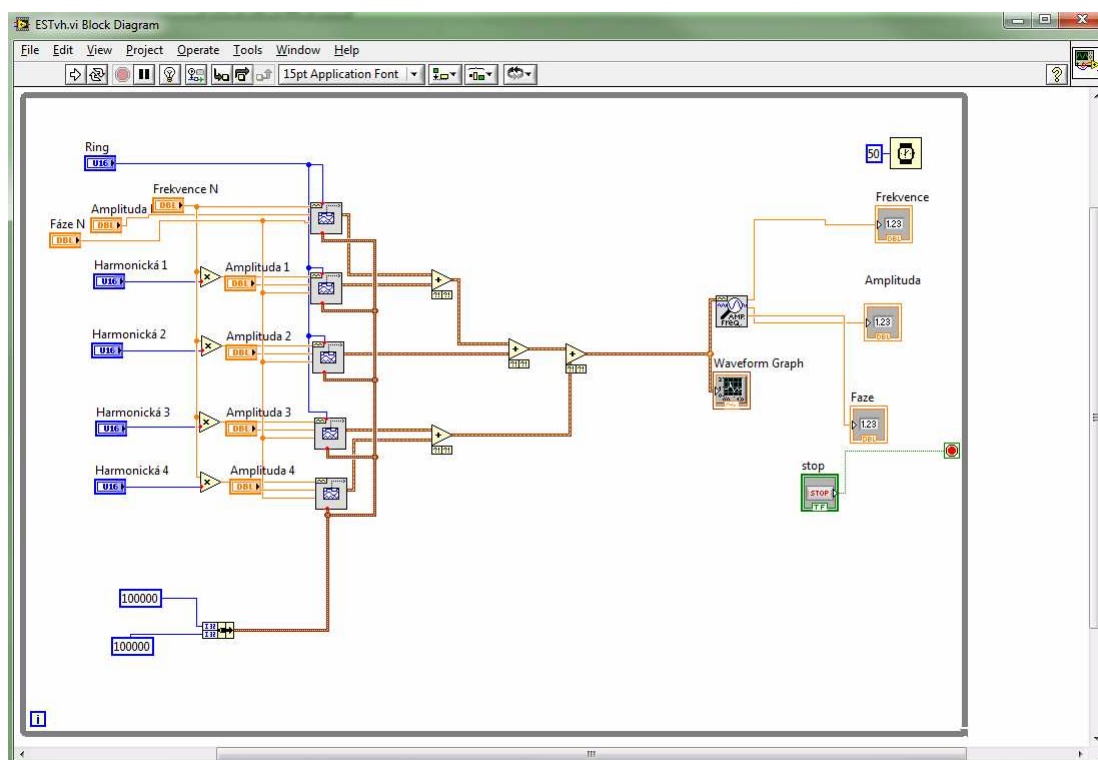
8.4 VÝSLEDKY SIMULACE

Protože je shoda signálu potvrzena pouze vizuální shodou a není definována žádným číselným údajem, nelze stanovit chyby měření ani nejistoty tohoto měření. Můžeme ale říci, že automatické doladění fázového rozdílu nám zajistí snadné nalezení hledaného signálu a to tak že oba dva signály se budou překrývat. Pokud by toto doladění fázového posuvu nebylo automatické, muselo by proběhnout toto doladění manuálně a to by velice znesnadnilo nalezení správného signálu, protože i když by bylo obě frekvence signálů totožné signály by nebyli vzájemně překryty a mohlo by to být vyhodnoceno tak, že frekvence nejsou totožné. Přesnost při vyhledávání frekvence je nastavena na jednotky Hz. Pokud by jsme chtěly větší přesnost při vyhledávání signálu, lze velice snadno nastavit prvky na přesnost desetin i setin Hz.

