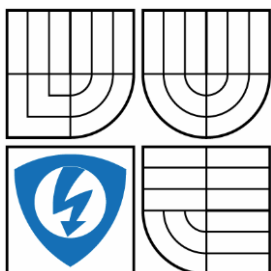


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

POTLAČENÍ ADITIVNÍHO ŠUMU

THE SUPPRESSION OF ADDITIVE NOISE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

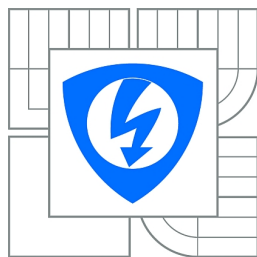
MARIÁN TUKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. SOŇA ŠEDIVÁ, Ph.D.

BRNO 2015



**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: Marián Tuka

ID: 146118

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Potlačení aditivního šumu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit program pro využití filtrů a vlnkové transformace pro potlačení aditivního šumu.

1. Proved'te literární rešerši v oblasti potlačení aditivního šumu u měřených signálů, zaměřte se převážně na použití FIR a IIR filtrů a dále na použití vlnkové transformace.
2. Navrhněte metodiku softwarového řešení potlačení aditivního šumu ve vybraném softwarovém prostředí (např. LabVIEW, Matlab) pomocí FIR a IIR filtrů, a dále s využitím vlnkové transformace.
3. Naprogramujte navržená řešení z bodu 2) zadání ve vybraném softwarovém prostředí.
4. Ověřte funkčnost vytvořeného programu na zašuměných signálech zadaných vedoucím.
5. Srovnajte použité metody filtrace z hlediska chybového signálu, který je rozdílem signálu po odstranění šumu a původního zašuměného signálu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Merins, A.: Signal analysis – Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications.
John Wiley and Sons, Chichester, 1999, ISBN 0-471-98626-7

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 25.5.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá teoretickým rozborom a aplikáciou metód vhodných pre potlačovanie šumu z meraného signálu za použitia programovacieho prostredia LabVIEW. Prvá skupina metód sa zaoberá často používanými filtermi FIR (konečná impulzová odozva) a IIR (nekonečná impulzová odozva). Druhá skupina sa zaoberá modernejšou metódou odstraňovania šumu za pomoci vlnkovej transformácie.

Klíčová slova

aditívny šum, potlačovanie šumu, meraný signál, FIR, IIR, vlnková transformácia, prahovanie, LabVIEW

Abstract

This thesis deals with theoretical analysis and application of methods suitable for suppression of noise from measured signal using programming environment LabVIEW. The first group of methods deals with frequently used filters FIR (finite impulse response) and IIR (infinite impulse response). The second one deals with modern method of removing noise with the help of wavelet transformation.

Keywords

additive noise, suppression of noise, measured signal, FIR, IIR, wavelet transform, thresholding LabVIEW

Bibliografická citace:

TUKA, M. *Potlačení aditivního šumu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 56s. Vedoucí bakalářské práce byla Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Prohlášení

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

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

V Brně dne: **21. května 2015**

.....
podpis autora

Poděkování

Ďakujem týmto svojej vedúcej Ing. Soni Šedivej, Ph.D. za účinnú pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri vypracovávaní bakalárskej práce, taktiež mojej rodine, priateľke a kamarátom za podporu.

V Brně dne: **21. května 2015**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	11
2	Aditívny šum	12
2.1	Rozdelenie hustoty pravdepodobnosti	12
2.1.1	Rozdelenie šumu	13
2.2	Pomer signál/šum	13
3	Filtrácia	15
3.1	Filtre	15
3.2	Číslicové filtre	16
3.3	FIR filter	18
3.3.1	Metódy návrhu FIR filtrov	20
3.4	IIR filter	21
3.4.1	Metódy návrhu IIR filtrov	22
3.5	Porovnanie vlastností FIR a IIR filtrov	23
4	Vlnková transformácia	24
4.1	Materská vlnka	25
4.2	Spojité vlnková transformácia	26
4.2.1	Vlastnosti spojitej vlnkovej transformácie	26
4.3	Diskrétna vlnková transformácia	27
4.4	Vlnková transformácia s diskretným časom	28
4.5	Inverzná vlnková transformácia s diskretným časom	29
4.6	Banky filtrov	29
4.7	Prahovanie koeficientov	30
4.7.1	Tvrde prahovanie	30
4.7.2	Mäkké prahovanie	30
4.7.3	Voľba prahu	31
5	Návrh Softvérového riešenia	32
5.1	LabVIEW	32
5.2	Bloková schéma programu	33
6	Realizácia programu	34
6.1	Užívateľské rozhranie	34
6.2	Ovládanie programu	35
6.2.1	Voľba signálu	35
6.2.2	Voľba šumu	36

6.2.3	Voľba metódy potlačovania šumu	36
6.3	Popis jednotlivých funkcií a podprogramov	40
6.3.1	Generovanie signálu.....	40
6.3.2	Generovanie šumu.....	41
6.3.3	FIR filtrácia	41
6.3.4	IIR filtrácia.....	42
6.3.5	Vlnková transformácia (SubVI).....	42
6.3.6	Odstránenie fázového posunu (SubVI)	44
6.3.7	SNR (SubVI).....	44
6.3.8	Plávajúci priemer (SubVI)	45
7	Overenie funkčnosti a Zhodnotenie výsledkov	46
7.1	Použité metódy a ich nastavenia	47
7.2	Dosiahnuté výsledky	48
7.2.1	Sínusový signál	49
7.2.2	Obdĺžnikový signál	50
7.3	Nevhodne zvolené nastavenia	51
8	Záver.....	54

Zoznam obrázkov

Obrázok 1. Priebeh signálu šumu a jeho frekvenčné spektrum [13].....	12
Obrázok 2. Hustota pravdepodobnosti Gaussovho (normálneho) rozdelenia [3]	13
Obrázok 3. Sínusový signál bez a s šumom.....	14
Obrázok 4. Ideálne frekvenčné charakteristiky DP, HP, PP, PZ [5].....	16
Obrázok 5. Impulzná odozva FIR filtra [9].....	17
Obrázok 6. Impulzná odozva IIR filtra [9].....	17
Obrázok 7. Základné bloky filtrov [4][5].....	18
Obrázok 8. Blokova schéma FIR filtra (priama forma) [4] [5].....	18
Obrázok 9. Príklady impulzných charakteristík FIR filtrov s lineárnou fázou [1].....	19
Obrázok 10. Blokova schéma IIR filtra [4] [5]	22
Obrázok 11. Príklad teoretického a Heisenbergovho časovo-frekvenčného umiestnenia vlniek [15].....	24
Obrázok 12. Materská vlnka a jej modifikácie [1].....	26
Obrázok 13. Jeden krok DWT [10].....	28
Obrázok 14. Základná blokova schéma dvojkanálovej banky filtrov [2]	29
Obrázok 15. Tvrdé a mäkké prahovanie [11].....	31
Obrázok 16. Blokova schéma programu	33
Obrázok 17. Užívateľské rozhranie a jeho štyri časti	35
Obrázok 18. Amplitúdová frekvenčná charakteristika a popis jednotlivých pásiem	37
Obrázok 19. Nastavenia FIR filtra	37
Obrázok 20. Nastavenia IIR filtra	38
Obrázok 21. Nastavenia vlnkovej transformácie	39
Obrázok 22. Záložka celkové porovnanie s rozkliknutou paletou grafu.....	40
Obrázok 23. Generátor základných signálov	41
Obrázok 24. Generátory šumových signálov	41
Obrázok 25. Blok FIR filtra	42
Obrázok 26. Blok IIR filtra	42
Obrázok 27. Vlnka Daubechies4 a jej škálová funkcia [19].....	43
Obrázok 28. Podprogram <i>Vlnková transformácia</i> a funkcie WT <i>Daubechies4</i>	43
Obrázok 29. Podprogram <i>Odstránenie fázového posunu</i> a funkcia <i>Pulse Measurements</i>	44
Obrázok 30. Podprogram SNR	44
Obrázok 31. Podprogram <i>Plávajúci priemer</i>	45
Obrázok 32. Ukážka zašumeného sínusového signálu.....	46

Obrázok 33. Ukážka zašumeného obdĺžnikového signálu.....	47
Obrázok 34. Sínusový signál, potlačenie šumu pomocou FIR_1, IIR_1 a WT_1	49
Obrázok 35. Obdĺžnikový signál, potlačenie šumu pomocou FIR_2, IIR_2 a WT_1	50
Obrázok 36. Obdĺžnikový signál, potlačenie šumu pomocou FIR_1 a IIR_1	52
Obrázok 37. Nesprávne nastavené vlastnosti filtra	52
Obrázok 38. Výsledok vlnkovej transformácie pri $Prah = 8$	53

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1. Porovnanie vlastností číslicových filtrov typu FIR a IIR [2]	23
Tabuľka 2. Porovnanie účinností jednotlivých metód na zadanom sínusovom signále.....	49
Tabuľka 3. Porovnanie účinností jednotlivých metód na zadanom obdĺžnikovom signále.....	51

1 ÚVOD

Táto práca sa zaoberá spôsobmi potlačenia aditívneho šumu v danom signáli, pomocou využitia číslicových filtrov (FIR, IIR) a vlnkovej transformácie. Na túto problematiku nám slúži viacero programovacích prostredí, ktoré nám zjednodušia prácu s potlačovaním aditívneho šumu. Zo zadania mám na výber medzi programami LabVIEW a MATLAB, z ktorých som si vybral LabVIEW.

V dnešnej dobe sa do popredia dostáva spracovanie signálov, je to významné a rýchlo sa rozvíjajúce odvetvie, ktoré nachádza uplatnenie v rôznych oblastiach ľudských činností. Ide prevažne o audiovizuálnu a telekomunikačnú techniku cez spracovanie výsledkov merania a identifikáciu systémov v strojnej, stavebnej, alebo chemickej technike, v lekárstve a biomedicínskej oblasti atd. [1] Avšak merané signály sú v praxi zmesou užitočného signálu a šumu, preto je veľmi dôležité, aby tieto signály boli zašumené v čo najmenšej miere.

Pri odstraňovaní šumu sa metódy vyberajú podľa charakteristiky šumu a signálu, pričom v praxi sa za rôznych okolností stretneme s rôznymi typmi šumu, no ja sa však budem zaoberať najčastejším šumom a to aditívnym. Na odstránenie tohto šumu mám dané diskrétné lineárne filtre FIR, IIR a vlnkovú transformáciu, kde každá z menovaných môže byť navrhnutá viacerými spôsobmi, čím sa taktiež zaoberá táto práca.

Cieľom práce je tak vytvoriť program, ktorý bude demonštrovať práve využitie FIR filtra, IIR filtra a vlnkovej transformácie na potlačenie aditívneho šumu v generovaných signáloch.

2 ADITÍVNY ŠUM

Aditívny šum predstavuje jeden z najčastejšie sa vyskytujúcich šumov, ide o šum, ktorý je k užitočnému signálu pričítaný. Tento šum môže byť spôsobený elektronickými obvodmi, v odporoch, zosilňovačoch, pri AD prevodníkoch a takisto aj pomocou tepla a rušivých signálov.

Model aditívneho šumu je možné zjednodušene definovať nasledovne [14]

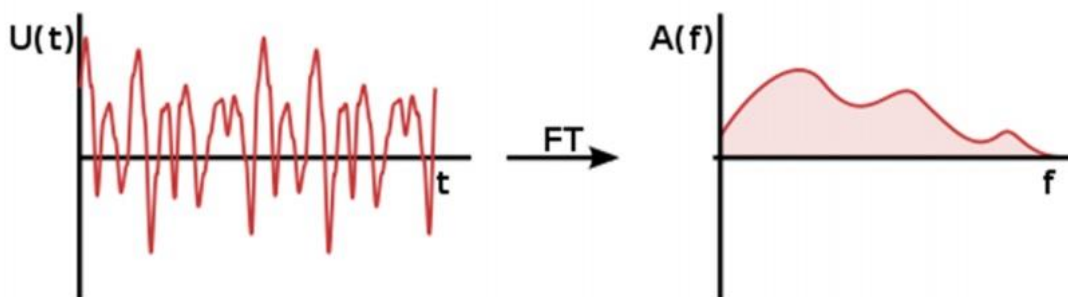
$$x_i = s_i + n_i \quad (1)$$

x je nameraný signál, s užitočný signál, n aditívny šum a i je počet vzorkov.

Všeobecne je šum stochastický (takmer náhodný) signál, a teda ho nie je možné popísať rovnicou, ale pomocou sady parametrov (SNR, rozdelenie hustoty pravdepodobnosti, prípadne štatistické hodnoty ako smerodajná odchýlka a rozptyl) [3][13].

Vlastnosti šumu [13]:

- nie je periodický, tzn. neobsahuje harmonické zložky (Obr. 1. vľavo),
- spektrum spojitého signálu šumu je spojité (Obr. 1. vpravo).



Obrázok 1. Priebeh signálu šumu a jeho frekvenčné spektrum [13]

2.1 Rozdelenie hustoty pravdepodobnosti

Rozdelenie hustoty pravdepodobnosti (Probability Density Function – PDF) sa definuje pre náhodne spojité veličiny, čím šum je. Všeobecne je PDF funkcia $f(x)$ podobná histogramu s rozdielom, že histogram je konečného počtu hodnôt. Pre predstavu – náhodná veličina (šum) X má hodnoty na intervale (a, b) . Ak sa tento interval rozdelí na mnoho subintervalov a následne sa uskutoční veľký počet experimentov a zaznamená sa počet výskytov veličiny X v jednotlivých subintervaloch, tak výsledné grafické znázornenie bude histogram. Pri určitých predpokladoch tento histogram konverguje (približuje sa) k funkcii $f(x)$, ktorá je hustotou pravdepodobnosti

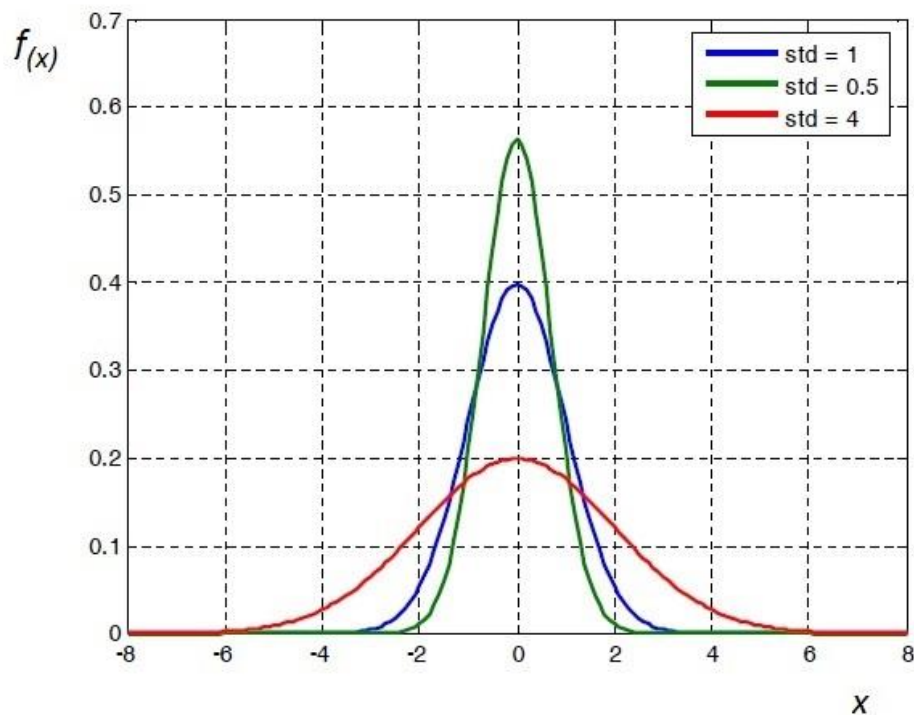
X . Táto funkcia je nezáporná a medzi ňou a osou x je integrál plochy rovný 1. PDF mimo interval (a, b) je nulová.

2.1.1 Rozdelenie šumu

Podľa hustoty rozdelenia pravdepodobnosti šum rozdeľujeme do troch skupín [13]:

- biely šum - rovnomerné rozdelenie, obsahuje všetky frekvencie
- náhodný šum - ide o nezávislý šum typu "sůl a pepř"
- Gaussov šum – normálne (Gaussove) rozdelenie, ide o závislý šum

Najčastejšie vyskytujúcim sa šumom je práve Gaussov šum, ktorého rozdelenie hustoty pravdepodobnosti je znázornené na (Obr. 2) s rôznou smerodajnou odchýlkou (std).



Obrázok 2. Hustota pravdepodobnosti Gaussovho (normálneho) rozdelenia [3]

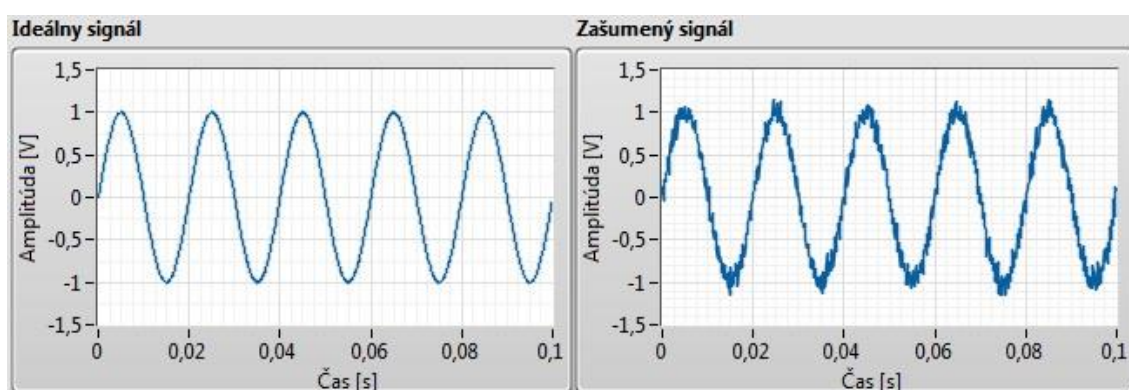
2.2 Pomer signál/šum

Pre vyhodnocovanie potlačenia šumu je užitočný parameter SNR (signal to noise ratio). Často sa vyjadruje v dB , pretože väčšina signálov má veľký dynamický rozsah. SNR sa určuje

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad [dB], \quad (2)$$

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{U_s}{U_n} \right) \quad [dB], \quad (3)$$

kde P je výkon a U je efektívna hodnota. Index s predstavuje signál a index n predstavuje šum. Čím väčší je výsledok SNR , tým je lepšie potlačený šum.



Obrázok 3. Sínusový signál bez a s šumom

Na (Obr. 3) vľavo je znázornený ideálny sínusový signál a na pravej strane je signál po pridaní aditívneho Gaussovho šumu. Parametre signálu vpravo:

- frekvencia signálu $f = 50 \text{ Hz}$
- vzorkovacia frekvencia $f_{vz} = 10 \text{ kHz}$
- amplitúda $U = 1 \text{ V}$
- pomer signálu k šumu $SNR = 20 \text{ dB}$

3 FILTRÁCIA

Filtrácia nám predstavuje spracovanie signálu, slúžiace k výberu určitých zložiek (užitočný signál) zo zmesi viacerých signálov a k potlačeniu zložiek iných (šum). Všeobecne možno filtráciu chápať ako prostriedok, ktorý umožňuje meniť vlastnosti jednotlivých zložiek [1].

Konkrétne v elektrotechnike nám filtrácia slúži na zmenu spektra výstupného signálu, t.j. odstránenie jednej, alebo viacerých rušivých frekvenčných zložiek zo spektra.