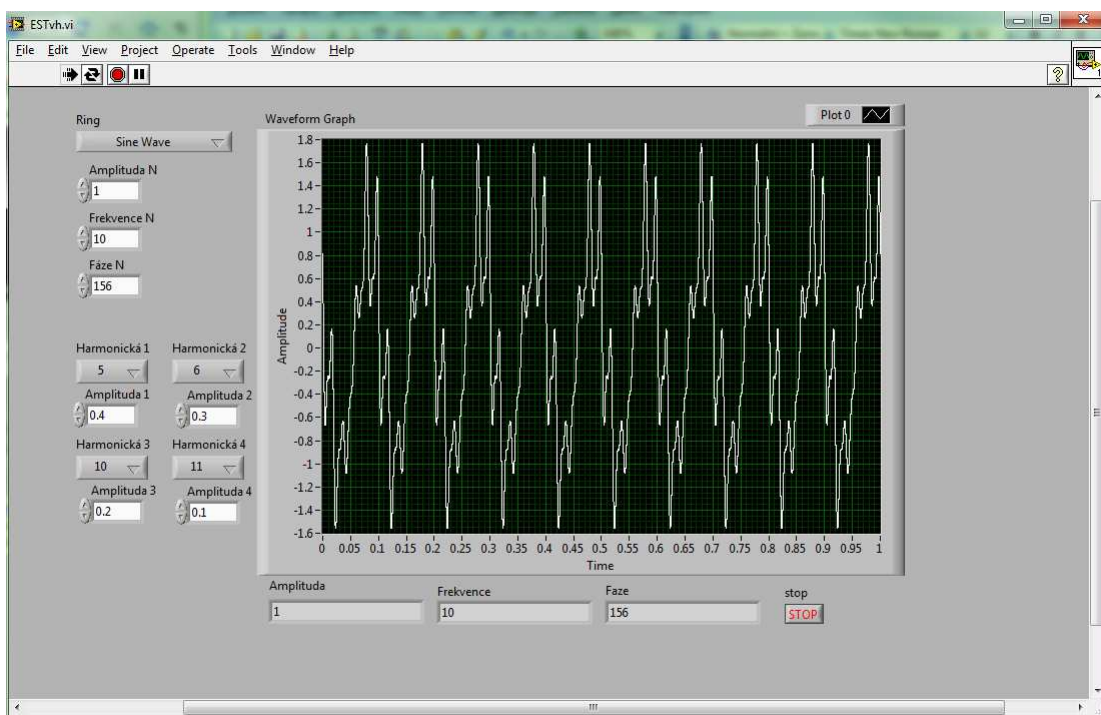
9. KOMEREČNÍ METODY

9.1 EXTRACT SINGLE TONE

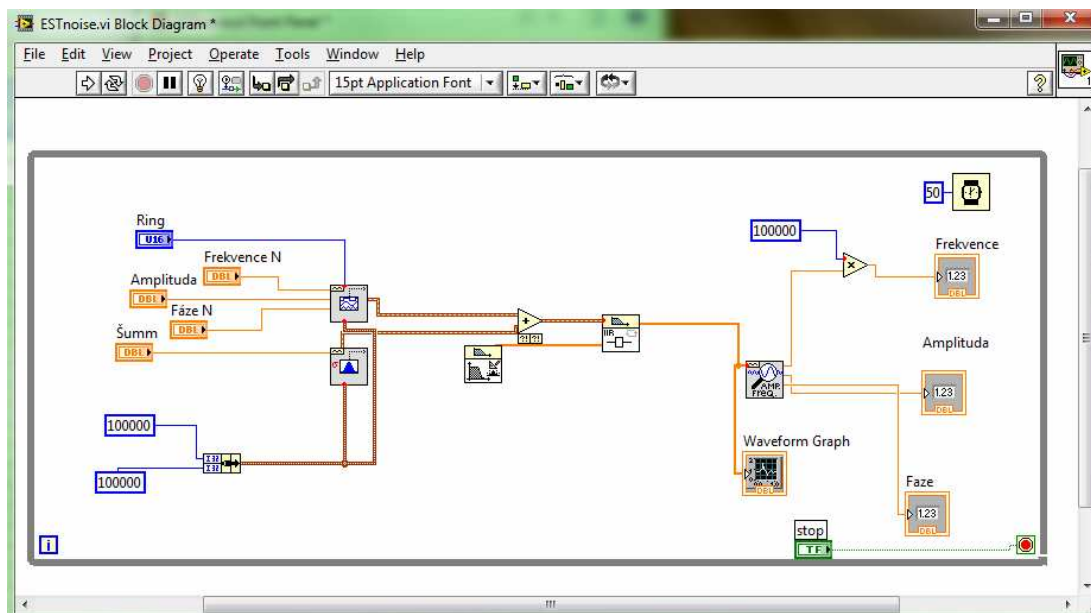
Jako referenční software pro srovnání mých dosažených výsledků jsem zvolil funkční blok EXTRACT SINGLE TONE INFORMATION dostupný v programu LabView. Je to softwarový prostředek dostupný přímo v programu jako funkční blok jehož vstupem je signál, ze kterého tento funkční blok zjistí jeho amplitudu, frekvenci a fázový posun. Pokud by signál obsahoval více signálů, tak tento funkční blok vybere signál s největší amplitudou a jeho parametry nám vypíše. Možností je také hledat přímo signál jehož frekvence se nachází v určitém definovaném frekvenčním pásmu. V mé práci jsem tuto funkci aplikoval jak na signály obsahující vyšší harmonické tak na signály se zkreslením. Zapojení a ovládací panely jsou na následujících obrázcích Obr. 9.1-9.4.