3.1 Filtre

S pokrokom číslicovej techniky sa filtre ako také vyvinuli z jednoduchých pasívnych elektronických súčiastok (R,L,C) na filtre, ktoré sú riešené softvérovo. Filtre sa podľa realizácie a spojitosti v čase rozdeľujú na analógové (spojité) a číslicové (diskrétné).

Vlastnosti analógových filtrov sú:

- vysoký amplitúdový a frekvenčný rozsah,
- lacnejšie,
- popisované pomocou modelov spojitých sústav – vyjadrenie prenosu Laplaceovou transformáciou (LT), výpočet spektra Fourierovou transformáciou (FT) [4][5].

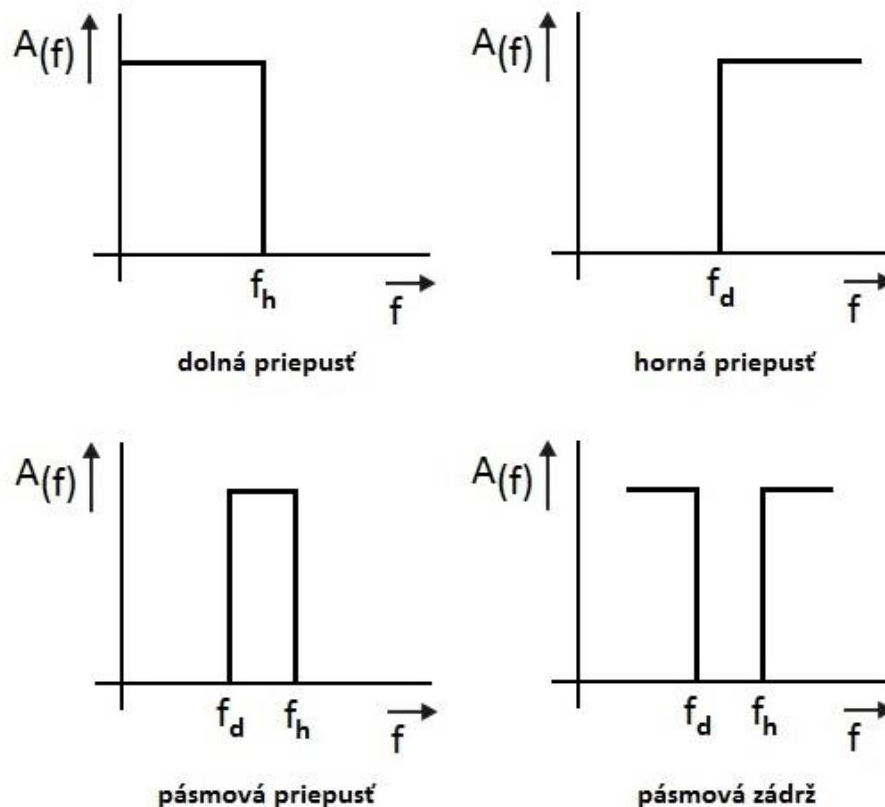
Vlastnosti číslicových filtrov sú:

- vysoká presnosť,
- rýchlosť,
- nemajú drift,
- adaptívna filtrácia,
- popisované pomocou modelov diskretných sústav – vyjadrenie prenosu Z-transformáciou, výpočet spektra diskretnou Fourierovou transformáciou (DFT) [4][5].

Číslicové filtre vďaka svojim vlastnostiam a širšiemu spektru využitia nahradili v určitých prípadoch analógové filtre. Využitelnosť analógových filtrov sa tak zúžila na tradičné oblasti (keď je potreba filtrovať všetky možné frekvencie a nebyť limitovaný vzorkovacou frekvenciou), v ktorých diskretné metódy nemôžu konkurovať [1].

Analógové a číslicové filtre sa ďalej delia podľa prenášaného frekvenčného pásma (Obr. 4):

- dolná priepusť (DP) – filteruje vysoké frekvencie,
- horná priepusť (HP) – filteruje nízke frekvencie,
- pásmová priepusť (PP) – prepúšťa vybrané frekvencie,
- pásmová zádrž (PZ) – filteruje vybrané frekvencie [5].



Obrázok 4. Ideálne frekvenčné charakteristiky DP, HP, PP, PZ [5]

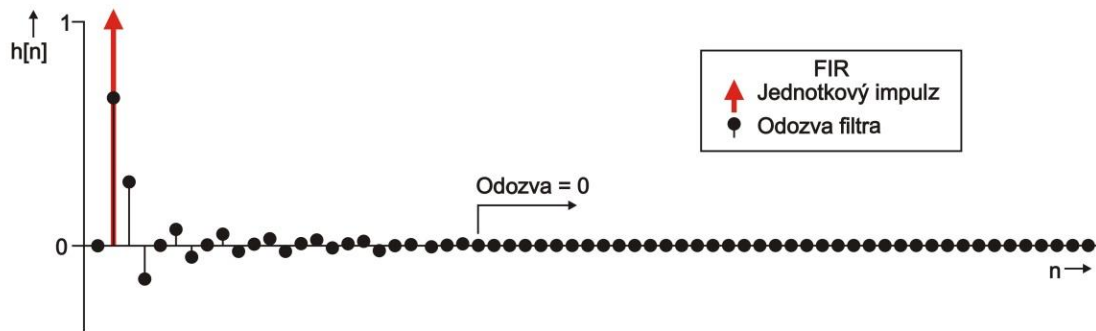
Táto práca sa však zaoberá číslicovými filtermi a preto sa ďalej problematikou analógových filtrov nebudem zaoberať.

3.2 Číslicové filtre

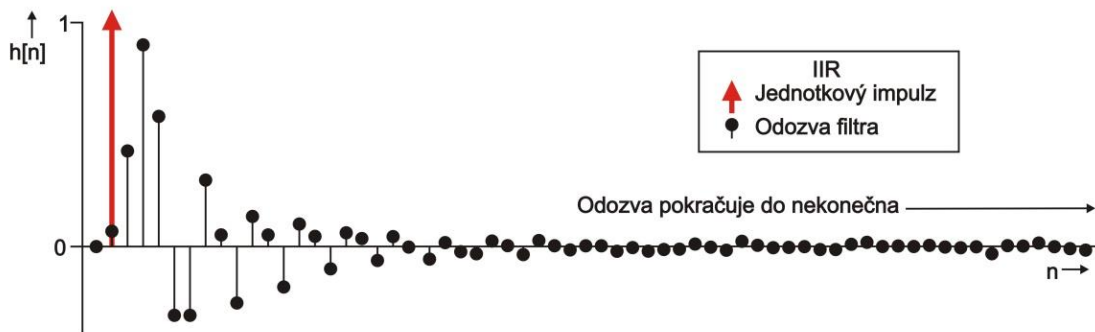
Číslicové filtre je možné rozdeliť podľa viacerých vlastností, nižšie uvedené rozdelenia patria k základným.

- Podľa dĺžky impulznej odozvy $h(n)$:
 - filtre s konečnou impulznou odozvou - FIR (Obr. 5),
 - filtre s nekonečnou impulznou odozvou - IIR (Obr. 6).

- Podľa štruktúry blokovej schémy:
 - rekurzívne filtre (majú spätnú väzbu - IIR),
 - nerekurzívne filtre [5].



Obrázok 5. Impulzná odozva FIR filtra [9]

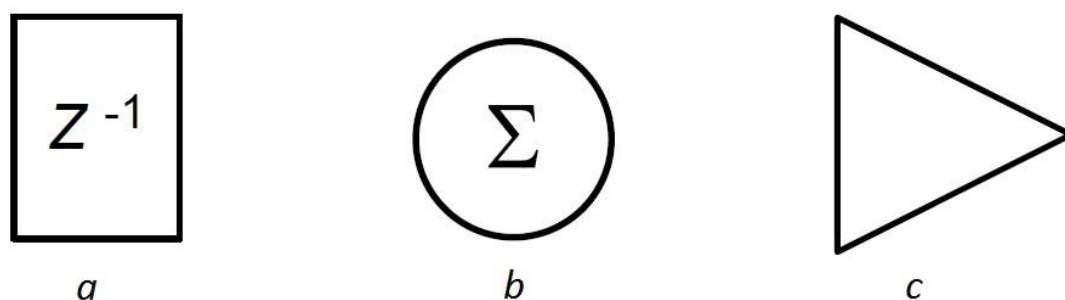


Obrázok 6. Impulzná odozva IIR filtra [9]

Pre potlačenie aditívneho šumu sa zameriam na číslicové filtre typu FIR a IIR. Tieto lineárne časovo invariantné (nezávislé) filtre sú hlavnou aplikáciou diskretných lineárnych systémov. Teda vždy realizujú konvolúciu medzi svojou impulznou charakteristikou a vstupným signálom, pričom je možné ich rovnocenne charakterizovať v časovej, frekvenčnej oblasti, alebo z-oblasti [1].

Pre doplnenie predstavy o filtroch budem v práci uvádzať aj blokové schémy filtrov prevzaté z [2][4][5][10]. Matematický model väčšiny číslicových filtrov je možné zostaviť z troch základných blokov (Obr. 7):

- oneskorovací člen (Obr. 7-a),
- sčítacia (Obr. 7-b),
- násobička (Obr. 7-c).



Obrázok 7. Základné bloky filtrov [4][5]

3.3 FIR filter

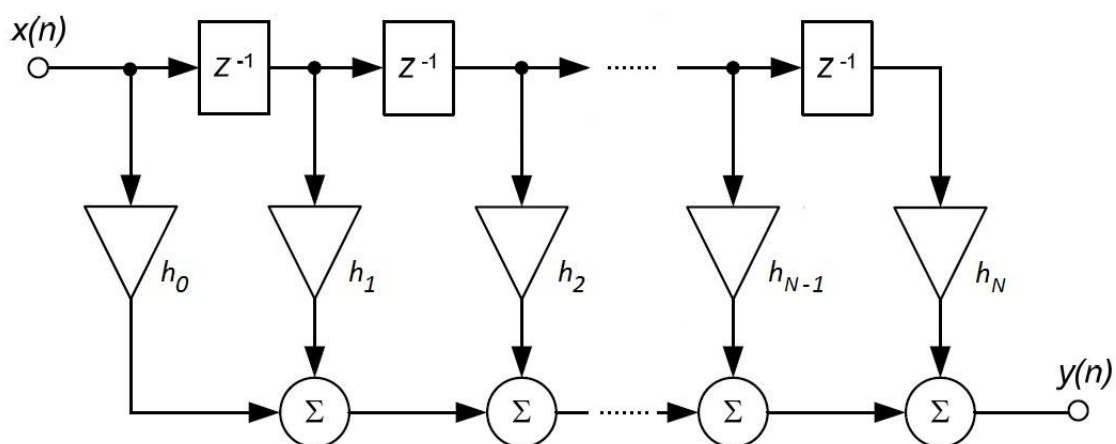
Filtre s konečnou impulznou charakteristikou (FIR – Finite Impulse Response) sú filtermi matematicky jednoduchšie opísateľnými ako IIR filtre, pretože sú väčšinou realizované nerekurzívne (nemajú spätnú väzbu). Pri nerekurzívnej realizácii má filter všetky póly v počiatku, čo mu zaručuje stabilitu. Medzi základné vlastnosti FIR filtrov je okrem stability aj možnosť získať lineárnu fázovú kmitočtovú charakteristiku v celom kmitočtovom rozsahu, vid'. Obr. 9 [2] [6].

Diferenčná rovnica FIR filtra, ktorá vyjadruje diskretnú konvolúciu

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_{n-k} h_k, \quad (4)$$

v ktorej y_n je výstupný signál, x_n je vstupný signál, N je rad filtra a h_k sú koeficienty diferenčnej rovnice.

Bloková schéma FIR filtra je uvedená na (Obr. 8).



Obrázok 8. Bloková schéma FIR filtra (priama forma) [4] [5]

Na základe uvedenej diferenciálnej rovnice je obrazový prenos filtra v rovine z

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n z^{-n}, \quad (5)$$

kde h_n sú koeficienty filtra. Z rovnice (5) vyplýva, že reprezentácia filtra je daná iba nulovými bodmi (násobný pól v počiatku vyjadruje iba oneskorenie, resp. fázový posun) [1].

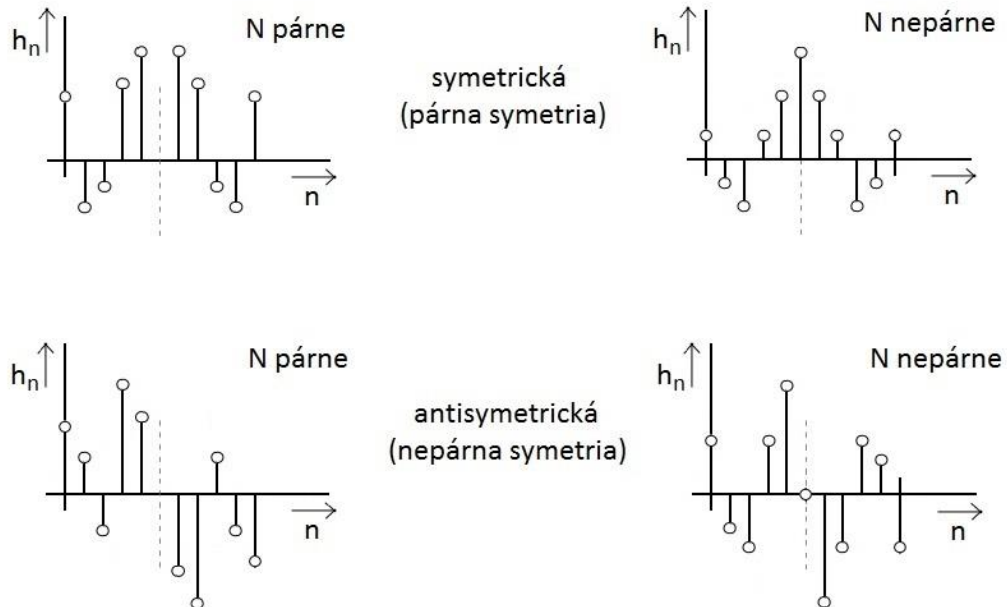
Úpravou rovnice (5) sa dá získať frekvenčná charakteristika, ktorá je zrejme periodickou funkciou s periódou $2\pi/T$ a je vyjadrená Fourierovou radou.

$$G(\omega) = H(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n e^{-j\omega n T} \quad (6)$$

V praxi sa obvykle požaduje, aby fázová charakteristika FIR filtrov bola presne lineárna. K tomu postačuje, aby impulzná charakteristika systému spĺňala jednu z podmienok

$$h_n = h_{(N-1-n)}, \quad h_n = -h_{(N-1-n)}, \quad (7)$$

kde prvá rovnosť platí pre symetrickú impulznú charakteristiku (Obr. 9. prvý riadok) a druhá pre antisymetrickú impulznú charakteristiku (Obr. 9. druhý riadok) [1].



Obrázok 9. Príklady impulzných charakteristík FIR filtrov s lineárnou fázou [1]

3.3.1 Metódy návrhu FIR filtrov

Medzi základné metódy návrhu FIR filtra patria hlavne:

- metóda vzorkovania frekvenčnej charakteristiky,
- metóda váhovania impulznej charakteristiky (metóda okienka).

3.3.1.1 Metóda vzorkovania frekvenčnej charakteristiky

Návrh filtra spočíva vo výpočte N koeficientov impulznej charakteristiky h_n , z ktorej sa konvolúciou odvodí algoritmus výpočtu odozvy systému y_n , vid'. vzorec (4). Vychádza sa z tvrdenia, že vzorky jednej periódy spojitej frekvenčnej charakteristiky diskrétného systému možno vypočítať ako diskrétnu Fourierovu transformáciu - $DFT\{h_n\}$, vid'. vzorec (8).

$$G(k\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n e^{-jk\Omega nT}, \quad \Omega = \frac{2\pi}{NT}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (8)$$

Obvykle je zadaná požadovaná frekvenčná charakteristika $G(\omega)$ v intervale $\langle 0, \omega_s \rangle$, kde ω_s je uhlová vzorkovacia frekvencia. Tento interval sa rozdelí na zvolený počet N subintervalov a následne odčíta N hodnôt frekvenčnej charakteristiky v uzlových bodoch delenia. Nasledovnou spätnou $DFT\{G(k\Omega)\}$ sa získa postupnosť g_n . Ak sa však navrhuje lineárny filter, musí splniť podmienku lineárnosti (7). Teda postupnosť h_n sa získa prerovnaním postupnosti g_n , tzn., že napr. pri N nepárnom sa vzorky $g((N+1)/2), \dots, g(N-1)$ presunú pred $g(0)$.

Posledným voliteľným krokom je kauzalita filtra (výstup filtra závisí iba na súčasných a minulých hodnotách vstupu), ktorú možno doceliť oneskorením impulznej charakteristiky o $(N+1)/2$ taktu [1] [7].

3.3.1.2 Metóda váhovania impulznej charakteristiky (metóda okienka)

Návrh filtra pomocou tejto metódy vychádza zo znalosti neobmedzene dlhej impulznej charakteristiky h_d , ktorá presne popisuje požadovaný filter. Vzhľadom na to, že sú požiadavky na filter špecifikované vo frekvenčnej oblasti, tak prvým krokom je výpočet žiaducej frekvenčnej charakteristiky G_d , ako diskrétnu časovú Fourierovu transformáciu - $DTFT\{h_d(nT)\}$, tj.

$$G_d(\omega) = H_d(e^{j\omega T}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_d(n) e^{-j\omega nT}. \quad (9)$$

Táto frekvenčná charakteristika je periodická s periódou $\omega_s = 2\pi/T$, pričom koeficienty $h_d(n)$ sú hodnoty (všeobecne nekauzálne a neobmedzené) impulznej charakteristiky h_d . Tieto koeficienty je možné presne stanoviť pomocou vzťahu pre výpočet koeficientov Fourierovej rady

$$h_d(n) = \frac{T}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} G_d(\omega) e^{-j\omega nT} d\omega. \quad (10)$$

Následne dochádza k obmedzeniu dĺžky nekonečnej impulznej charakteristiky h_d , konečným signálom – tzv. oknom $w(t)$ o zvolenom rozsahu N . Toto obmedzenie sa docieli konvolúciou spektier G_d a W , kde výsledok konvolúcie je výsledná frekvenčná charakteristika filtra.

Pri návrhu je dôležitá voľba typu okna s priaznivými spektrálnymi vlastnosťami. Často používané typy okien sú Hannové, Hammingové, Blackmannové, pravouhlé, trojuholníkové, a pod. Viac o týchto jednotlivých oknách a ich vlastnostiach je možné dočítať sa v [2]. V LabVIEW je možné použiť 19 typov okienok [17].

3.4 IIR filter

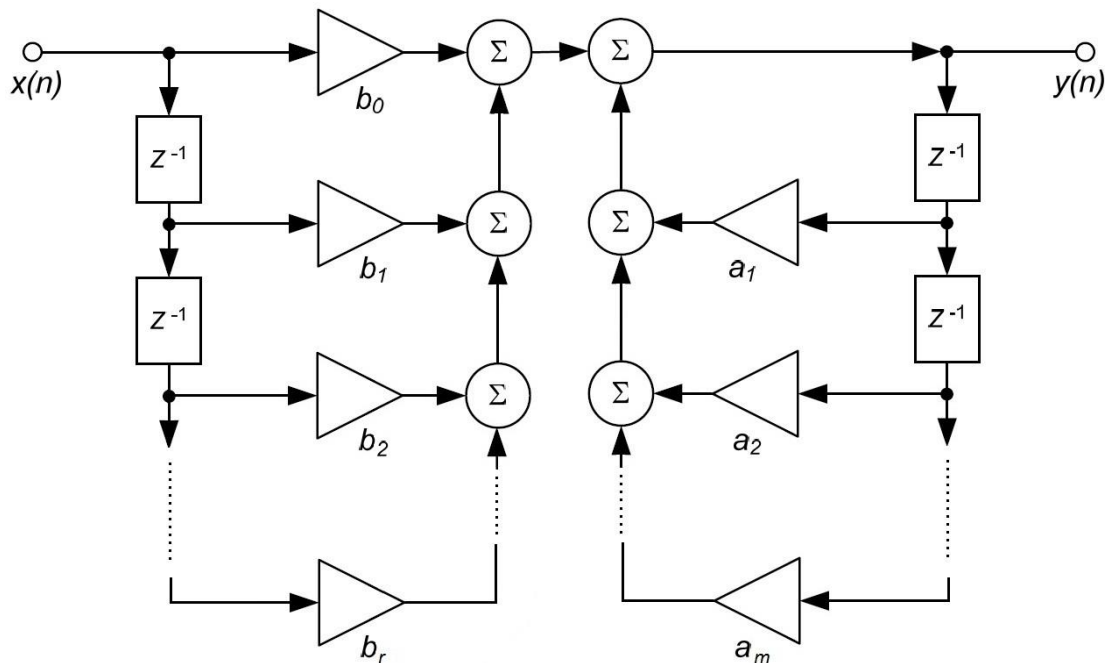
Filtre s nekonečnou impulznou charakteristikou (IIR – Infinite Impulse Response) vznikli ako číslicové varianty analógových filtrov. Sú matematicky zložitejšie ako FIR filtre, pretože sú realizované rekurzívne (vždy obsahujú spätnú väzbu). Oproti FIR filtrom však nie je treba tak veľký počet oneskorovacích členov a preto je možné ho použiť aj na kratšie dáta (inicializácia nie je tak dlhá) [8].

IIR filtre sú popísané rekurzívnymi diferenčnými rovnicami v tvare

$$y_n = \sum_{i=0}^r b_i x_{n-i} - \sum_{i=1}^m a_i y_{n-i}, \quad (11)$$

kde y_n je výstupný signál, x_n je vstupný signál, b_i a a_i sú systémové koeficienty v dopredných a spätných väzbách, r je počet oneskorovacích členov v nerekurzívnej časti a m je počet oneskorovacích členov v rekurzívnej časti, ktorý súčasne udáva aj rad systému (spravidla je $r \leq m$) [5].

IIR filtre majú všeobecne väčší počet zapojení ako FIR práve pre ich rekurzívnu časť. Jedna z blokových schém IIR filtra je uvedená na (Obr. 10).



Obrázok 10. Bloková schéma IIR filtra [4] [5]

Prenosová funkcia v rovine z je daná podielom polynómov, prípadne vyjadrením polynómov ako súčinu koreňových činiteľov

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^r b_i z^{m-i}}{\sum_{i=0}^m a_i z^{m-i}} = A \frac{\prod_{i=1}^r (z - n_i)}{\prod_{i=1}^m (z - p_i)}, \quad (12)$$

pričom $a_0 = 1$, A predstavuje zosilnenie, n_i sú nulové body a p_i sú póly. Pri nevhodnom návrhu IIR filtrov môžu byť nestabilné, a tak aby bol filter stabilný, musia ležať všetky póly vnútri jednotkovej kružnice. Zo vzťahu je možné odvodiť frekvenčnú charakteristiku

$$G(\omega) = H(e^{j\omega T}), \quad (13)$$

ktorá je daná hodnotami na jednotkovej kružnici [1][2].

3.4.1 Metódy návrhu IIR filtrov

Základné metódy návrhu IIR filtrov sa delia na dve skupiny:

- metódy založené na podobnosti s analógovými systémami,
- optimalizačné metódy (metódy priameho návrhu).

3.4.1.1 Metódy založené na podobnosti s analógovými systémami

Pri návrhu číslicových filtrov sa najčastejšie používajú metódy, ktoré vychádzajú z analógových prototypov. Využívajú súvislosti medzi Laplaceovou a Z-transformáciou [2]. Tu sa radia metódy ako bilinéarna transformácia, transformácia nulových bodov a pólov, transformácia frekvenčných charakteristík diskretných systémov, impulzná variácia, apod. Medzi známe a základné typy filtrov patria Butterworthové, Besselové, Čebyševové alebo Caerové. Jednotlivé metódy návrhu a popis konkrétnych filtrov sú bližšie popísané v [1][2].

3.4.1.2 Optimalizačné metódy

Sú metódy priameho návrhu, bez návaznosti na analógové systémy. Medzi tieto metódy patria hlavne optimalizačné návrhy podľa frekvenčnej a impulznej charakteristiky, tak isto aj interaktívne rozmiestňovanie núl a pólov, apod. Tieto metódy sa však vďaka výpočtovej náročnosti používajú hlavne vo vybraných prípadoch, kde je treba dosiahnuť lepšie výsledky ako z kap. 3.4.1.1. Jednotlivé metódy návrhu sú bližšie popísané v [1][2].

3.5 Porovnanie vlastností FIR a IIR filtrov

Prehľadné porovnanie vlastností číslicových filtrov typu IIR a FIR je uvedené v (Tab. 1).

Tabuľka 1. Porovnanie vlastností číslicových filtrov typu FIR a IIR [2]

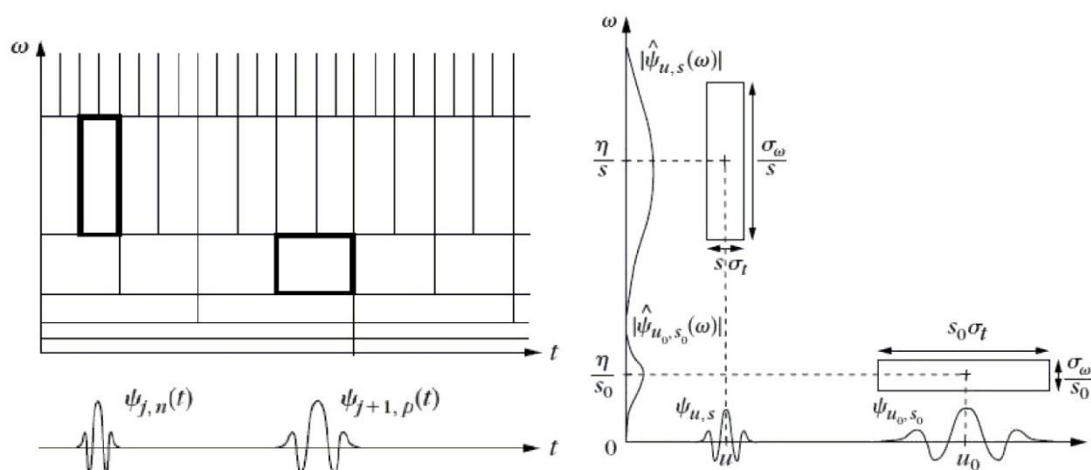
Číslicové filtre typu FIR		Číslicové filtre typu IIR	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
Sú vždy stabilné.	Veľký rád prenosovej funkcie.	Malý rád prenosovej funkcie.	Problémy so stabilitou.
Môžu mať lineárnu fázovú kmitočtovú charakteristiku.	Veľké meškanie pri spracovaní vstupného vzorku.	Malé meškanie pri spracovaní vstupného vzorku.	Nemôžu mať lineárnu fázovú kmitočtovú charakteristiku v celom rozsahu.
Majú menšiu citlivosť na kvantovanie koeficientov stavových premenných.	Veľké nároky na pamäť pri výpočte koeficientov a stavových premenných.	Malé nároky na pamäť pri výpočte koeficientov a stavových premenných.	Vplyvom spätných väzieb väčšia náchylnosť k saturácii aritmetiky procesoru.
Sú vhodné pre adaptívne algoritmy.	Optimálne iteračné metódy sú výpočtovo náročné.	Jednoduché metódy návrhu využívajúce vlastnosti analógových filtrov.	S ťažkosťami ich je možné použiť pre adaptívne spracovanie.
Existuje menšie riziko saturácie aritmetiky procesoru.	Neexistuje plnohodnotný analógový ekvivalent.	K číslicovému filtru je možné nájsť analógový ekvivalent.	Veľká citlivosť na kvantovanie, zvlášť pre selektívne kmitočtové filtre.

4 VLNKOVÁ TRANSFORMÁCIA

Transformácie nám pri spracovaní signálu väčšinou slúžia na získanie nového pohľadu na signál. Pohľadu, z ktorého by sme mohli presnejšie zistiť jeho vlastnosti. Pomocou týchto vlastností tak dokážeme účinnejšie spracovať signál (kratší čas spracovania, menšia používaná pamäť, apod.).

Veľmi známou transformáciou je diskretná Fourierova transformácia (DFT), ktorá je vďaka algoritmu rýchlej Fourierovej transformácie (FFT) často používanou transformáciou v oblasti spracovania signálov. Prostredníctvom DFT a klasickej Fourierovej transformácie (FT) získame informácie v kmitočtovej oblasti (ktoré frekvencie sa v signále nachádzajú), avšak nezískame informácie o ich umiestnení (polohe) v čase. Na základe toho bola vyvinutá krátkodobá Fourierova transformácia (STFT), ktorá v čase ohraničí krátky úsek signálu a umožní z neho určovať spektrum. Ukázalo sa však, že nevýhodou STFT je pri konštantnom časovom úseku (okne) jeho rozlíšiteľnosť (pri malom okne veľká rozlíšiteľnosť v čase a malá vo frekvenciách, pri veľkom okne veľká rozlíšiteľnosť vo frekvenciách a malá v čase) [10].

V osemdesiatych rokoch sa objavili nové transformácie, ktoré boli viac lokálne, tzn., že bol novým spôsobom formulovaný popis s vhodnou kombináciou časovej a frekvenčnej informácie [2]. Tieto transformácie sa nazývajú vlnkové transformácie (Wavelet transform - WT). Ideou WT je vhodná zmena šírky "okna" v čase a jeho tvarom dosiahnuť optimálny pomer rozlíšiteľnosti v čase a frekvenciách (pre nízke frekvencie "okno" širšie, pre vysoké užšie) vid'. obr. 11. Toto "okno" sa nazýva materská vlnka ψ (vid'. kapitola 4.1) [10].



Obrázok 11. Príklad teoretického a Heisenbergovho časovo-frekvenčného umiestnenia vlniek [15]

WT je tak všeobecne chápaná ako časovo-frekvenčný rozklad signálu, teda dáva informáciu nielen o frekvenciách, ale aj o jej umiestnení v čase. Tým sa môže zdať, že je WT rovnaká ako STFT, napriek tomu sa však líšia v niektorých aspektoch:

Vlnková transformácia:

- nastaviteľná dĺžka okna,
- je možné extrahovať koeficienty vybranej frekvencie,
- potlačuje šum,
- výstupom je skalogram (angl. scalogram).

Krátkodobá Fourierova transformácia:

- konštantná časová dĺžka okna,
- nie je možné extrahovať koeficienty vybranej frekvencie,
- nepotlačuje šum,
- výstupom je spektrogram (angl. spectrogram) [12].

Základným delením WT sa rozumie:

- spojitá vlnková transformácia (CWT),
- diskretná vlnková transformácia (DWT).

Diskrétna realizácia WT (diskretná vlnková transformácia a diskretná časová vlnková transformácia) môžu byť realizované v podobe rýchlych algoritmov pomocou banky filtrov, ktorá úzko súvisí s číslicovou filtráciou [11].

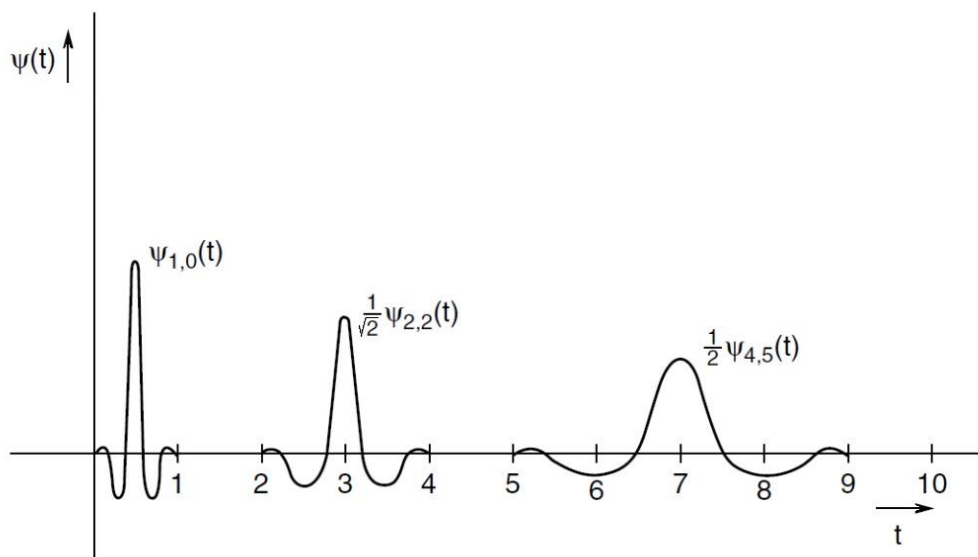
4.1 Materská vlnka

Materská vlnka nám slúži na analýzu signálu. Je definovaná ako funkcia, ktorá je ohraničená v časovej oblasti, no vďaka posúvaniu jednotlivých vlniek pokrýva celý analyzovaný signál (čím je zachovaná úplná informácia). Jednotlivé vlnky sú odvodené z pôvodnej materskej vlnky $\psi(t)$ podľa vzťahu

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right), \quad a \neq 0 \quad (14)$$

kde parameter a je dilatácia vlnky určujúca frekvenčné spektrum vlnky, teda s meniacim sa parametrom a sa mení spektrum vlnky aj jej stredný kmitočet. Parameter b je časový posun vlnky (translácia). Konštanta $\frac{1}{\sqrt{a}}$ normalizuje energiu jednotlivých vlniek pri zmene mierky. Znak pri materskej vlnke $*$ znamená, že ide o komplexne združenú funkciu, pretože vlnky môžu byť komplexné. Funkcia $\psi(t)$ musí mať nulovú

strednú hodnotu, pričom tvarom často pripomína vlnku, čo je vlastne dôvod pomenovania [1][10][11].



Obrázok 12. Materská vlnka a jej modifikácie [1]

Medzi najčastejšie využívané vlnky patria Mexican hat, Morletova vlnka, Meyerova vlnka, Haarova vlnka a vlnka Daubechies. Viac o týchto jednotlivých vlnkách, či výbere vlnky je možné dočítať sa v [10].

4.2 Spojitá vlnková transformácia

Spojité vlnková transformácia (Continuous Wavelet Transform - CWT) je definovaná rovnicou ako

$$y(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (15)$$

Jedná sa vlastne o koreláciu signálu $x(t)$ s vlnkami odvodenými z materskej vlnky (14). Cez túto transformáciu sa mení vyjadrenie pôvodnej funkcie s jedným parametrom $x(t)$ na výslednú funkciu s dvoma parametrami $y(a, b)$, čo nám umožňuje vykonať časovo-frekvenčnú analýzu [11].

4.2.1 Vlastnosti spojitej vlnkovej transformácie

Medzi vlastnosti spojitej vlnkovej transformácie patria:

- lineárnosť,
- invariancia (nemennosť) v čase,
- dilatácia [10].

4.2.1.1 Lineárnosť

$$(l_1 y_1 + l_2 y_2)(a, b) = l_1 y_1(a, b) + l_2 y_2(a, b) \quad (16)$$

Lineárnosť nám zaručuje princíp superpozície, tzn. transformácia dvoch a viacerých prvkov je rovnaká ako súčet transformácií jednotlivých prvkov. Ak by však princíp superpozície neplatil, išlo by o nelineárnu metódu spracovania signálov [2], l_1, l_2 sú reálne čísla.

4.2.1.2 Invariancia v čase

Invariancia v čase popisuje, že posun analyzovanej funkcie po časovej osi spôsobí rovnaký posun vlnkových koeficientov po osi polohy. Pri diskkrétnej vlnkovej transformácii sa táto vlastnosť stráca [10].

4.2.1.3 Dilatácia

Popisuje závislosť medzi spojitou vlnkovou transformáciou originálnej funkcie a jej rozťahnutou, či zúženou podobou. Vo vlnkových koeficientoch (a, b) dôjde k rozťahnutiu v osi polohy a k posunu v osi mierky [10].

4.3 Diskrétna vlnková transformácia

Diskrétna vlnková transformácia (Discrete Wavelet Transform - DWT) je diskrétnou transformáciou signálu so spojitým časom. Vlnkové koeficienty z (15) sa menia na $a = a_0^m$ a $b = a_0^m kT$, kde $a_0 > 1$, $T > 0$. Parametre m, k sú celočíselné.

Konkrétnym prípadom tohto typu transformácie je dyadická DWT, ktorej parametre $a_0 = 2$ a $m > 0$, potom koeficienty dyadickej DWT sú

$$y(m, k) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*(2^m t - kT) dt, \quad (17)$$

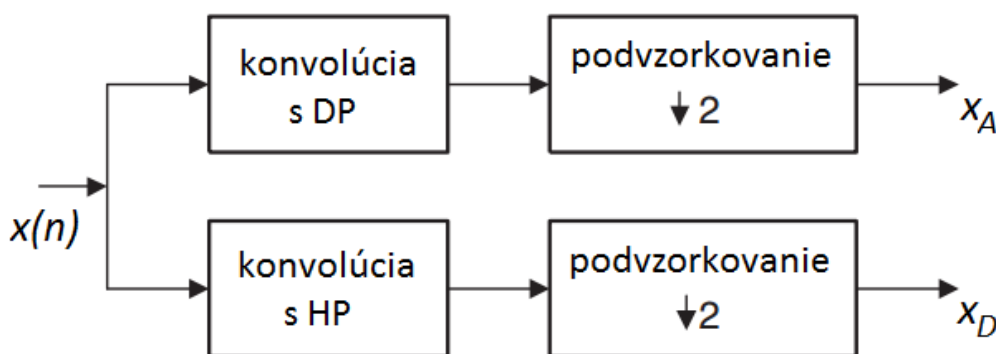
kde index m je kmitočtová mierka a index k je časová mierka. Konštanta T závisí na šírke pásma materskej vlnky B . Dyadická DWT je charakterizovaná oktávovou podobou spektier sústavy. S rastúcim m sa krok posunutia a zväčšuje 2^m násobne. Výsledok je množina koeficientov $y(m, k)$, ktoré sú nerovnomerne rozložené v časovo-mierkovej rovine. V praktických aplikáciách býva tento integrál počítaný numerickou metódou [11].

Úpravou (17) môžeme dyadickú DWT vyjadriť ako

$$y(m, k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h_m(2^m k T - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h_m(\tau) x(2^m k T - \tau) d\tau, \quad (18)$$

z čoho vyplýva možnosť realizovať transformáciu rozkladom signálu, bankou lineárnych spojitých oktávových filtrov s impulznými charakteristikami $h_m(t)$.

Príklad rozkladu signálu je uvedený na (Obr. 13).



Obrázok 13. Jeden krok DWT [10]

Z obrázku je zrejmé, že signál rozdeľujeme do dvoch frekvenčných pásiem (nízko-frekvenčné x_A a vysoko-frekvenčné x_D) a následne mu znížime vzorkovaciu frekvenciu. Tento proces sa nazýva analýzou signálu [1][2][10]. Vlastnosti DWT sú podobné ako v kapitole 4.2.1, až na vlastnosť invariance v čase [10].