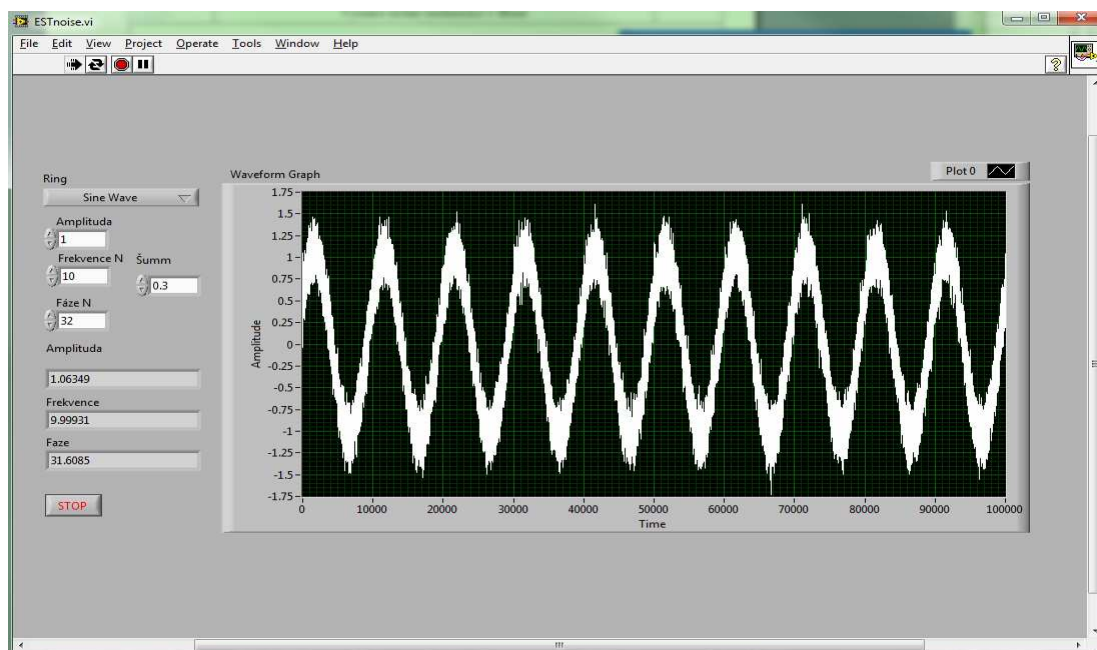
Obr. 9.1 Zapojení v LabView pro měření signálu s vyššími harmonickými



Obr. 9.2 Ovládací panel pro měření signálu s vyššími harmonickými



Obr. 9.3 Zapojení v LabView pro měření signálu se zkreslením



Obr. 9.4 Ovládací panel pro měření signálu se zkreslením

9.1.1 VÝSLEDKY SIMULACE

Signály s vyššími harmonickými(1 = 0.3;3 = 0.2;5 = 0.2;7 = 0.1)