4.4 Vlnková transformácia s diskretným časom

Vlnková transformácia s diskretným časom (Discrete Time Wavelet Transform - DTWT) je definovateľná rozkladom (diskretnou konvolúciou) diskretného signálu $x(n)$, bankou diskretných oktávových filtrov s impulznými charakteristikami $h_m(n)$. DTWT je matematicky popísaná

$$y_m(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i) h_m(2^m n - i) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h_m(i) x(2^m n - i), \quad (19)$$

kde funkcia $y_m(n)$ predstavuje dyadickú DTWT a vzorkovacia frekvencia na výstupe m -tého filtra je 2^m krát nižšia, než vzorkovacia frekvencia vstupného signálu $x(n)$ [11].

4.5 Inverzná vlnková transformácia s diskretným časom

Inverzná vlnková transformácia s diskretným časom (Inverse Discrete Time Wavelet Transform - IDTWT) slúži na opätovnú rekonštrukciu signálu. Realizuje sa spätným postupom ako DTWT. Subsignály (koeficienty transformácie) je nutné interpolovať, tj. vložiť medzi susedné vzorky postupnosti nulové vzorky. Následne sa takto upravený signál filtruje rekonštrukčnými filtermi, ktoré musia byť vhodným protikladom korešpondujúceho rozkladového filtra pri DTWT. Aby sme na výstupe získali totožný signál $\hat{x}(n)$ s oneskoreným vstupným signálom $x(n)$, je nutné použiť oneskorovacie členy. Po ich aplikácii ktorých musí platiť [11]

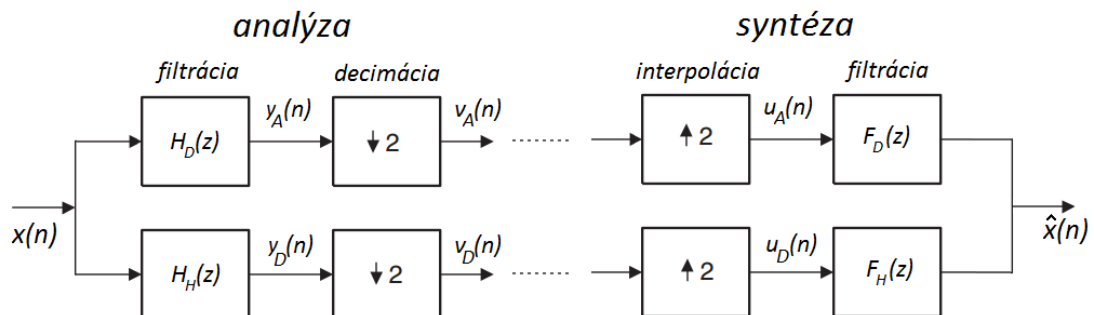
$$\hat{x}(n) = x(n - \tau). \quad (20)$$

4.6 Banky filtrov

Banku filtrov tvorí spojenie niekoľkých číslicových filtrov do skupiny. V základnom zapojení banka pozostáva z dvoch častí (analýzy a syntézy). Analýza sa vykonáva pomocou DTWT a syntéza pomocou IDTWT.

V prvej časti sú filtre, ktoré vykonávajú analýzu. Analýzu vykonávajú tým, že rozdeľujú frekvenčné pásmo napr. pomocou hornej $H_H(z)$ a dolnej $H_D(z)$ priepuste (dvojkanálová banka) vid' obr. 14.. Výsledkom takejto filtrácie sú dva signály, ktoré sú označované ako aproximačná zložka $v_A(n)$ (základné informácie o signále z nízkofrekvenčného pásma) a detailná zložka $v_D(n)$ (details priebehu signálu z vysokofrekvenčného pásma). Toto rozdeľovanie môže pokračovať ďalším delením na subsignály, pričom za každým delením sa signály decimujú s činiteľom 2 (zníži sa ich vzorkovacia frekvencia).

V druhej časti sa vykonáva syntéza, v ktorej sa subsignály spätne interpolujú s činiteľom 2 (zvýši sa ich vzorkovacia frekvencia). Takto upravené signály sa filtrujú pomocou rekonštrukčných filtrov [2][11].



Obrázok 14. Základná bloková schéma dvojkanálovej banky filtrov [2]

4.7 Prahovanie koeficientov

Prahovanie (angl. Thresholding) koeficientov x_n vlnkovej transformácie je dôležitá časť odstraňovania šumu, ktorá je vďaka svojej jednoduchosti a vlastnostiam často využívaná v rôznych aplikáciách. Princíp prahovania v jednoduchosti spočíva v zvolení prahu λ , kde hodnoty $x_n(n) > \lambda$ sa ponechajú a hodnoty $x_n \leq \lambda$ sú vynulované (príp. naopak). Pri odstraňovaní aditívneho šumu prahovaním prichádzame aj o užitočný signál, a tak je nutné vhodne zvoliť prah, aby boli koeficienty šumu vynulované a koeficienty užitočného signálu čo najmenej poškodené [11].

Existuje viacero typov prahovania koeficientov pričom základné často používané typy sú tvrdé a mäkké prahovanie, ktoré sú v BP využité.

4.7.1 Tvrdé prahovanie

Tvrdé prahovanie je najjednoduchšou prahovacíou variantou. Hodnoty x_n menšie a rovné prahu λ sú vynulované, ostatné sú ponechané bez úpravy. Výsledné koeficienty po prahovaní sú odvodené podľa [11]

$$\hat{x}_n = \begin{cases} x_n & \text{pre } |x_n| > \lambda \\ 0 & \text{pre } |x_n| \leq \lambda \end{cases} \quad (21)$$

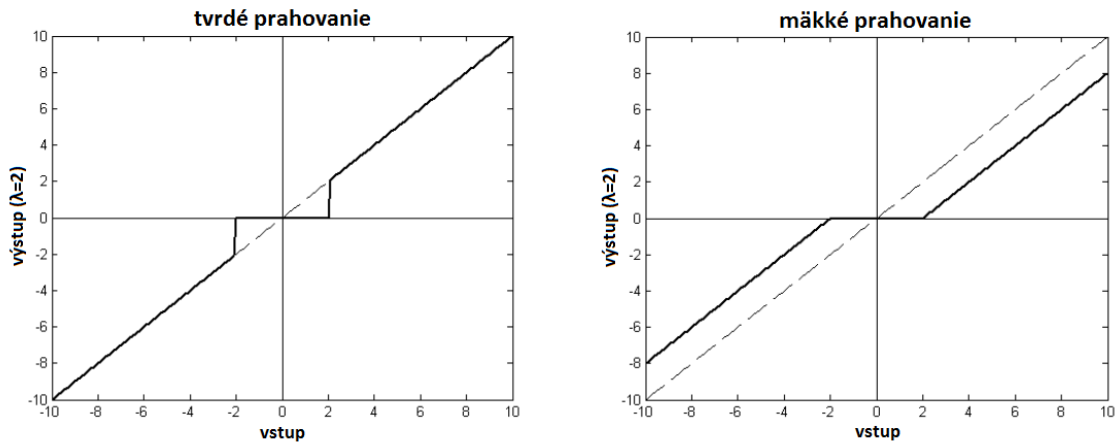
Pri tvrdom prahovaní sa síce podarí relatívne odstrániť šum, avšak dôjde k vzniku skokov vo výslednom signále. Znázornenie tvrdého prahovania koeficientov je uvedené na (Obr. 15).

4.7.2 Mäkké prahovanie

Mäkké prahovanie je taktiež ako tvrdé výpočtovo nenáročné avšak potlačuje skoky, vďaka čomu je viac používanéjšie. Hodnoty x_n menšie a rovné λ sú klasicky vynulované a ostatné hodnoty sú buď navýšene, alebo znížené o hodnotu prahu. Výsledné koeficienty po prahovaní sú odvodené podľa [11]

$$\hat{x}_n = \begin{cases} \text{sign}(x_n)(|x_n| - \lambda) & \text{pre } |x_n| > \lambda \\ 0 & \text{pre } |x_n| \leq \lambda \end{cases} \quad (22)$$

Pre lepšie pochopenie je znázornenie mäkkého prahovania koeficientov uvedené na (Obr. 15).



Obrázok 15. Tvrdé a mäkké prahovanie [11]

4.7.3 Voľba prahu

Voľbu prahu pre úpravu koeficientov je vhodné nastaviť s ohľadom na typ šumu a teda s ohľadom na jeho smerodajnú odchýlku či rozptyl. Ak je úroveň šumu menšia tak aj prahová hodnota je menšia, čím sa znižuje poškodenie signálu. [11]

Existuje celá rada metód na výpočet prahu, ja však uvediem dve zo základných metód (univerzálny prah, empirický prah). Viac o metódach je možné dočítať sa v [11].

4.7.3.1 Univerzálny prah

Prah bol pôvodne odvodený pre biely šum s Gaussovým rozložením [11]

$$\lambda = \sigma * \sqrt{2 \log n}, \quad (23)$$

kde σ je smerodajná odchýlka šumu a n je počet vzorkov.

4.7.3.2 Empirický prah

Pokiaľ nedáva univerzálny prah uspokojivé výsledky, je možné násobiť smerodajnú odchýlku šumu empirickou konštantou K (hodnota získaná pozorovaním, alebo pokusmi), čoho výsledkom je prahová hodnota [11]

$$\lambda = K\sigma. \quad (24)$$

5 NÁVRH SOFTWÉROVÉHO RIEŠENIA

Na návrh a vypracovanie bakalárskej práce som si vybral programovacie prostredie LabVIEW ver. 2014, o ktorom sa môžete podrobnejšie dozvedieť v [18]. Stručný popis je uvedený v podkapitole 5.1.

5.1 LabVIEW

LabVIEW (LV), celým názvom Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench je grafický programovací jazyk, ktorý je založený na myšlienke tzv. virtuálnych prístrojov (VI). Tieto VI (programy, funkcie) sú obdobou skutočných meracích prístrojov a skladajú sa z dvoch základných častí:

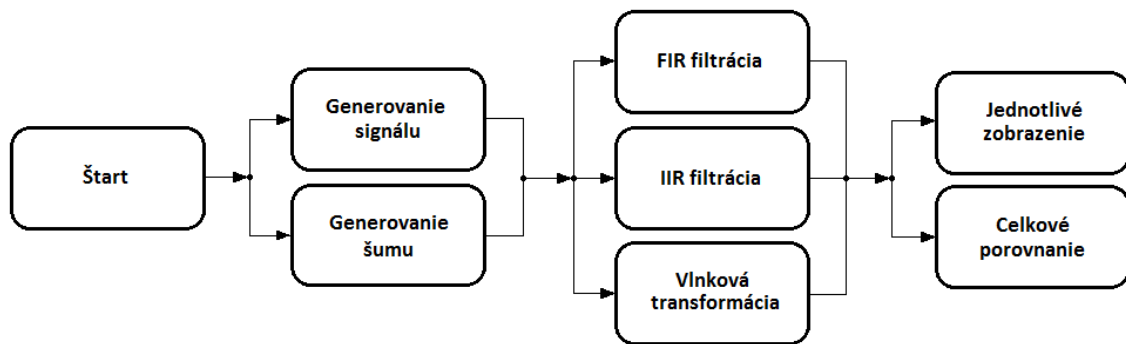
- čelný panel (front panel),
- blokový diagram (block diagram).

Čelný panel slúži na vytvorenie užívateľského rozhrania pomocou paliet nástrojov (tools palette) a paliet ovládacích prvkov a indikátorov (controls palette). Návrh čelného panelu spočíva vo vhodnom umiestnení užívateľských vstupov, t.j. tlačítok, číselných (príp. posuvných či otočných) zadávacích polí, textových výberových polí, apod. Okrem užívateľských vstupov sa na čelnom paneli umiestňujú aj výstupy (indikátory) napr. grafy, textové, číselné, svetelné a iné indikátory. Výsledkom čelného panelu je jeho zobrazenie na užívateľskom monitore do ktorého smie užívateľ zasahovať, a tak riadiť merací proces, za účelom získania požadovaných výsledkov.

Blokový diagram je v prenesenom význame niečo ako zdrojový kód klasických programovacích jazykoch. Blokový diagram slúži na prepojenie daných ovládacích prvkov a indikátorov z čelného panelu pomocou palety funkcií (function palette). Objekty z čelného panelu majú v blokovom diagrame podobu ikon, ktoré sa spolu s funkciami prepájajú vodičmi (wires) o rôznych dátových typoch. Zápis algoritmov v LV sa usporadúva zľava doprava tak, aby vľavo boli vstupy a vpravo výstupy. Paleta funkcií obsahuje veľkú radu funkcií a nástrojov pre čítanie, ukladanie, analýzu, zobrazovanie, matematické a signálové operácie, apod. Takto vytvorený program v grafickom jazyku je nasledovne interne kompilovaný a po spustení je jeho rýchlosť porovnateľná s riešením toho istého problému v jazyku C [16][18].

5.2 Bloková schéma programu

Program vychádza z dvoch základných častí, kde prvou časťou je generovanie signálu spolu so šumom a druhou časťou je potlačovanie šumu vybranou metódou. Štruktúra programu je zobrazená pomocou blokovej schémy na obrázku 16. Na blokovej schéme nie je zaznačený koniec programu a to z dôvodu, že program je možné v ľubovoľnom čase stopnúť, zastaviť a ukončiť.



Obrázok 16. Bloková schéma programu

Návrh a možnosti programu boli volené tak, aby mal užívateľ čo najväčšiu voľnosť v nastavovaní jednotlivých parametrov, s výnimkou určitých nastavení, ktoré viedli k chybovým stavom. Tieto nastavenia boli buď nastavené ako konštanty (platí aj pre nepoužívané vstupy funkcií), alebo im boli nastavené povolené medze.

Keďže navrhnutý program má byť čisto virtuálny nástroj (nemá pracovať s meracou kartou), zvolil som možnosť robiť program, ktorý bude reagovať interaktívne. Túto možnosť som docielil umiestnením celého hlavného programu do "nekonečného" cyklu *while loop*, ktorý je pochopiteľne možné v ľubovoľnom čase pozastaviť a ukončiť. Umiestnenie programu do cyklu má veľkú výhodu, a to vidieť okamžitú zmenu parametrov. Užívateľ tak môže nastavovať hodnoty v povolených medziach a sledovať dopad zvolených nastavení (bez nutnosti opätovného spustenia programu).

Pri realizácii návrhu sa objavila nevýhoda kontinuálnosti programu vo vyhodnocovaní výsledného pomeru signál/šum, kde sa hodnota výsledného SNR pohybovala v rozmedzí $\pm 10dB$. Navrhnutým riešením tohto problému bol plávajúci priemer, ktorý za cenu spomalenia okamžitej výslednej hodnoty SNR danú hodnotu ustálil. Výsledná hodnota SNR sa však stále pohybovala $\pm 1dB$ pričom sa občasne objavil decibelový prepád spôsobený využívanou funkciou *Pulse Measurements*, ktorá nie vždy správne vyhodnocovala stred pulzu (čím vo výsledku spôsobovala skok SNR). Dodatočné navrhnuté riešenie spočívalo v plávajúcom mediáne, ktorý sa ukázal ako vhodný.

6 REALIZÁCIA PROGRAMU

Vytvorený program v LabVIEW je rozdelený do niekoľkých VI súborov. Hlavným a najväčším z nich je program *Main.vi*, ktorý pri spustení pracuje s nasledovnými vytvorenými podprogramami (SubVI):

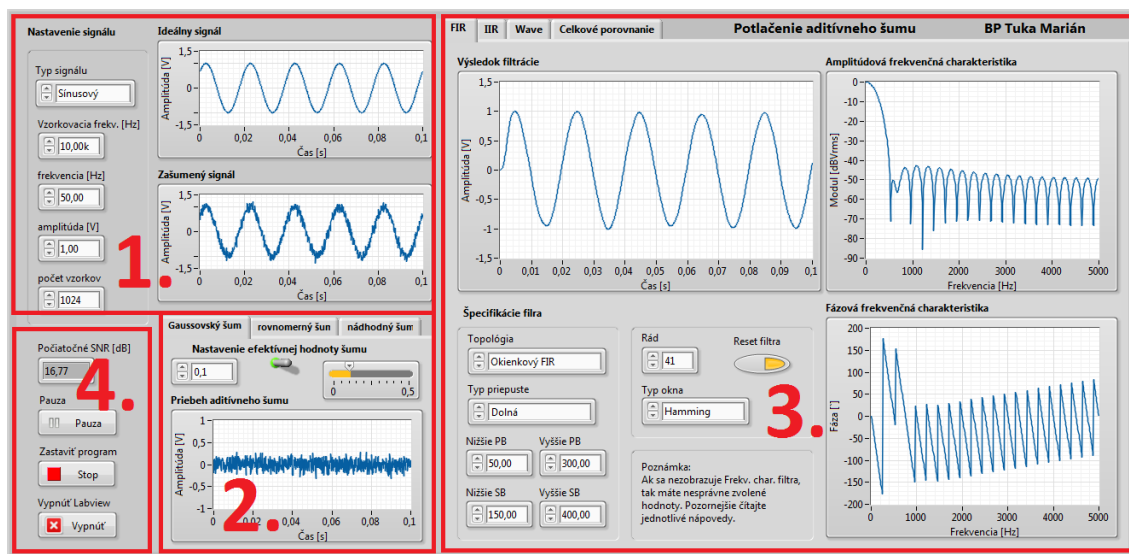
- *Odstránenie fázového posunu (SubVI).vi*,
- *Vlnková transformácia (SubVI).vi*,
- *SNR (SubVI).vi*,
- *Plávajúci priemer (SubVI).vi*.

Tieto podprogramy slúžia na sprehl'adenie kódu v blokovom diagrame a taktiež v prípade, ak je nutné časť kódu využiť viackrát.

6.1 Uživatelské rozhranie

Náhľad na užívateľské rozhranie programu (čelný panel) pre potlačenie aditívneho šumu je uvedený na (Obr. 17). Podrobnejší náhľad je uvedený na konci práce v prílohe A. Uživatelské rozhranie programu je delené do štyroch častí. V prvej časti sa nastavuje ideálny signál, ktorý je následne zašumený šumom nastavovaným v druhej časti. Pri nastavovaní šumu si užívateľ vyberá z troch záložiek, kde každá záložka predstavuje iný typ šumu, avšak graficky sa tieto záložky nijako nemenia. V tretej časti sú tri záložky potlačovania šumu (FIR, IIR, Wave) a záložka celkového porovnania. V jednotlivých záložkách sa nastavujú vlastnosti filtrov a vlnkovej transformácie, pričom v poslednej záložke už nastavenia nie sú, ostávajú totiž nastavené z predchádzajúcich. Štvrtou a poslednou časťou programu užívateľ ovláda základné programové funkcie (pauza, stop, koniec). Súčasťou štvrtej časti programu je tiež indikátor počiatočného SNR, ktorý definuje pomer generovaného signálu a šumu (hodnota nie je okamžitá pri zmene šumu či signálu, pretože je plávajúcim priemerom).

Jednotlivé priebehy a charakteristiky sú graficky zobrazené v prvých troch častiach programu. Priebeh ideálneho signálu a zašumeného signálu sú v prvej časti. Grafické zobrazenie šumovej zložky je v druhej časti programu, v každej z troch záložiek zvlášť. V tretej časti sú pri filtroch zobrazené frekvenčné charakteristiky a pri vlnkovej je zobrazené prahovanie. Výsledný signál je zobrazený v každej záložke tretej časti, pričom v záložke celkového porovnania sú zobrazené všetky výsledné signály v jednom grafe spolu s grafom chybových signálov.



Obrázok 17. Uživatelské rozhranie a jeho štyri časti

6.2 Ovládanie programu

Vo vytvorenom programe máme na výber niekoľko druhov nastavení, ktoré by sa pre lepšie pochopenie funkcie programu mali nastavovať postupne, počnúc voľbou signálu a voľbou šumu, až po voľbu metódy odstraňovania šumu. Program však nie je stavový automat, a teda jednotlivé nastavenia môžu byť nastavované v rôznom poradí.

Program má po spustení vzorovo nastavené hodnoty, pričom každé tlačidlo ovládajúce túto hodnotu má vlastnú nápovedu (pri podržaní kurzoru myši na danom tlačidle). Okrem nápovedy je možnosť zapnúť si v LabVIEW možnosť *help*, kde je podrobnejší popis daného užívateľského vstupu (tlačidla, hodnoty), prípadne rady, kedy hodnotu nastavovať a ako ju správne nastavovať, aby sa užívateľ dostal k žiadanému výsledku.

Počas behu programu je možné program kedykoľvek pozastaviť a znovu spustiť (pomocou tlačidla *Pauza*), zastaviť (pomocou tlačidla *Stop*) a ukončiť LabVIEW (pomocou tlačidla *Vypnúť*) vid'. obr. 17, časť 4.

6.2.1 Voľba signálu

Pri voľbe signálu (Obr. 17, časť 1.) užívateľ nastavuje hodnoty *typ signálu* (sínusový, obdĺžnikový a trojuholníkový), *vzorkovacia frekvencia*, *frekvencia generovaného signálu*, *amplitúda* generovaného signálu a *počet vzorkov*, s ktorými bude program pracovať. Vzorkovacia frekvencia sa ideálne volí podľa Shannon-Kotelnikovho teóremu. Pri nastavovaní počtu vzorkov je nutné hodnotu nastaviť ako mocninu čísla 2 a to práve kvôli vlnkovej transformácii, ktorá pracuje iba s takýmito hodnotami.

6.2.2 Voľba šumu

Šum je možné nastavovať pomocou záložiek a tlačidiel (príp. číselného poľa) (Obr. 17, časť 2.). Záložky predstavujú odlišné rozloženie šumu, kde je na výber *Gaussovské*, *rovnomerné* a *náhodné* rozloženie. Následne sa nastavuje *efektívna hodnota šumu*, ktorú je možné nastaviť posuvným bežcom, alebo zadáním konkrétneho čísla do číselného poľa.

6.2.3 Voľba metódy potlačovania šumu

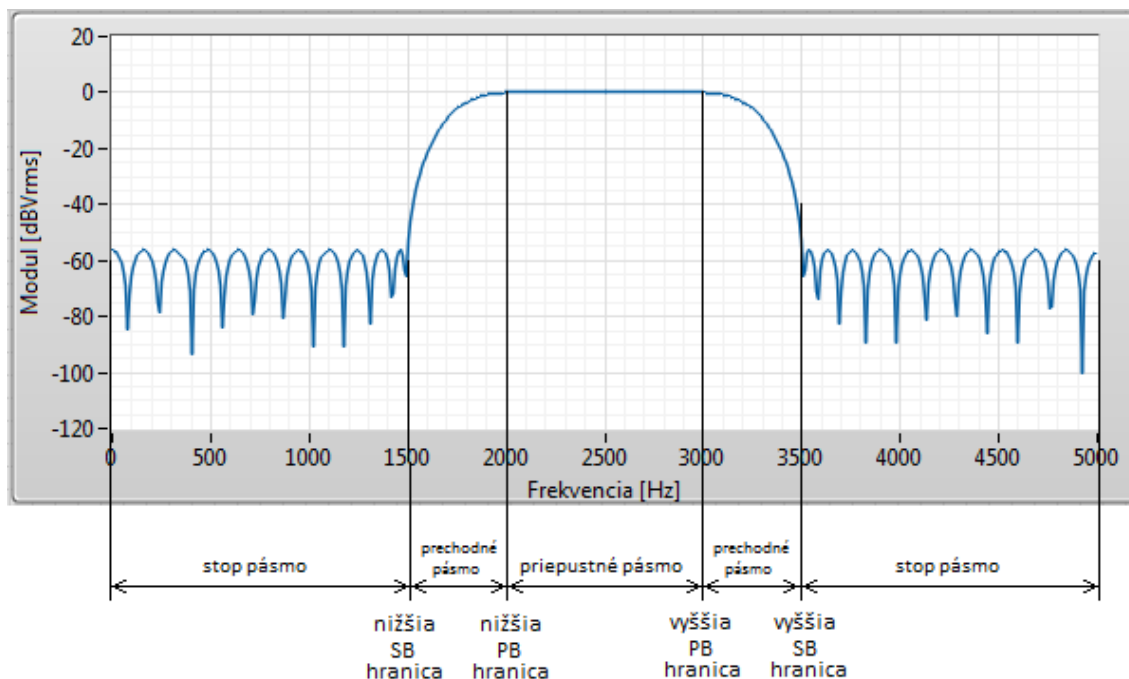
Pomocou záložiek *FIR*, *IIR*, *Wave* a *Celkové porovnanie* (Obr. 17, časť 3.) užívateľ vyberá medzi metódami potlačovania šumu. Jednotlivé nastavenie záložiek je uvedené nižšie.

6.2.3.1 Záložka FIR filtra

Základom tejto záložky je časť nastavenia filtra vid'. obr. 19. Užívateľ má na výber dve *topológie* FIR filtra (*Okienkový* a *optimálny* návrh), od ktorých sa odvíjajú ďalšie parametre a možnosti nastavenia filtra. Pri voľbe *Okienkového* filtra sa nenastavujú hodnoty stop pásmovej hranice (Stop Band edge) *Nižšie SB* a *Vyššie SB*, pretože na výsledný návrh okienkového filtra nemajú žiadny vplyv (využívaná funkcia totiž nemá možnosť zadávať stop pásmové hranice). Naopak, pri voľbe *Optimálneho* návrhu filtra sa nastavujú aj stop pásmové hranice, avšak pochopiteľne sa nenastavuje *typ okna*.

Typ priepuste umožňuje nastaviť typy frekvenčných priepustí (*Dolná*, *Horná*, *Pásmová priepusť* a *Pásmová zádrž*). Toto nastavenie má taktiež vplyv na to, aké ďalšie nastavenia majú byť nastavené. Pri voľbe *dolnej* a *hornej* priepuste nenastavujeme hodnoty vyšších hraníc pásiem (*Vyššie PB* a *Vyššie SB*), pretože horná aj dolná priepusť má iba jedno prechodné pásmo a tým je logicky to nižšie. Pri voľbe *pásmovej priepuste* a *pásmovej zádrže* nastavujeme hranice vyšších aj nižších pásiem, pre lepšie pochopenie je na obrázku 18 uvedený príklad pásmovej priepuste.

Pri následnej voľbe frekvenčných hodnôt *Nižšieho PB*, *Nižšieho SB*, *Vyššieho PB* a *Vyššieho SB* (kde skratky PB a SB znamenajú priepustná pásmová hranica a stop pásmová hranica) je teda potrebné dbať na *topológiu* a *typ priepuste*. Napríklad, ak užívateľ nastavuje optimálny filter hornej priepuste tak *nižšia PB* hodnota musí byť nižšia ako *nižšia SB* hodnota. Hodnoty týchto pásiem sa nastavujú maximálne do polovičnej hodnoty *vzorkovacej frekvencie*.



Obrázok 18. Amplitúdová frekvenčná charakteristika a popis jednotlivých pásiem

Zostávajúce nastavenia *Rád*, *Reset filtra* a *Typ okna* nemajú žiadne obmedzenia na celkové nastavenie filtra. *Rád* filtra ovplyvňuje odozvu filtra, výpočtovú náročnosť a kvalitu filtrácie. Je možné ho zvoliť podľa vizuálnej spokojnosti s odšumením signálu. Tlačidlo *Reset filtra* užívateľovi umožňuje vidieť na výslednom signále odozvu filtra. Voľbou *Typ okna* je možné vybrať zo siedmich vybraných typov okienok (*Hanning*, *Hamming*, *Triangular*, *Blackman*, *Exact Blackman*, *Blackman-Harris*, *Kaiser-Bessel*, *Flat Top*) [20].

Špecifikácie filtra

Topológia

Okienkový FIR

Typ priepuste

Dolná

Nižšie PB [Hz]

50,00

Vyššie PB [Hz]

300,00

Nižšie SB [Hz]

150,00

Vyššie SB [Hz]

400,00

Rád

41

Reset filtra

Typ okna

Hamming

Poznámka:
Ak sa nezobrazuje Frekv. char. filtra, tak máte nesprávne zvolené hodnoty. Pozornejšie čítajte jednotlivé nápovedy.

Obrázok 19. Nastavenia FIR filtra

Okrem jednotlivých nastavení filtra sú v tejto záložke zobrazené tri grafy. Prvým je *výsledok filtrácie*, ktorý nám zobrazuje signál po aplikácii filtra. Druhým a tretím grafom sú frekvenčné charakteristiky (*amplitúdová* a *fázová*) nastaveného filtra. *Amplitúdová frekvenčná charakteristika* je zobrazená na obrázku 18, kde je pre príklad nastavený optimálny FIR filter s typom priepuste – *pásmová priepusť*. Užívateľ je tak efektívnejší pri nastavovaní jednotlivých parametrov. V prípade nastavenia nesprávnych hodnôt slúžia tieto grafy ako indikátor nesprávne nastavených hodnôt, keďže sa jednotlivé charakteristiky nezobrazia (viď kap. 7.3).

6.2.3.2 Záložka IIR filtra

Záložka IIR filtra je identická so záložkou FIR filtra až na nastavenie, ktoré sa líši v celkovo menšom počte nastavovaných hodnôt (Obr. 20). Namiesto nastavení hraníc priepustného a stop pásma sa nastavuje jediná hranica frekvenčného pásma F_c a taktiež sa nenastavuje *typ okna*.

Užívateľ si tu môže vybrať jednu zo štyroch *topológií* návrhu filtra, a to *Butterworth*, *Chebyshev*, *Inverse Chebyshev* a *Bessel*. Jednotlivé možnosti ovplyvňujú, či frekvenčnou hranicou F_c nastavujeme priepustnú, alebo stop hranicu. Záleží pri tom aj na samotnej hodnote frekvenčnej hranice, a preto je vhodné si všímať frekvenčné charakteristiky nastavovaného filtra.

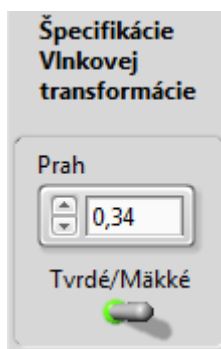
Typ priepuste, *Rád* a *Reset filtra* sa nastavujú podobne ako pri FIR filtre, a tak nebudú znova popisované, rovnako ako grafy, ktoré zostali identické. Nastavenie hodnoty *Vyššie F_c* ostáva pochopiteľne iba pri pásmovej priepusti a zádrži.

Obrázok 20. Nastavenia IIR filtra

6.2.3.3 Záložka vlnkovej transformácie

Pri voľbe záložky *Wave* sú k dispozícii dve nastavenia (Obr. 21) a dva grafy. Užívateľ nastavuje číselnú hodnotu *Prah* (hodnota je volená v rozmedzí 0 až 1, kde pri hodnote nula neprahuje nič a pri hodnotách vyšších jednej je už na výsledku filtrácie vidieť použitú materskú vlnku) a prepínač medzi dvoma typmi prahovania *Tvrde/Mäkké*. Hodnota prahu je pri spustení programu prednastavená na doporučenú hodnotu (0,34), ktorá bola zistená empiricky. Výsledky nastavenia vlnkovej transformácie sú zobrazené v grafe *Prahovanie* (zobrazuje koeficienty prahovania spolu s kurzormi prahu) a grafe *Výsledok potlačenia šumu*.

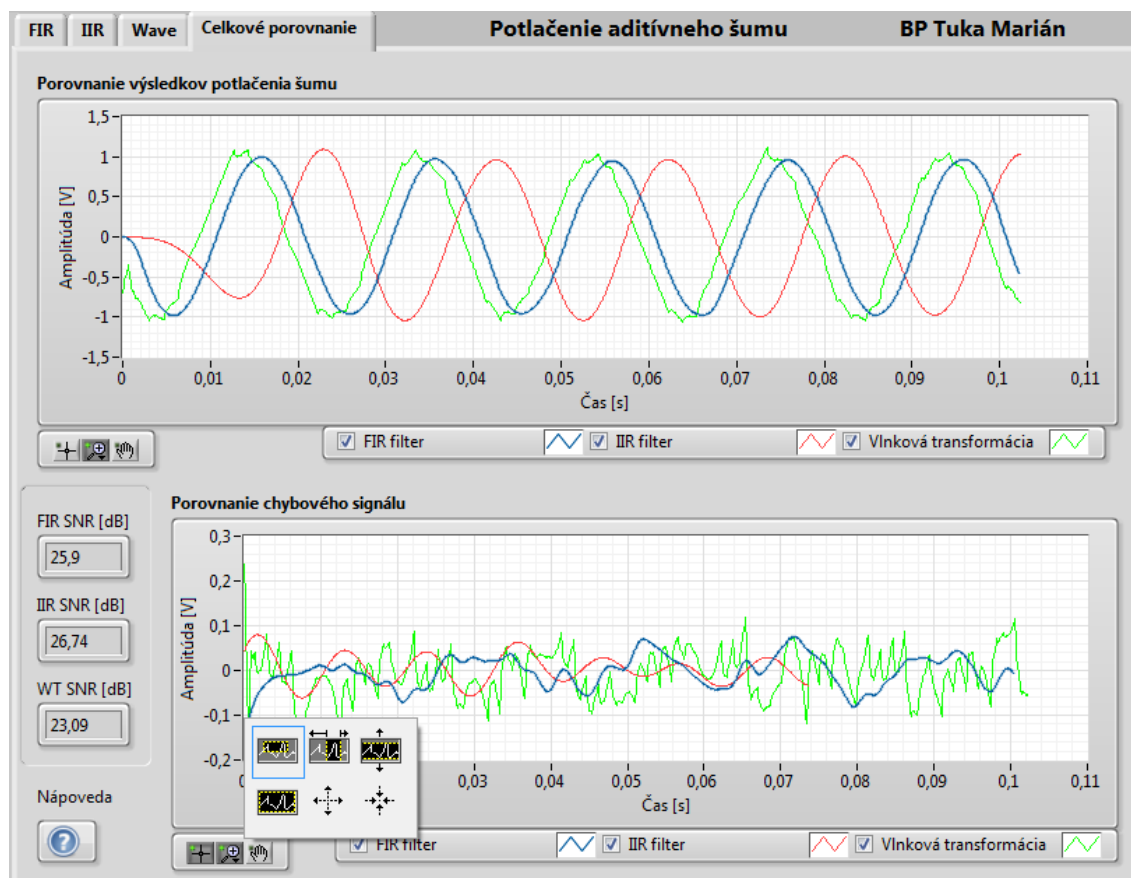
Pri nastavovaní vlnkovej transformácie je užívateľ popisom upozornený na nastavenie počtu vzorkov, ako mocninu čísla dva a to z dôvodu, že zvolená vlnka pracuje iba s takýmito číslami. Nesprávnym počtom vzorkov sa tak vlnková transformácia nevykoná (grafy ostanú prázdne).



Obrázok 21. Nastavenia vlnkovej transformácie

6.2.3.4 Záložka celkové porovnanie

V poslednej záložke *Celkové porovnanie* sa nenastavujú žiadne hodnoty, pretože je to informačná záložka, kde sa porovnávajú výsledky nastavení predchádzajúcich troch záložiek v grafoch *porovnanie výsledkov potlačenia šumu* a *porovnanie chybového signálu*. Užívateľ tu tak môže vďaka palete možností grafu (graph palette) bližšie preskúmať výsledné odšumené a chybové signály (výberom určitej oblasti, približovaním, oddiaľovaním, posúvaním, apod.), prípadne sledovať iba zvolené typy signálov jednoduchým odkliknutím daného signálu (*FIR filter*, *IIR filter*, *Vlnková transformácia*) vid'. obrázok 22. Táto záložka obsahuje taktiež výsledné SNR jednotlivých metód, ktoré spolu s porovnaním počiatočného SNR (Obr. 17, časť 4.) bez potlačenia šumu, dávajú informáciu o kvalite potlačovania šumu jednotlivých metód.



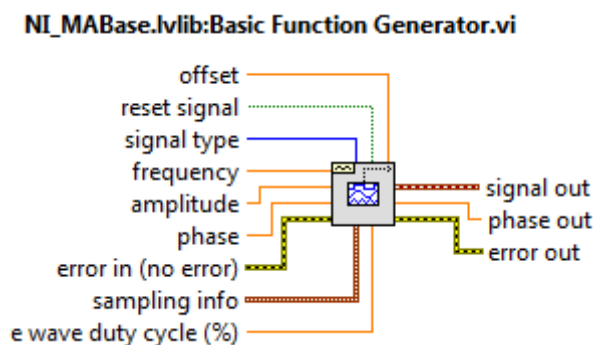
Obrázok 22. Záložka celkové porovnanie s rozkliknutou paletou grafu

6.3 Popis jednotlivých funkcií a podprogramov

V tejto časti bakalárskej práce sú popísané najdôležitejšie časti programu spolu s popisom podprogramov, ktoré sú v programe využívané.

6.3.1 Generovanie signálu

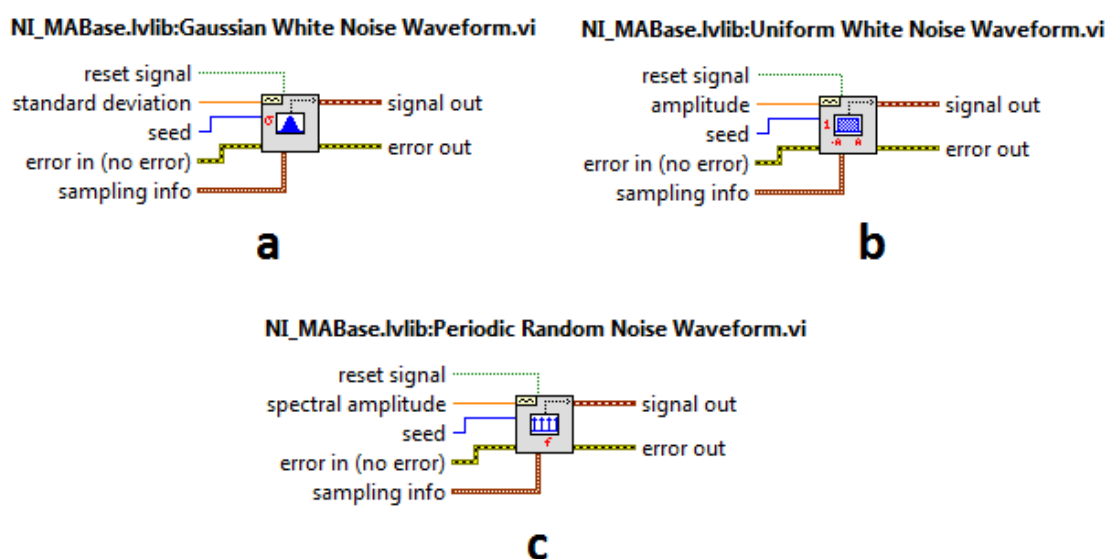
Na generovanie signálu je použitá funkcia z knižnice funkcií *Signal Processing\Waveform Generation*. Využitie sú často nastavované vstupy *signal type*, *frequency*, *amplitude* a *sampling info*. Ostatné vstupy sú automaticky nastavené na predvolené hodnoty. Výstupom funkcie je podľa nastavení vygenerovaný signál (*signal out*).