Harmonické		1=0.3 3=0.2 5=0.2 7=0.1							
					Chyby				
Nastaveno			Naměřeno		Frekvence		Fáze		
Amplituda	Frekvence	Fáze	Frekvence	Fáze	Absolutní	Relativní	Absolutní	Relativní	
1	10	32	10	32	0	0	0	0	
1	25	68	25	68	0	0	0	0	
1	50	104	50	104	0	0	0	0	
1	75	140	75	140	0	0	0	0	
1	100	176	100	176	0	0	0	0	
1	150	212	150	212	0	0	0	0	
1	300	248	300	248	0	0	0	0	
1	500	284	500	284	0	0	0	0	
1	750	320	750	320	0	0	0	0	
1	1000	356	1000	356	0	0	0	0	

Tab. 9.1 EST - měření s vyššími harmonickými

Z předcházející tabulky je patrné že pro signály harmonické a pro signály s vyššími harmonickými je tato metoda velice vhodná. Všechny měřené signály, vykazují nulovou chybu jak při měření frekvence tak při měření fáze.

Signály se zkreslením

Jako příklad uvádím měření pro $\text{šum} = 0,22$

1. měření

šum = 0.22			Chyby					
Nastaveno			Naměřeno		Frekvence		Fáze	
Amplituda	Frekvence	Fáze	Frekvence	Fáze	Absolutní	Relativní	Absolutní	Relativní
1.000	10.000	32.000	9.998	31.906	-0.002	0.016	-0.094	0.294
1.000	25.000	68.000	25.001	66.803	0.000	0.002	-1.198	1.793
1.000	50.000	104.000	50.001	101.687	0.001	0.002	-2.313	2.275
1.000	75.000	140.000	75.001	136.575	0.001	0.001	-3.425	2.508
1.000	100.000	176.000	100.001	171.523	0.001	0.001	-4.477	2.610
1.000	150.000	212.000	150.000	205.311	0.000	0.000	-6.689	3.258
1.000	300.000	248.000	300.001	234.852	0.001	0.000	-13.148	5.598
1.000	500.000	284.000	499.999	262.395	-0.001	0.000	-21.605	8.234
1.000	750.000	320.000	750.001	287.467	0.001	0.000	-32.533	11.317
1.000	1000.000	356.000	1000.000	312.603	0.000	0.000	-43.397	13.882

Tab. 9.2 EST - 1. měření se zkreslením

2. měření

šum = 0.22			Chyby					
Nastaveno			Naměřeno		Frekvence		Fáze	
Amplituda	Frekvence	Fáze	Frekvence	Fáze	Absolutní	Relativní	Absolutní	Relativní
1.000	10.000	32.000	9.999	31.506	-0.001	0.005	-0.494	1.567
1.000	25.000	68.000	25.000	66.867	0.000	0.001	-1.133	1.695
1.000	50.000	104.000	50.002	101.549	0.002	0.004	-2.451	2.414
1.000	75.000	140.000	75.000	137.139	0.000	0.000	-2.861	2.086
1.000	100.000	176.000	99.997	172.198	-0.003	0.003	-3.802	2.208
1.000	150.000	212.000	150.001	205.294	0.001	0.001	-6.706	3.267
1.000	300.000	248.000	300.000	234.992	0.000	0.000	-13.008	5.536
1.000	500.000	284.000	499.999	262.496	-0.001	0.000	-21.504	8.192
1.000	750.000	320.000	749.999	287.656	-0.001	0.000	-32.344	11.244
1.000	1000.000	356.000	1000.000	312.860	0.000	0.000	-43.140	13.789