Obrázok 23. Generátor základných signálov

6.3.2 Generovanie šumu

V časti generovania šumu sú použité tri funkcie, z ktorých každá definuje iný šum. Funkcie sú z knižnice *Signal Processing\ Waveform Generation*. Na obrázku 24, sú znázornené funkcie Gaussovského šumu (a), rovnomerného šumu (b) a náhodného šumu (c). Zo všetkých funkcií boli využité vstupy *sampling info*, *standard deviation*, *amplitude* a *spectral amplitude*. Posledné tri menované hodnoty slúžia na nastavenie veľkosti šumu, ale keďže sa nastavujú rozdielnou a nejednotnou hodnotou, tak som zvolil nastavenie veľkosti šumu ako *efektívnu hodnotu šumu*, do ktorej sú tieto hodnoty prevedené. Výstupom funkcie je podľa nastavení vygenerovaný šum (*signal out*).

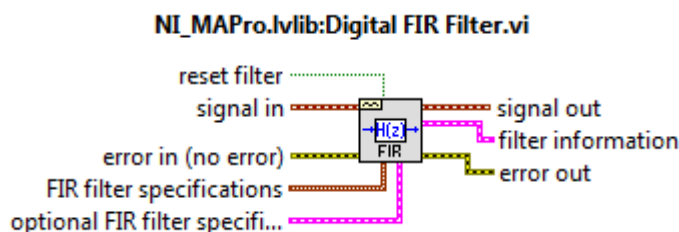


Obrázok 24. Generátory šumových signálov

6.3.3 FIR filtrácia

Na vykonanie FIR filtrácie bola vybraná funkcia z knižnice *Signal Processing\ Waveform Conditioning* (Obr. 25). Používané vstupy sú *reset filter* (reštartuje filter, vďaka čomu je na grafe vidieť odozvu filtra), *FIR filter specifications* (nastavuje špecifikácie filtra: topológia, typ, rad, stop pásma a priepustné pásma) a *optional FIR*

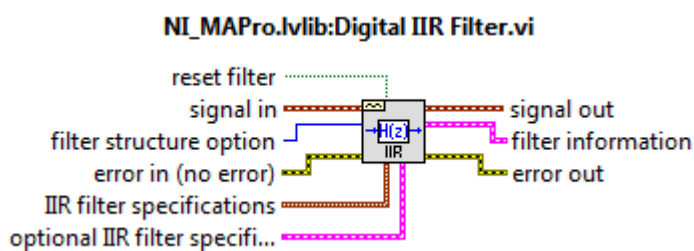
filter specifications (nastavuje voliteľné špecifikácie filtra: zosilnenie stop a priepustného pásma, mierku a typ okna). Ďalším a podstatným využívaným vstupom je *signal in*, do ktorého privádzame zašumený signál. Výstupy funkcie sú prefiltrovaný signál (*signal out*) a informácie o filtre (*filter information*). Z informácií o filtre získavame frekvenčné charakteristiky.



Obrázok 25. Blok FIR filtra

6.3.4 IIR filtrácia

Na vykonanie IIR filtrácie bola vybraná funkcia z knižnice *Signal Processing\ Waveform Conditioning* (Obr. 26). Používané vstupy sú obdobné ako pri FIR filtre, teda *reset filter*, *FIR filter specifications* (nastavuje špecifikácie filtra: topológia, typ, rad a orezávané frekvencie), pričom ostatné nastaviteľné vstupy ostávajú nastavené na pôvodné hodnoty. Ďalším a podstatným využívaným vstupom je *signal in*, do ktorého privádzame zašumený signál. Výstupy funkcie sú prefiltrovaný signál (*signal out*) a informácie o filtre (*filter information*). Z informácií o filtre získavame frekvenčné charakteristiky.

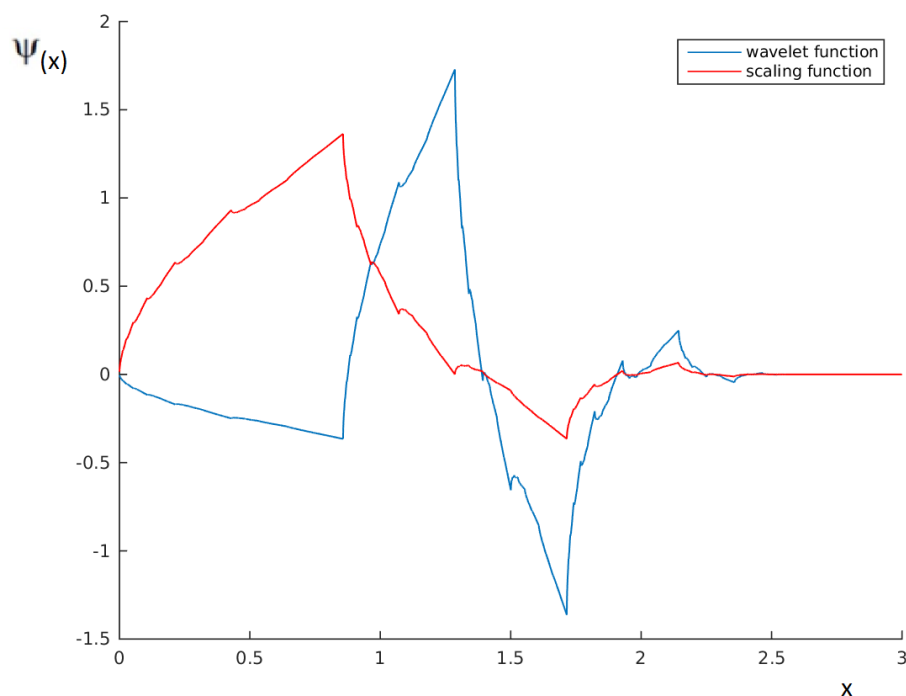


Obrázok 26. Blok IIR filtra

6.3.5 Vlnková transformácia (SubVI)

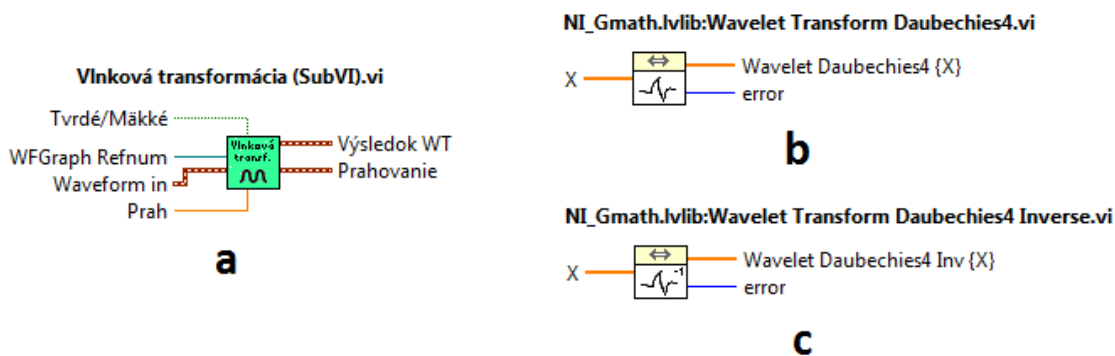
Mnou vytvorený podprogram *vlnkovej transformácie* (Obr. 28. a) pracuje s dvoma funkciami z knižnice *Signal Processing\ Transform*, a to *Vlnkovou transformáciou Daubechies4* (Obr. 28. b) a *Inverznou vlnkovou transformáciou Daubechies4* (Obr. 28. c). Vlnka *Daubechies4* zobrazená na obrázku 27, je jediná možná vlnková transformácia v základnej študentskej verzii LabVIEW 2014. Na výber typu vlnky,

prípadne pokročilejšie nastavenie vlniek má LabVIEW samostatný toolkit (LabVIEW Advanced Signal Processing Toolkit), na ktorý sa však študentská verzia nevzťahuje. Vytvorený kód podprogramu je uvedený v prílohe B.



Obrázok 27. Vlnka Daubechies4 a jej škálová funkcia [19]

Riešenie podprogramu *vlnkovej transformácie* spočíva v prevedení vlnkovej transformácie *Daubechies4*, z ktorej získame koeficienty. Následným prahovaním koeficientov podľa zvolených vstupov *Tvrde/Mäkké* a *Prah* sa prevedie prahovanie. Konečnou úpravou je spätná vlnková transformácia *Daubechies4*. Zašumený signál tak do podprogramu vstupuje cez *Waveform in* a vystupuje buď ako zobrazenie koeficientov (*Prahovanie*), alebo výsledok odšumenia (*Výsledok WT*). Jednotlivé typy prahovania sú naprogramované podľa vzťahov (21) a (22).

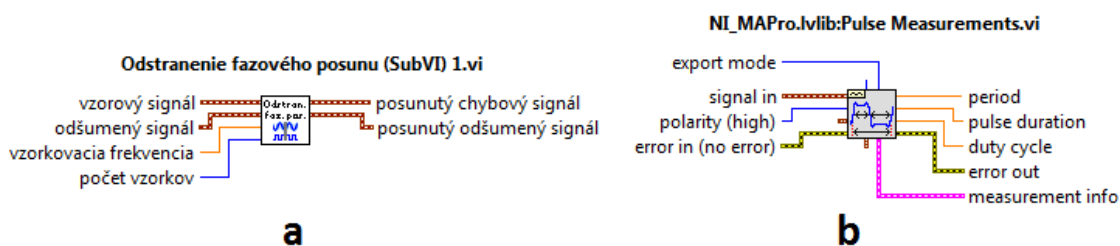


Obrázok 28. Podprogram *Vlnková transformácia* a funkcie WT *Daubechies4*

6.3.6 Odstránenie fázového posunu (SubVI)

Podprogramy *Odstránenie fázového posunu* (Obr. 29. a) boli vytvorené pre potrebu získania chybového signálu bez odozvy filtrov, pretože fázové posuny pri následnom výpočte SNR vytvárali veľmi nepresné hodnoty. Podprogramy sú pre objektivnosť využívané pri všetkých metódach potlačovania šumu. Ukážka jedného z popisovaných podprogramov je v prílohe C.

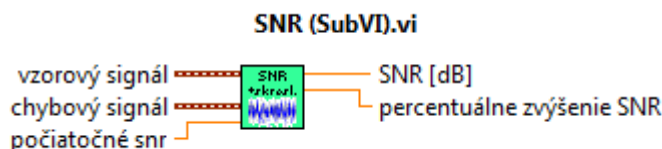
Základom podprogramov je funkcia *Pulse Measurements* (Obr. 29. b) z knižnice *Signal Processing\ Waveform Measurements*. Táto funkcia z vstupného signálu vypočíta stred pulzu (*pulse center*), ktorý je vo výstupnom clustri *measurement info*. Zo získaných hodnôt sa následne určí a oreže počet vzorkov fázového posunu. Vstupmi sú *vzorový signál*, *odšumený signál*, *vzorkovacia frekvencia* (udáva sa pre správny výpočet časti k orezaniu) a *počet vzorkov* (udáva sa kvôli nepresnostiam a nestálosti funkcie *Pulse measurements*, teda výsledná hodnota je plávajúcim mediánom zo zvoleného počtu vzorkov). Výstupmi sú *posunutý chybový signál* (vhodný na ďalšie spracovanie) a *posunutý odšumený signál* (využívaný na kontrolu funkčnosti podprogramu).



Obrázok 29. Podprogram *Odstránenie fázového posunu* a funkcia *Pulse Measurements*

6.3.7 SNR (SubVI)

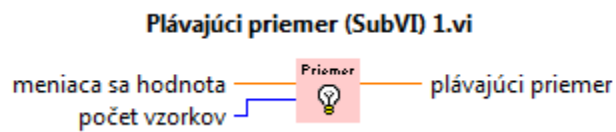
Podprogram *SNR* (Obr. 30) slúži k vyhodnocovaniu kvality metód potlačovania šumu. Jeho vstupmi sú *vzorový signál*, *chybový signál* a *počiatočné snr*, z ktorých sa podľa vzťahu (3) vypočíta pomer signál šum. Výstupmi podprogramu sú *SNR [dB]* a *percentuálne zvýšenie SNR*, ktoré je uvádzané v [%]. Vytvorený kód podprogramu je uvedený v prílohe D.



Obrázok 30. Podprogram *SNR*

6.3.8 Plávajúci priemer (SubVI)

Podprogramy *plávajúci priemer* (Obr. 31) boli vytvorené kvôli potrebe stabilizovať hodnotu SNR, keďže celý program je riešený kontinuálne (teda nezastane pokiaľ ho užívateľ nezastaví) bola zvolená cesta plávajúceho priemeru. V tejto časti využívame *shift registre* (využívané tiež pri výpočte mediánu v kap. 6.3.6). Dôvodom voľby *shift registrov* je vstup *meniaca sa hodnota*, ktorý nie je pole hodnôt, ale hodnota samostatná a neustále sa mení. Výstupom podprogramu je *plávajúci priemer* zvoleného počtu hodnôt (vstup *počet vzorkov*), z čoho vyplýva, že pri skokovej zmene signálu či šumu trvá určitý čas kým sa ustáli. Vytvorený kód podprogramu je uvedený v prílohe E.

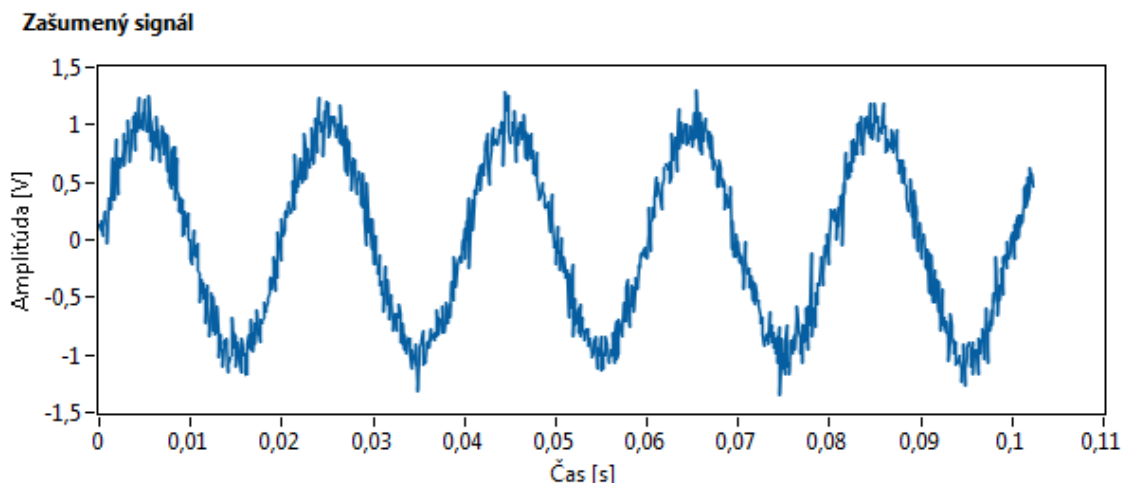


Obrázok 31. Podprogram *Plávajúci priemer*

7 OVERENIE FUNKČNOSTI A ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

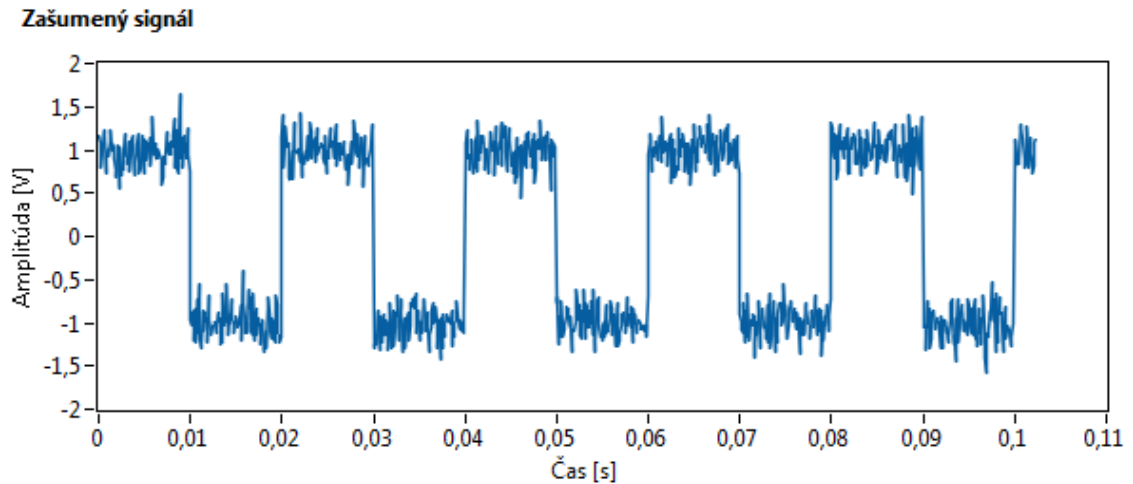
Overenie funkčnosti programu je predvedené na dvoch signáloch zadaných vedúcou. Zadané parametre signálov sú:

- Prvý signál:
 - typ *sínusový,*
 - frekvencia *$f = 50 \text{ Hz},$*
 - vzorkovacia frekvencia *$f_{vz} = 10 \text{ kHz},$*
 - amplitúda *$U = 1 \text{ V},$*
 - rozloženie šumu *Gaussovské,*
 - pomer signálu k šumu *$\text{SNR} = 15 \text{ dB}.$*



Obrázok 32. Ukážka zašumeného sínusového signálu

- Druhý signál:
 - typ *štvorcový,*
 - frekvencia *$f = 50 \text{ Hz},$*
 - vzorkovacia frekvencia *$f_{vz} = 10 \text{ kHz},$*
 - amplitúda *$U = 1 \text{ V},$*
 - rozloženie šumu *Gaussovské*
 - pomer signálu k šumu *$\text{SNR} = 15 \text{ dB}.$*



Obrázok 33. Ukážka zašumeného obdĺžnikového signálu

7.1 Použité metódy a ich nastavenia

Na overenie programu boli experimentálne vybrané dva typy FIR filtrov, dva typy IIR filtrov a vlnka Daubechies4 s dvoma typmi prahovania. Nastavenia vlnkovej transformácie som zvolil nasledovne:

- prvá vlnková transformácia (WT_1):
 - typ prahovania *mäkké,*
 - prah *0,34,*
- druhá vlnková transformácia (WT_2):
 - typ prahovania *tvrdé,*
 - prah *0,34.*

Nastavenie filtrov som rozdelil na dve skupiny v závislosti od typu zadaného singálu, t.j. pre zadaný sínusový signál boli nastavené filtre FIR_1 a IIR_1, a pre signál obdĺžnikový boli nastavené filtre FIR_2 a IIR2. Zvolené nastavenia filtrácie sú teda nasledovné:

- prvý FIR filter (FIR_1):
 - typ návrhu *okienkový,*
 - typ okienka *Hamming,*
 - typ priepuste *dolná,*
 - frekvenčná hranica *$f = 100$ Hz,*
 - rád *37,*

- druhý FIR filter (FIR_2):
 - typ návrhu *okienkový,*
 - typ okienka *Kaiser-Bessel,*
 - typ priepuste *pásmová priepusť,*
 - frekvenčná hranica 1 *$f = 1 \text{ Hz},$*
 - frekvenčná hranica 2 *$f = 50 \text{ Hz},$*
 - rád *15,*

- prvý IIR filter (IIR_1):
 - typ návrhu *Inverse Chebyshev,*
 - typ priepuste *dolná,*
 - priepustné pásmo *$f = 120 \text{ Hz},$*
 - rád *7,*

- druhý IIR filter (IIR_2):
 - typ návrhu *Bessel,*
 - typ priepuste *dolná,*
 - priepustné pásmo *$f = 400 \text{ Hz},$*
 - rád *6,*

Pri nastavovaní filtrov som volil dolné priepuste až na filter FIR_2, kde som pre ukážku nastavil pásmovú priepusť (ktorá pri nižšej frekvenčnej hranici 1 Hz nemá na daný výsledok filtrácie žiadny vplyv). Frekvenčné hranice boli volené tak, aby výsledný signál nebol zbytočne zoslabený, prípadne zosilnený. Pri nastavovaní rádu filtrov som volil hodnoty podľa frekvenčných charakteristík (dostačujúcej ostrosti), fázového posunutia filtra.

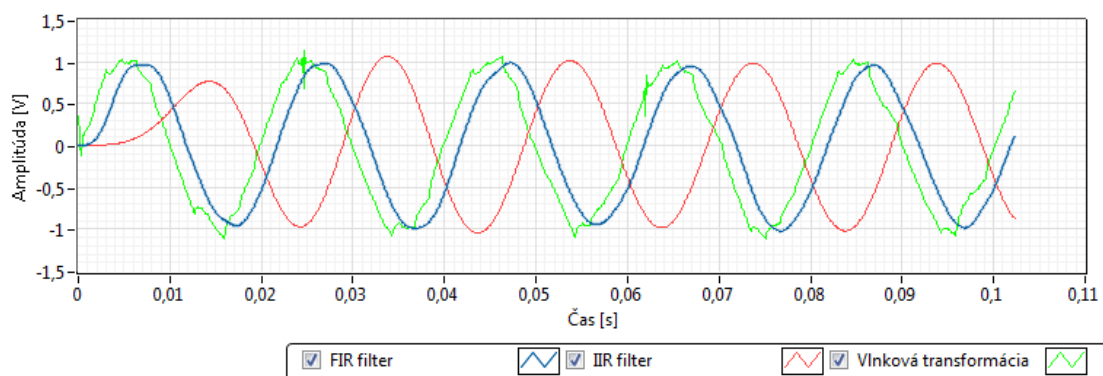
Počas nastavovania filtrov FIR_2 a IIR_2, ktoré boli primárne určené na zadaný obdĺžnikový signál som sa dodatočne orientoval aj podľa výsledného skreslenia signálu. Taktiež som sa zameral na výber typu návrhu filtra a jednotlivých okienok, ktoré spolu s hodnotami frekvenčných hraníc (ukážkovo pri IIR_2, kde je frekvenčná hranica podstatne vyššie oproti ostatným filtrom) a rádom filtra (čím väčší rád tým väčšie skreslenie) ovplyvňovali výsledný signál podstatne viac ako pri sínusovom signále.

7.2 Dosiahnuté výsledky

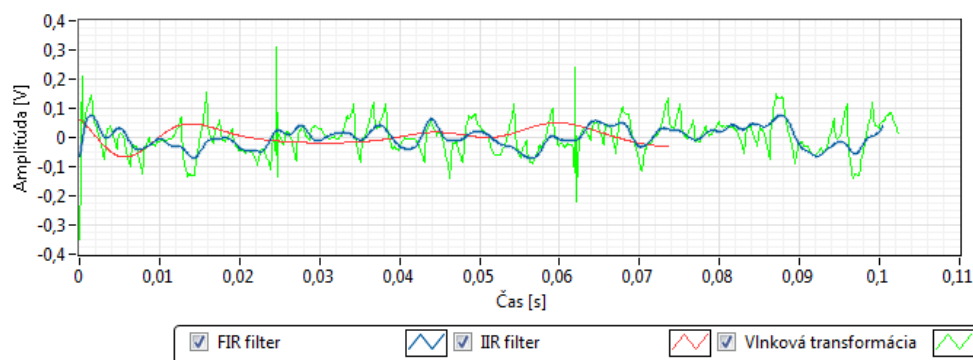
V tejto časti sú uvedené príklady výsledkov jednotlivých metód v grafoch, kde sú zobrazené výsledné odšumené signály a zostatkové chybové signály (pomocou ktorých sa dopočítava SNR) (Obr. 34 a 35). V tabuľkách (Tab. 2 a Tab. 3) pod grafmi sú uvedené výsledné hodnoty SNR (so zapnutou a vypnutou funkciou *reset* filtra).

7.2.1 Sínusový signál

Porovnanie výsledkov potlačenia šumu



Porovnanie chybového signálu



Obrázok 34. Sínusový signál, potlačenie šumu pomocou FIR_1, IIR_1 a WT_1

Tabuľka 2. Porovnanie účinnosti jednotlivých metód na zadanom sínusovom signále

Počiatočný signál						
metóda potlačenia	FIR filtrácia		IIR filtrácia		Vlnková transformácia	
	FIR_1	FIR_2	IIR_1	IIR_2	WT_1	WT_2
SNR [dB]	25,61	23,34	28,98	25,25	22,06	18,36
Signál po ustálení hodnôt (vypnuté tlačidlá reset)						
metóda potlačenia	FIR filtrácia		IIR filtrácia		Vlnková transformácia	
	FIR_1	FIR_2	IIR_1	IIR_2	WT_1	WT_2
SNR [dB]	27,39	23,49	30,81	25,67	21,92	18,37

Z porovnania výsledkov potlačeného šumu na obrázku 34 je možné vidieť fázové meškanie filtrov, kde najväčšie meškanie dosahuje IIR filter (IIR_1), zatiaľ čo vlnková transformácia je v takmer bez fázového posunu. Pri porovnaní chybového signálu je taktiež viditeľné počiatočné zvlnenie, ktoré je spôsobené počiatočným skokom filtra. Za zmienku stoja aj jednotlivé orezané časti, ktoré sú výsledkom podprogramu *odstránenie fázového posunutia*, pochopiteľne je tak IIR_2 filter orezaný o najväčšiu časť signálu, čo mu vo výsledku prílepsi na SNR pomere v počiatočnom signále.

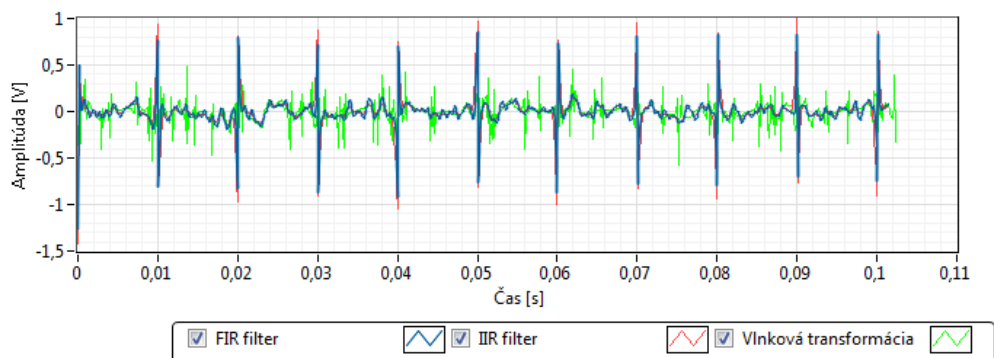
Z tabuľky č. 2 vyplýva, že všeobecne si pri potlačovaní šumu na sínusovom signále viedla lepšie filtrácia oproti vlnkovej transformácii, a to aj napriek výraznému zlepšeniu potlačenia šumu mäkkým prahovaním. Vlnková transformácia však v praxi využíva zložitejšie nastavenia spolu s rozdielnymi vlnkami, čím je možné kvalitnejšie potlačiť šum. Celkovo je tak z tabuľky možné tvrdiť, že najlepšou možnosťou potlačenia šumu pri zadanom signály je práve zvolený IIR_2 filter aj napriek väčšiemu meškaniu.

7.2.2 Obdĺžnikový signál

Porovnanie výsledkov potlačenia šumu



Porovnanie chybového signálu



Obrázok 35. Obdĺžnikový signál, potlačenie šumu pomocou FIR_2, IIR_2 a WT_1

Tabuľka 3. Porovnanie účinností jednotlivých metód na zadanom obdĺžnikovom signále

Počiatočný signál						
metóda potlačenia	FIR filtrácia		IIR filtrácia		Vlnková transformácia	
	FIR_1	FIR_2	IIR_1	IIR_2	WT_1	WT_2
SNR [dB]	11,48	16,47	7,2	14,48	18,61	18,26
Signál po ustálení hodnôt (vypnuté tlačidlá reset)						
metóda potlačenia	FIR filtrácia		IIR filtrácia		Vlnková transformácia	
	FIR_1	FIR_2	IIR_1	IIR_2	WT_1	WT_2
SNR [dB]	11,54	16,52	7,21	14,52	18,60	18,27

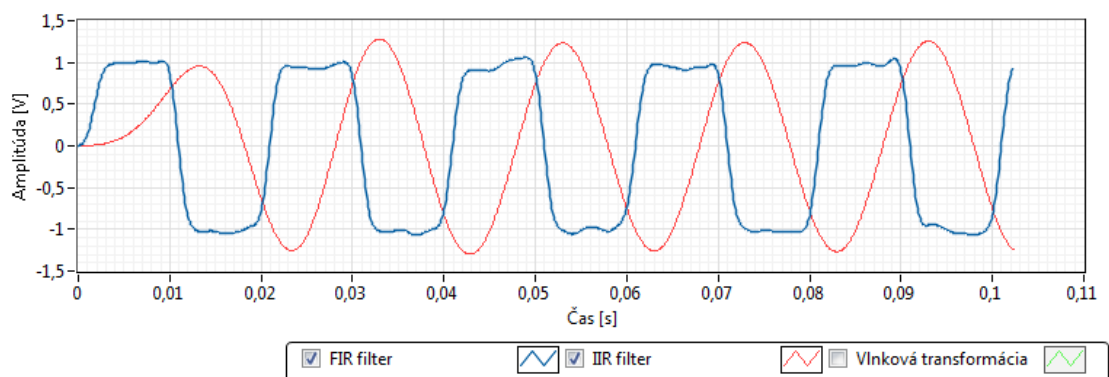
Z porovnania výsledkov potlačeného šumu na obrázku 35 je vidieť kladný dopad zmeny typu filtra IIR_2 (oproti IIR_1), ktorý už nedosahuje tak veľké meškanie. Vlnková transformácia si však rovnako ako pri sínusovom signále zachováva vlastnosť malého fázového posunu. Pri obdĺžnikovom signáli je z grafov taktiež viditeľné skreslenie filtrov, ktoré sa prejaví hlavne na chybovom signále, kde je jeho amplitúda vysoká. Skreslenie je viditeľné aj v tabuľke 3, kde z pôvodného pomeru $SNR = 15dB$ dokázali kladne potlačiť šum iba vlnkové transformácie a FIR_2 filter. Samotný šum pri obdĺžnikovom signáli dokázali filtre potlačiť dostatočujúco, avšak v chybovom signále je zahrnuté aj skreslenie, preto výsledné SNR filtrov je pri obdĺžnikovom signále nižšie ako pôvodná hodnota.

Z tabuľky č. 3 vyplýva, že všeobecne si pri potlačovaní šumu na obdĺžnikovom signále viedla lepšie vlnková transformácia ako filtrácia (nedochádza totiž k tak veľkému predĺženiu nábežnej a zostupnej hrany). Podobne ako pri sínusovom signále má mäkké prahovanie väčšiu efektivitu v potlačovaní šumu ako tvrdé, no pri obdĺžnikovom signále je rozdiel voľby prahovania menší.

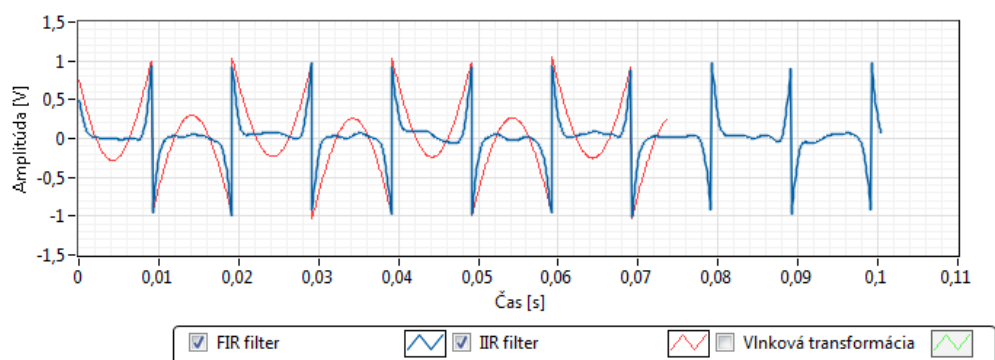
7.3 Nevhodne zvolené nastavenia

V predošlej kapitole boli pri obdĺžnikovom signále kategoricky správne nastavené filtre FIR_2, IIR_2, avšak nastavenia filtrov FIR_1 a FIR_2 si pri potlačovaní šumu nevedli tak efektívne. V tejto kapitole uvádzam prečo je tomu tak a čo sa stane pri nesprávnych nastaveniach. Z obrázku 35 je zreteľné, prečo je výsledný pomer SNR tak nízky. V grafe porovnania chybového signálu je vidieť, že hodnota amplitúdy je síce rovnako vysoká, ako aj pri správne zvolených filtroch, avšak oproti správne zvoleným filtrom je táto hodnota na viacerých vzorkoch (nie je skoková). Všeobecne je skreslenie uvedené na obrázku 35 dôsledkom vysokého rádu filtra, no pri IIR filtroch môže byť spôsobené aj nesprávnym typom návrhu.

Porovnanie výsledkov potlačenia šumu

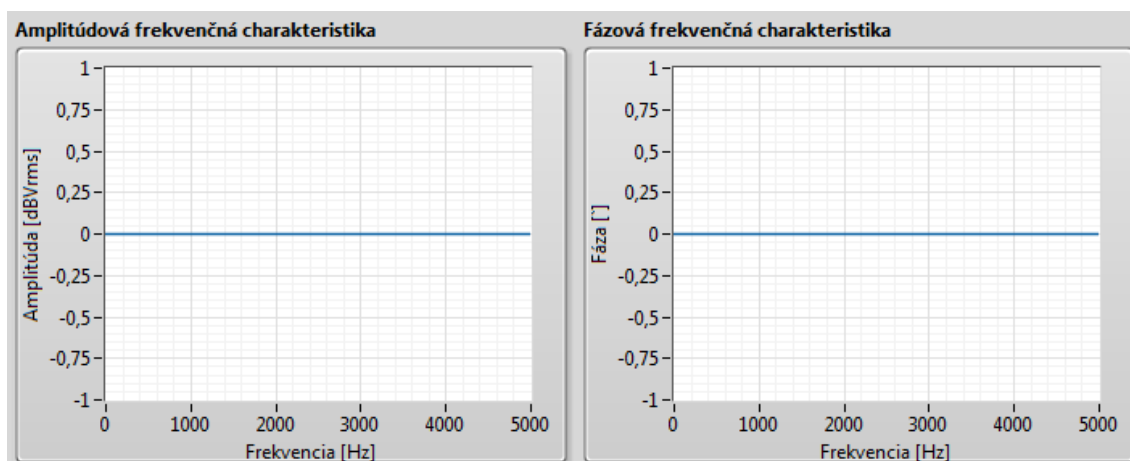


Porovnanie chybového signálu



Obrázok 36. Obdĺžnikový signál, potlačenie šumu pomocou FIR_1 a IIR_1

Všeobecne pri nesprávnom nastavení filtrácie (prehodených frekvenčných hraniciach, nízky až nulový rád FIR filtrov) sú pre užívateľa signalizátorom frekvenčné charakteristiky, ktoré sú znázornené na obrázku 37.

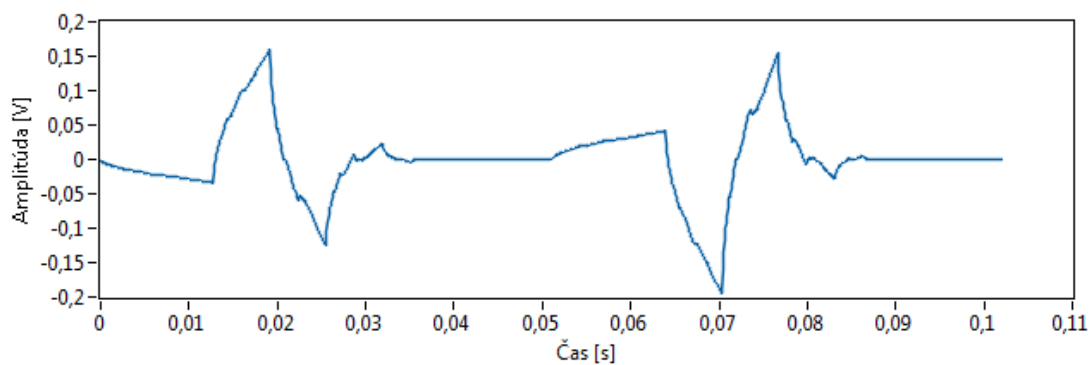


Obrázok 37. Nesprávne nastavené vlastnosti filtra

Pri nesprávnych nastaveniach vybranej metódy je výsledkom potlačenia šumu v lepšom prípade pôvodný zašumený signál, ktorý je výsledkom pri nereálnych nastaveniach filtra. Výsledný signál tak môže byť prehnane zosilnený, či zoslabený

(nesprávne nastavenie frekvenčných pásiem filtrov), prípadne môže mať dlhú odozvu (vysoký rád filtra). Pri vlnkovej transformácii je napríklad pri vysokom prahu možné vidieť tvar použitej vlnky (Obr. 38).

Výsledok potlačenia šumu



Obrázok 38. Výsledok vlnkovej transformácie pri $Prah = 8$

8 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo vytvoriť program, ktorý využíva filtre a vlnkovú transformáciu pre potlačenie aditívneho šumu.

Písomná časť práce je rozdelená na teoretickú a praktickú časť. V úvode teoretickej časti práce je popísaný aditívny šum a spôsoby jeho popisu, za ktorým nasleduje popis filtrácie, rozdelenie filtrov a všeobecný popis FIR a IIR filtrov spolu s metódami návrhu. Taktiež je uvedená prehľadná tabuľka s porovnaním vlastností týchto filtrov. Na záver teoretickej časti je popísaná vlnková transformácia spolu s jej spojitou a diskretnou variáciou. Uvedený je tu aj stručný popis materskej vlnky, banky filtrov a inverznej vlnkovej transformácie. Súčasťou teoretickej časti je taktiež nemenej dôležitá časť potlačovania šumu vlnkovou transformáciou - prahovanie.

V úvode praktickej písomnej časti práce je uvedený návrh softwarového riešenia pomocou blokového diagramu spolu s popisom programovacieho prostredia LabVIEW. Následne sa práca venuje popisu vytvoreného programu, t.j. užívateľské prostredie, ovládanie a popisu najdôležitejších prvkov programu. Posledná časť sa zaoberá overením programu na zadaných zašumených signáloch a popisom dosiahnutých výsledkov.

Zo zadanej dvojice programovacích prostredí bol vybraný LabVIEW (konkrétne LabVIEW 2014 32-bit študentská verzia), v ktorom bolo vytvorených desať VI programov. Podstatu programu tvoria teoreticky popisované metódy potlačovania šumu, ktoré sú v programe využívané pomocou *Switch case* štruktúry buď zvlášť, alebo spolu pri celkovom porovnaní. Užívateľ má pri ovládaní programu celú radu možných nastavení, ktoré sa vďaka cyklu *while* okamžite prejavia na výslednom tvare signálu. Jednotlivé užívateľské vstupy sú upravené tak, aby pri rozumnom manipulovaní nedochádzalo počas spustenia programu k chybovým stavom. Pri výslednom vyhodnotení metód pomocou SNR sú vytvorené pomocné funkcie (podprogramy), vďaka ktorým sa pomer SNR ustáli v priebehu 5-10 sekúnd v závislosti od danej zmenenej veličiny.