Tab. 9.3 EST - 2. měření se zkreslením

Nejistoty měření

šum = 0.22			Nejistoty					
Nastaveno			Frekvence			Fáze		
Amplituda	Frekvence	Fáze	Ua	Ub	Uc	Ua	Ub	Uc
1.000	10.000	32.000	0	0.0007	0.0007	0	0.1697	0.16968
1.000	25.000	68.000	0	0.0002	0.0002	1.428E-28	0.6727	0.67267
1.000	50.000	104.000	3.6E-29	0.0009	0.0009	1.428E-28	1.3752	1.37525
1.000	75.000	140.000	1.4E-28	0.0002	0.0002	0	1.8146	1.81461
1.000	100.000	176.000	1.4E-28	0.0006	0.0006	0	2.3899	2.38994
1.000	150.000	212.000	5.7E-28	0.0003	0.0003	0	3.8668	3.8668
1.000	300.000	248.000	0	0.0003	0.0003	0	7.5506	7.55059
1.000	500.000	284.000	0	0.0006	0.0006	0	12.444	12.4444
1.000	750.000	320.000	0	0	0	2.285E-27	18.728	18.7285
1.000	1000.000	356.000	0	0	0	2.285E-27	24.981	24.9812

Tab. 9.4 EST – nejistoty měření

Z naměřených výsledků, z chyb měření a nejistot je patrné, že tato metoda je pro signály obsahující vyšší harmonické a pro signály čistě harmonické je tato metoda velice vhodná.

Pro signály obsahující zkreslení můžeme konstatovat, že při měření frekvence dosahuje chyby v řádek setin % a to pro signály s frekvencí do 100 Hz, pro signály s vyšší frekvencí se tato chyba snižuje. Naopak při měření fázového posuvu se chyby a nepřesnosti měření pomalu zvyšují. Pro nízké frekvence jsou tyto chyby v řádu jednotek % a pro signály přesahující 500 Hz se tato chyba pohybuje v okolí 10%.

Nejistota u_A byla stanovena podle postupu pro výpočet uvedený výše, a korigována podle uvedené tabulky, protože počet měření byl nižší než 10. Ovšem tyto nejistoty dosahovaly velice malých hodnot v řádu 10^{-27} . Proto byla zavedena nejistota u_B .

Níže jsou uvedeny výsledky měření pro největší a nejmenší nejistotu:

$$f = (25.0003 \pm 0.0002) \text{ Hz}$$

$$f = (50.0015 \pm 0.0009) \text{ Hz}$$

$$\varphi = (31.7061 \pm 0.1696)^\circ$$

$$\varphi = (312.7313 \pm 24.9812)^\circ$$

10. ZÁVĚR

V první části mé práce jsem se věnoval využití korelačních metod pro stanovení změn frekvence signálu. Ověřil jsem metodu popsanou v doporučené literatuře, jak matematicky pomocí programu Matlab, výstupem byly grafické závislosti korelačního koeficientu na změně frekvence vůči referenčnímu signálu, tak jsem provedl simulaci pomocí programu LabView, kde bylo možné pracovat jak s čistě harmonickými signály, signály s vyššími harmonickými a signály se zkreslením. V této simulaci je možné přímo sledovat změny korelačního koeficientu na změně frekvence a změně fázového posuvu vůči referenčnímu signálu v reálném čase. Tato metoda nám umožňuje přesné doladění jak frekvence tak fáze a to zejména díky vysoké jemnosti zobrazení korelačního koeficientu, které je dáno až sedmi desetinnými místy.

Jako druhou metodu pro stanovení frekvence signálu jsem využil metodu Zero-crossing, která je postavená na principu sledování jednotlivých vzorků signálu a hledá se místo kde signál prochází přes časovou osu a mění svoje znaménko. Z těchto míst průchodu lze poté, při znalosti vzorkovací frekvence zpětně stanovit frekvenci signálu. Dále jsem tuto metodu rozšířil o možnost stanovení fázového posuvu signály. Tento výpočet probíhá pouze během první periody signálu, takže pro měření signálů se zkreslením se moc nehodí a to z důvodů samotné povahy zkresleného signálu, kdy může zakmitat kolem nuly i v místě kdy by neměl, pokud je působící šum dostatečně veliký. Frekvence při měření signálu se šumem je přesná jen do frekvence asi 100 Hz. Při měření harmonických signálů a signálů s vyššími harmonickými je tato metoda přesná a chyby při měření frekvence dosahují až na výjimky řádově setin %. Při měření fázového posuvu tyto chyby dosahují hodnot řádově v jednotkách %.

V další části mé práce jsem se pokusil využít pro měření frekvence fázový závěs. V programu LabView jsem vytvořil simulaci měření, která automaticky

vyrovnává rozdíl mezi fázemi hledaného signálu a signálu referenčního. Vyhledávání frekvence ovšem probíhá manuálně pomocí ovládacího panelu a stejnost frekvence je dána pouze vizuální shodou obou signálů. Jelikož se mi nepodařilo zajistit automatické vyhledání neznámé frekvence pro signály harmonické, nepokoušel jsem se tuto metodu rozšiřovat na signály s vyššími harmonickými ani na signály se zkreslením.

V poslední části mého projektu jsem využil komerčního softwaru dostupného v prostředí LabView, pod názvem EXTRACT SINGLE TONE. Tímto softwarovým prostředkem jsem proměřil totožné hodnoty frekvence a fázového posunu jako mnou navrhnutou metodou Zero-crossing, abych mohl porovnat mnou dosažené výsledky s komerčním softwarem. Při měření signálů harmonických a signálů s vyššími harmonickými se jeví výhodněji, protože hodnoty frekvencí a fázového posunu stanovuje bez nejmenších chyb, ovšem metodou Zero-crossing lze dosáhnout naměřených hodnot zatížených chybou řádově setin %, což se jeví jako velice nepatrná chyba. A pro signály se zkreslením nedosahuje takových chyb jako metoda Zero-crossing.

11. POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JAN,J.: Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálu. VUTIUUM Brno, 2002.
427 stran. ISBN 80-214-2911-9
- [2] HOFFNER,V.: Úvod do teorie signálů. SNTL Praha, 1979. 452 stran.
- [3] NOVÁK,M.: Využití korelačních metod pro stanovení změn frekvence signálu.
AUTOMATIZACE, listopad 2008, roč. 51, č. 11, s. 702-706.
- [4] BEJČEK,L.-ČEJKA,M.-REZ,J.-GESCHIEDTOVÁ,E.-STEIBAUER,M.: Měření
v elektrotechnice. 241 stran
- [5] WIKIPEDIE. Korelace [online]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Korelace>
- [6] WIKIPEDIE. Korelace [online]. Dostupný z WWW:
<http://www.answers.com/topic/frequency-measurement>
- [7] WIKIPEDIA. Phase-locked loop [online]. Dostupný z WWW:
http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-locked_loop#Digital_phase-locked_loop_.28DPLL.29
- [8] WIKIPEDIA. Zero crossing [online]. Dostupný z WWW:
http://en.wikipedia.org/wiki/Zero_crossing
- [9] NATIONAL INSTRUMENT. NI Discussion Forum [online]. Dostupný z WWW:
<http://forums.ni.com/>

12. SEZNAM ZKRATEK

EST – Extrakt single tone

VCO – Voltage controled oscilátor

PLL – Phase-locked loop

DPLL – Digital phase-locked loop

DP – Dolní propust

PD – Phase detector

13. SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1. VÝPOČETNÍ SKRIPT PRO $\Delta f = (-2000; 2000)$

PŘÍLOHA 2. VÝPOČETNÍ SKRIPT PRO $\Delta f = (-100; 100)$ a $\phi = (-8; 8)$

**PŘÍLOHA 3. ZERO-CROSSING (HARMONICKÝ SIGNÁL A SIGNÁL S
VYŠŠÍMI HARMONICKÝMI)**

PŘÍLOHA 4. ZERO-CROSSING (SIGNÁL SE ZKRESLENÍM)