Využitie vytvoreného programu vidím prevažne pri vyučovaní spracovania signálov ako názorný príklad filtrácie a možností nastavenia filtrov, či oboznamovaním sa s vlnkovou transformáciou.

Dodatočné rozšírenie práce vidím v možnosti ukladania nastavení, vytvorení a úplnom odladení samostatnej aplikácie, ktorá by dokázala pracovať aj bez programu LabVIEW.

Literatura

- [1] JAN, J. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů*. Vyd. 2. Brno: VUT IUM, 2002. ISBN 80-214-2911-9.
- [2] VÍCH, R. a Z. SMÉKAL. *Číslicové filtry*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2000. ISBN 80-200-0761-X.
- [3] KREJSA, J. *Stochastické signály*. [online]. Brno [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~ruja/vyuka/ZZS/DSP02.pdf>
- [4] SEDLÁČEK, R. *Číslicová filtrace*. [online]. ČVUT, 2013 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/DSP/SPP_materialy_digitalni_filtrace.pdf
- [5] JAKSCH, I. *Číslicové měřicí systémy: Číslicové filtry*. [online]. Liberec, 2014 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/cms/11_ESF_cislic_filtry.pdf
- [6] VOJÁČEK, Antonín. Použití filtrů FIR v digitálním zpracování signálů. In: *automatizace.hw.cz* [online]. Nov 8, 2004, 7 pm [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005110801>
- [7] JAN, J., J. KOZUMPLÍK a R. KOLÁŘ. *Číslicové zpracování a analýza signálů: Počítačová cvičení*. Brno: VUT FEKT.
- [8] KARAS, Ondřej. Realizace filtrů FIR a IIR v programovacím jazyce C#. In: *programujte.com* [online]. Máj 7, 2010 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://programujte.com/clanek/2010050400-realizace-filtru-fir-a-iir-v-programovacim-jazyce-c/>
- [9] TESAŘÍK, J. *Grafické uživatelské rozhraní pro návrh filtrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marián Pristach
- [10] ŠMÍD, R. *Úvod do vlnkové transformace*. [online]. 2001 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/diag/download/Wavelet-intro8859.pdf>
- [11] KOZUMPLÍK, J. *Multitaktní systémy*, Brno: VUT FEKT, 2005.

- [12] GIURGIUTIU, V. a L. YU. *Comparsion of Short-time Fourier Transform and Wavelet Transform of Transient and Tone Burst Wave Propagation Signals For Structural Health Monitoring*. [online]. 2003 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: http://www.me.sc.edu/research/lamss/pdf/CONFERENCES/C87_IWSHM_2003_9.pdf
- [13] HORÁK, K. *Úvod do zpracování signálů*. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/lectures-pdf/01_Uvod_do_zpracovani_signalu.pdf
- [14] BEJČEK, L., ČEJKA, M., REZ, J., GESCHIEDTOVÁ, E., STEIBAUER M.: *Měření v elektrotechnice*, Brno: VUT FEKT, 241 s.
- [15] MALLAT, S. *A Wavelet Tour of Signal Processing, The Sparse Way*. [online]. RU Houston Texas, 2012 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://cnx.org/content/col10711/1.3/>
- [16] ČEJKA, M. *Měření Použití počítačů v měřicí technice*, Brno: VUT FKET, 2002.
- [17] National Instruments Corporation. FIR Windowed Filter VI. *Ni.com* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: Brno: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361H-01/lvanls/fir_windowed_filter/
- [18] National Instruments Corporation. LabVIEW System Design Software. *Ni.com* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: Brno: <http://www.ni.com/labview/>
- [19] SR Wiki. Wavelet Based Features. *recognize-speech.com* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: Brno: <http://recognize-speech.com/feature-extraction/wavelet-based-features>
- [20] National Instruments Corporation. Digital FIR Filter VI. *Ni.com* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: Brno: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361H-01/lvwave/digital_fir_filter/

Zoznam príloh

Príloha A. Čelný panel programu

Príloha B. Vlnková transformácia – blokový diagram

Príloha C. Odstránenie fázového posunutia – blokový diagram

Príloha D. SNR – blokový diagram

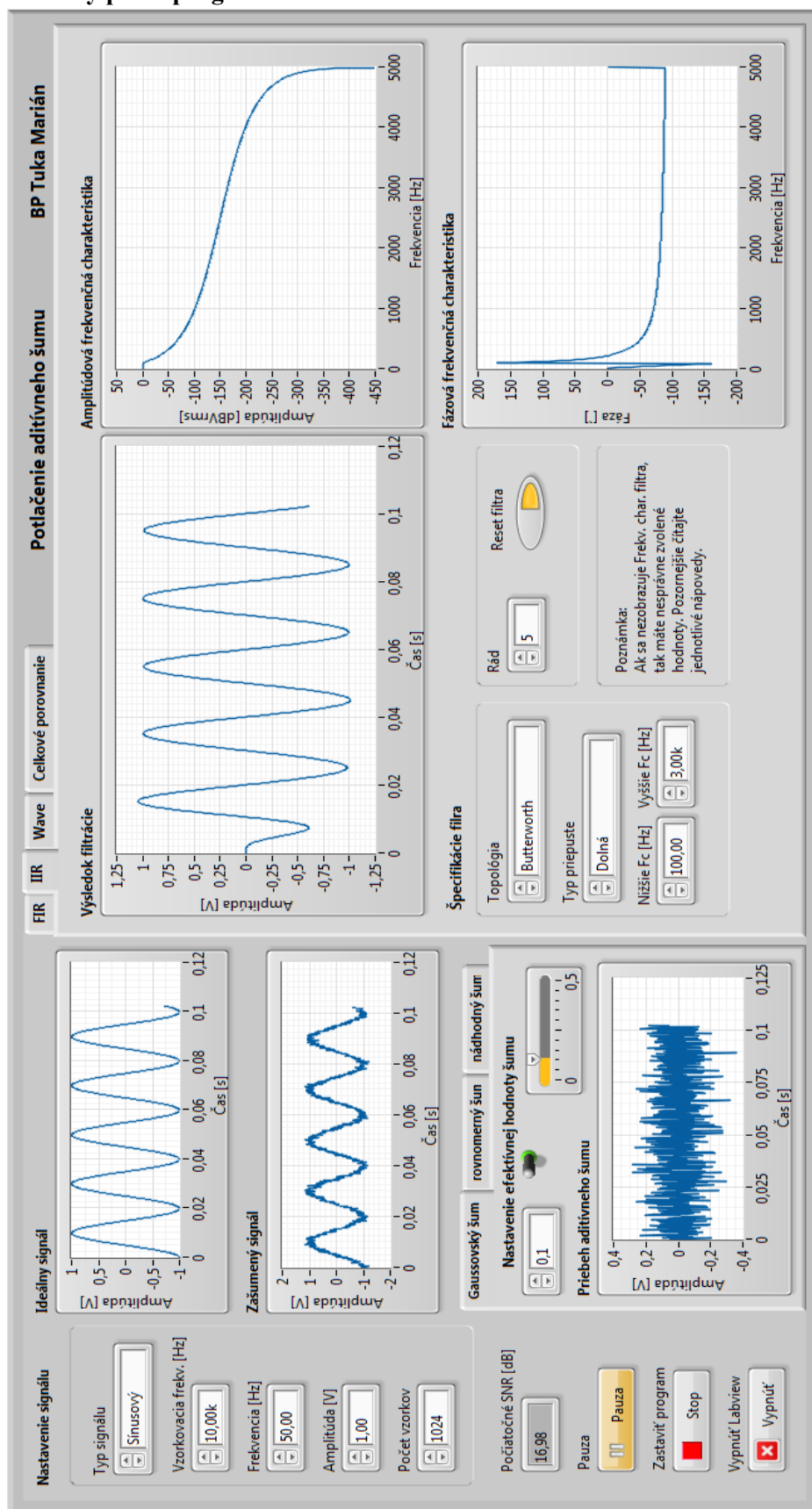
Príloha E. Plávajúci priemer – blokový diagram

Príloha F. Blokový diagram hlavného súboru main.vi

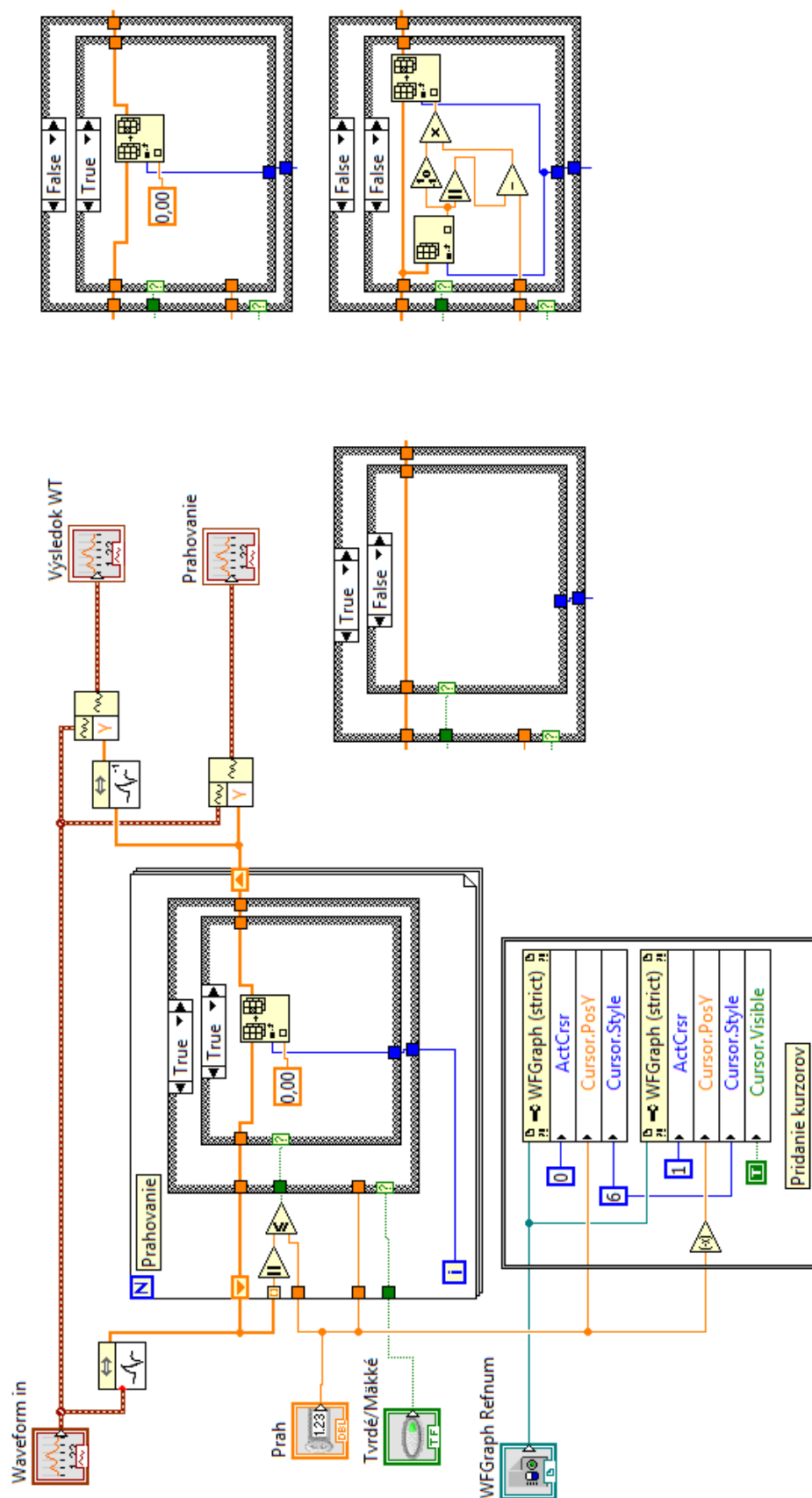
Príloha G. Priložené CD z obsahom:

- Bakalárska práca v formáte PDF
- Programové súbory vytvorené v LabVIEW 2014

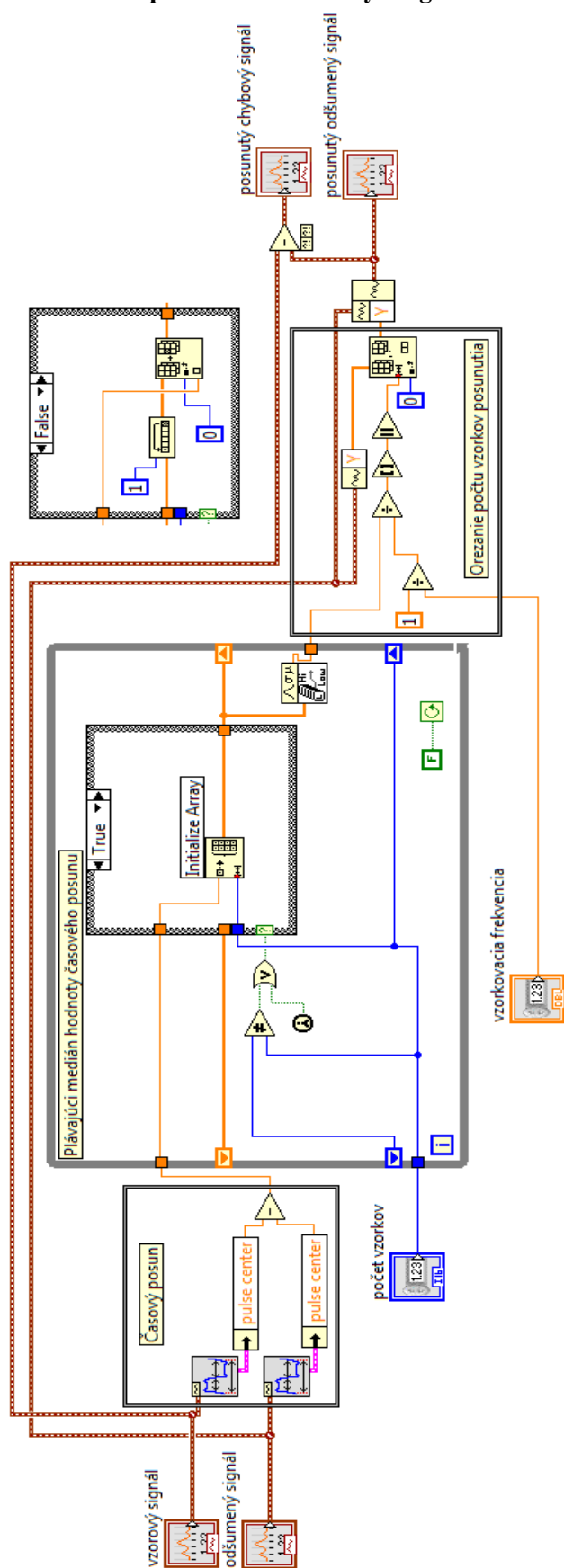
Príloha A. Čelný panel programu



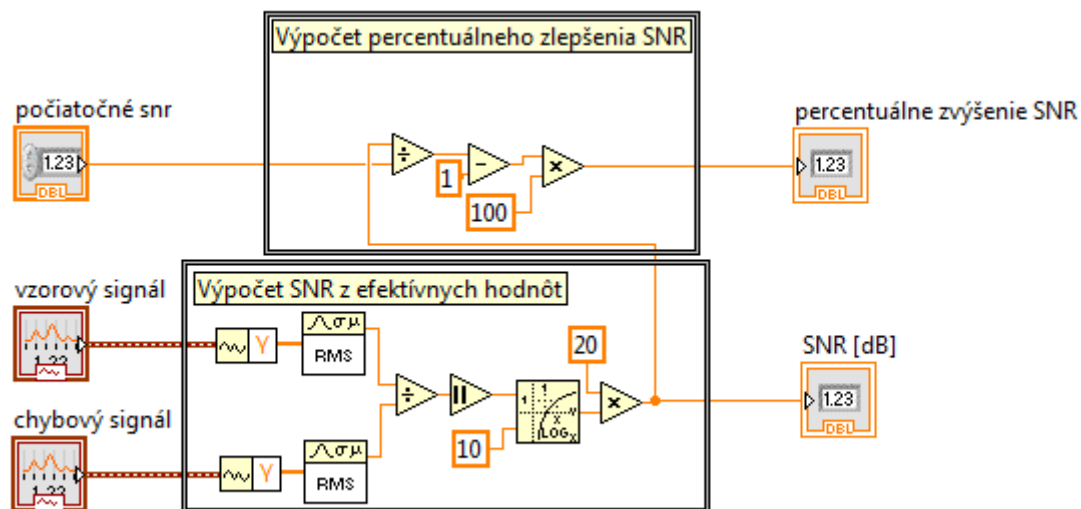
Príloha B. Vlnková transformácia – blokový diagram



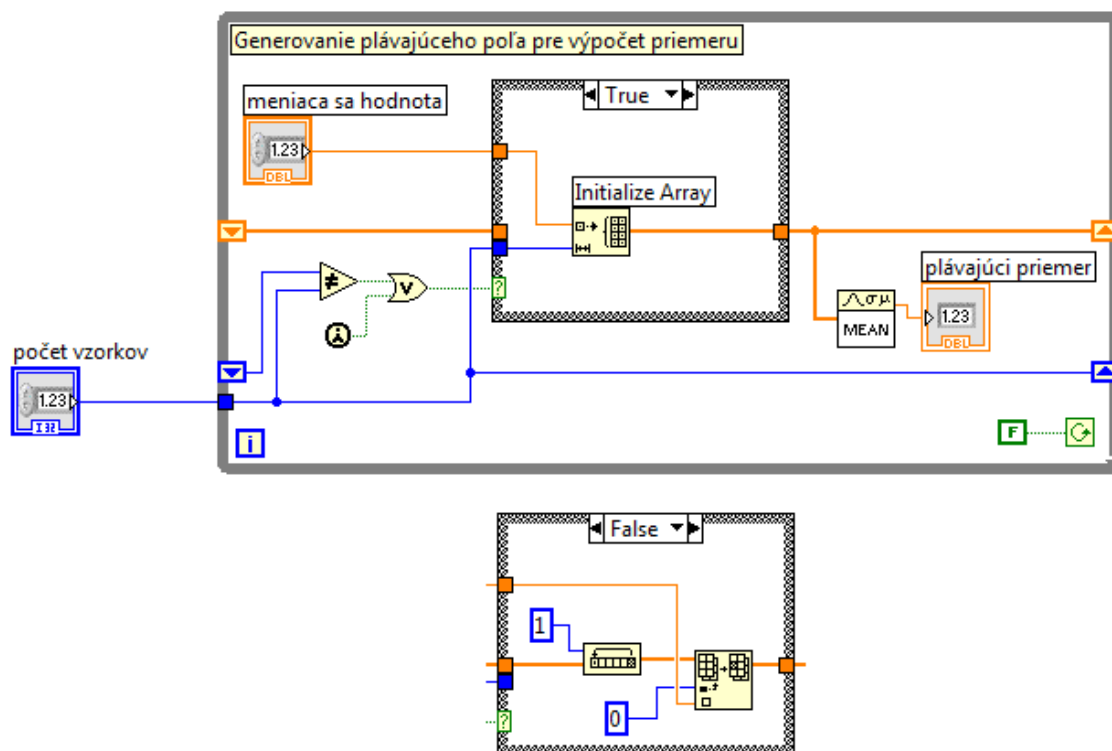
Príloha C. Odstránenie fázového posunutia – blokový diagram



Príloha D. SNR – blokový diagram



Príloha E. Plávajúci priemer – blokový diagram



Príloha F. Blokový diagram hlavného súboru main.vi