Příloha č.1 výpočetní skript pro $\Delta f = (-2000; 2000)$

```
clc
clear all
close all

%Obecné definice
Q = 0;
df2 = [-2000:1:2000];

%=====

f = 4275;
T = 1/f;
i = 1;
Pxy1 = [-2000:1:2000];

for i=1:4001
    df = df2(i);
    A = 8*df*T*(pi^2)+T*df*pi*sin(2*Q)+2*cos(2*pi*df*T)-cos(2*Q)-
    T*df*pi*sin(4*pi*df*T+2*Q)-cos(4*pi*df*T+2*Q)-pi*sin(4*pi*df*T+2*Q)-
    2+4*(T^2)*(df^2)*(pi^2)+4*(pi^2)+pi*sin(2*Q)+2*cos(2*pi*df*T+2*Q);

    Pxy1(i) = (2*(sin(2*pi*df*T+Q)-
    sin(Q))*(1+df*T))/(T*df*(2+df*T)*sqrt(A));
end
%=====

figure(1)
plot(df2,Pxy1, 'r')
grid on
```

Příloha č.2 výpočetní skript pro $\Delta f=(-100;100)$ a $\phi=(-8;8)$

```
clc
clear all
close all

%definice pomocnych promenych
i = 1;
j = 1;
k = 1;

%Definice signalu
f = 4275;
T = 1/f;

df2 = [-100:1:100];
Q2 = [-8:0.1:8];

%Prepocet fazoveho posunu
for k=1:161;
    Q1(k)=Q2(k)*(1.745*10^-2);
    k=k+1;
end
l = 1;
%Vypocet Pxy
for j=1:201

    df=df2(j)

    %-
    if df == 0
        df=0.00000001
    end
    %-

for i=1:161
```

```

Q=Q1(i)

%------

A = 8*df*T*(pi^2)+T*df*pi*sin(2*Q)+2*cos(2*pi*df*T)-cos(2*Q)-
T*df*pi*sin(4*pi*df*T+2*Q)-cos(4*pi*df*T+2*Q)-pi*sin(4*pi*df*T+2*Q)-
2+4*(T^2)*(df^2)*(pi^2)+4*(pi^2)+pi*sin(2*Q)+2*cos(2*pi*df*T+2*Q);

Pxy(i,j) = (2*(sin(2*pi*df*T+Q)-
sin(Q))*(1+df*T))/(T*df*(2+df*T)*sqrt(A));

%------

i=i+1;
end
j=j+1;
end

%Vytisknuti graficke zavislosti
figure
%plot(Q2,Pxy(:,2))
meshc(df2,Q2,Pxy)

```


**Příloha č.3 Zero-crossing pro harmonické signály a signály s vyššími
harmonickými**

```
clear all
close all
clc

% Navzorkovane prubehy z programu Labview
%-----
U=[]
%-----
N = 0.0001 %Perioda vzorkovani

M = size(U);
m = M(2);
n=1;

for L=n:m
    SI(1,n)=n;
    SI(2,n)=U(n);
    n=n+1;
end

a = 1;
k = 1;
v = k;
Pruchod = 0;
n=1;
% Samotn0 vyhledavani pruchodu
for L=n:m-1
    A = SI(2,k);
    B = SI(2,k+1);
    if A>=0
        if B<=0
            Pruchod = Pruchod + 1;
        end
    end

    if A<=0
        if B>=0
            Pruchod = Pruchod + 1;
        end
    end

    if B == 0
        Pruchod = Pruchod - 1;
    end

    if Pruchod > 2
        vzorky = v;
        VZORKY(a)=vzorky;
        a=a+1;
    end
end
```

```

        v=0;
        Pruchod = 1;

    end

    k=k+1;
    v=v+1;
    n=n+1;

end

VZ = size(VZORKY);
vz = VZ(2) - 1;
PrumerVzorku = (sum(VZORKY(2:end)))/vz;

T = PrumerVzorku * N
f = 1/T

plot(SI(1,:),SI(2,:))

%-----
%-----
%Fazovy posun
%-----
%-----
if f>=700
    roz=0.1;
else
    roz = 0.05;
end
roz = 0.1;
Limmin = -roz;
Limmax = roz;

M = size(U);
m = M(2);
x = 1;
n=2;
POS=zeros(1,m);

for L=n:M(2)
    P = SI(2,n);
    if P > Limmin
        if P < Limmax
            POS(1,x)=SI(1,n);

            x = x + 1;
        end
    end
    n = n+1;
end

a=1;
b=2;

```

```
x2 = 1;
POR=zeros(1,15);
for o=1:90
    c = POS(1,a) + 1;
    d = POS(1,b) ;
    if c~=d
        POR(1,x2) = b;
        x2 = x2 + 1;
    end
    a=a+1;
    b=b+1;
    o=o+1;
end

if SI(2,1)<=0
    y = POR(1,1);
    z = POS(1,y);
    Tp = 1/f;
    Tv = z*N;
    Fi = 360-(Tv/Tp)*360
else
    y = POR(1,2);
    z = POS(1,y);
    Tp = 1/f;
    Tv = z*N;
    Fi = 540 -(Tv/Tp)*360
end
```

Příloha č.4 Zero-crossing pro signály se zkreslením

```
clear all
close all
clc

% Navzorkovane prubehy z programu Labview
%-----
U=[]
%-----
N = 0.0001          %Perioda vzorkovani

% Nastaveni vektoru
%-----
M = size(U);
m = M(2);
n=1;

for L=n:m
    SI(1,n)=n;
    SI(2,n)=U(n);
    n=n+1;
end
%Hledani maxim a minim
%-----
-----
k = 1;
n = 1;
MAX = 0;
MIN = 0;

for L=n:m-1
    I = MAX;
    J = SI(2,k);
    if J > I
        MAX = J;
    end

    I = MIN;

    if J < I
        MIN = J;
    end
    k = k +1;
    n = n +1;
end
%-----
-----
MAXopt = 1;
%-----
-----

a = 1;
k = 1;
v = k;
```

```

Pruchod = 0;
n=1;
PMAX = 0;
PMIN = 0;
% Samotn0 vyhledavani pruchodu
for L=n:m-1
    A = SI(2,k);
    B = SI(2,k+1);

    if A > MAXopt
        PMAX = 1;
    end

    if A < (-1)*MAXopt
        PMIN = 1;
    end

    if A>=0
        if B<=0
            if PMAX == 1;
                Pruchod = Pruchod + 1;
                PMAX = 0;
            end
        end
    end

    if A<=0
        if B>=0
            if PMIN == 1;
                Pruchod = Pruchod + 1;
                PMIN = 0;
            end
        end
    end

    if B == 0
        Pruchod = Pruchod - 1;
    end

    if Pruchod > 2
        vzorky = v;
        VZORKY(a)=vzorky;
        a=a+1;
        v=0;
        Pruchod = 1;
    end

    k=k+1;
    v=v+1;
    n=n+1;
end

```

```
VZ = size(VZORKY);
vz = VZ(2) - 1;
PrumerVzorku = (sum(VZORKY(2:end)))/vz;
```

```
T = PrumerVzorku * N
f = 1/T
```

```
plot(SI(1,:),SI(2,:))
```

```
%-----
%-----
%Fazovy posun
%-----
%-----
```

```
roz = 0.1;
Limmin = -roz;
Limmax = roz;
```

```
M = size(U);
m = M(2);
x = 1;
n=2;
POS=zeros(1,m);
```

```
for L=n:M(2)
    P = SI(2,n);
    if P > Limmin
        if P < Limmax
            POS(1,x)=SI(1,n);

            x = x + 1;

        end
    end
    n = n+1;
end
```

```
a=1;
b=2;
x2 = 1;
POR=zeros(1,15);
for o=1:90
    c = POS(1,a) + 1;
    d = POS(1,b) ;
    if c~=d
        POR(1,x2) = b;
        x2 = x2 + 1;

    end
    a=a+1;
    b=b+1;
    o=o+1;
end
```

```
if f<=60
    ODP0=180;
```

```
else
    ODP0 = 540;
end

if SI(2,1)<=0
    y = POR(1,1);
    z = POS(1,y);
    Tp = 1/f;
    Tv = z*N;
    Fi = 540-(Tv/Tp)*360
else
    y = POR(1,2);
    z = POS(1,y);
    Tp = 1/f;
    Tv = z*N;
    Fi = ODP0 -(Tv/Tp)*360
end
```