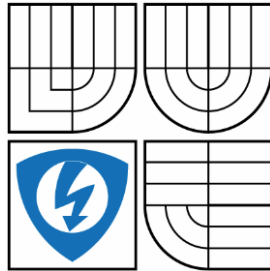


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ZESILOVAČ S FÁZOVÝM ZÁVĚSEM

PHASE LOCK AMPLIFIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

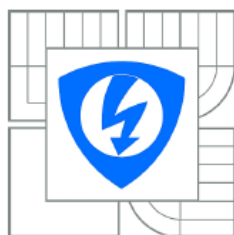
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETER FÁBIK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV ČEJKA, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Peter Fábik
Ročník: 2

ID: 119397
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Zesilovač s fázovým závěsem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1/Nastudujte problematiku zesilovačů s fázovým závěsem (Lock-In), proveďte průzkum trhu
- 2/Nastudujte ovládání a funkce přístroje HF2LI firmy Zürich Instruments a vytvořte stručný návod pro jeho přímé používání s dodaným SW, diskutujte jeho vlastnosti.
- 3/ Navrhnete experiment, který ověří jeho základní funkce a vlastnosti.
- 4/ Realizujte experimentální ověření vlastností, zpracujte a diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

About Lock-In Amplifiers. Application Note #3 Standford Reasarch Systems.
<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>
Firemní dokumentace k HF2LI - <http://www.zhinst.com/downloads>

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 20.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Čejka, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou zosilňovačov s fázovým závesom. Úvodné kapitoly sú venované popisu činnosti základných častí zosilňovača a obvodov fázového závesu. Ďalej práca poskytuje prehľad parametrov vybraných prístrojov dostupných na svetovom trhu a oblastí ich použitia. Čitateľ sa oboznámi s funkciami prístroja HF2LI a programu ziControl. Predposledná kapitola je venovaná návrhu experimentu zameraného na generovanie a meranie sínusového signálu, frekvenčne modulovaného signálu a amplitúdovo modulovaného signálu. Praktická časť je zameraná na prácu s prístrojom HF2LI s cieľom overiť vlastnosti prístroja a programu ziControl. Posledná kapitola popisuje vykonané experimenty a dosiahnuté výsledky.

Kľúčové slová

Zosilňovač s fázovým závesom, fázový záves, prístroj HF2LI, ziControl, ziBase.

Abstract

The aim of the master thesis is on lock-in amplifiers. Amplifier's basic parts and lock-in circuits description is listed in introductory chapters. The thesis offers overview of parameters of chosen devices available on the market and their possible usage. We describe HF2LI device functions and usage of ziControl software. With the aim to verify properties of the device and ziControl software, one of the last chapters focuses on manipulation with HF2LI device. The conducted experiments and achieved results are presented in the last chapter.

Keywords

Lock-in amplifier, phase locked loop, device HF2LI, ziControl, ziBase.

Bibliografická citácia:

FÁBIK, P. *Zesilovač s fázovým závěsem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 64s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Miloslav Čejka, CSc.

Prehlásenie

„Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému Zesilovač s fázovým závěsem vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, nezasiahol som nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som chcel pod'akovať svojmu odbornému konzultantovi a vedúcemu diplomovej práce **Ing. Miloslavovi Čejkovi, CSc** za jeho hodnotné rady a pripomienky k vypracovaniu tejto diplomovej práce.

V Brne dňa: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Fázový záves.....	10
2.1	Fázový detektor.....	11
2.1.1	Analógový detektor.....	11
2.1.2	Číslicový detektor s hradlom Exclusive OR.....	13
2.1.3	Číslicový detektor s preklápacími obvodmi	13
2.2	Dolnopriepustný filter (DP)	14
2.3	Napätím riadený oscilátor (VCO)	14
3	Zosilňovač s fázovým závesom	15
3.1	Základné časti zosilňovača s fázovým závesom	15
3.2	Preddetekčné spracovanie signálu.....	16
3.3	Heterodynná filtrácia.....	18
3.4	Referenčný kanál.....	19
3.5	Koherentný demodulátor.....	21
3.6	Spínačové koherentné demodulátory	22
3.7	Post detekčné obvody.....	23
3.8	Jednotky zobrazovaných hodnôt	25
3.9	Oblasti použitia zosilňovačov s fázovým závesom.....	25
4	Zosilňovač HF2LI.....	26
4.1	Konštrukcia HF2LI	26
4.2	Popis zariadenia HF2LI.....	27
4.2.1	Čelný panel HF2LI	27
4.2.2	Zadný panel HF2LI.....	28
4.3	Prevádzkové režimy HF2LI	29
4.3.1	Vnútorý referenčný mód.....	29
4.3.2	Externý referenčný mód.....	29
4.3.3	Auto referenčný mód	29
4.3.4	Multi-frekvenčné operácie	29
4.4	Ovládanie zariadenia HF2LI	30
5	Zi Control.....	31
5.1	Sekcia Settings	31
5.1.1	Lock-in.....	31
5.1.2	Multifrequency.....	32
5.1.3	Modulation.....	32
5.1.4	PLL	33
5.1.5	Auxiliary I/O.....	33
5.1.6	Save.....	34
5.1.7	Connectivity.....	34

5.2	Sekcia Tools	35
5.2.1	Numerical Tools	35
5.2.2	Spectroscope Tools	35
5.2.3	Frequency Sweeper Tools	35
5.2.4	Zoom FFT Tools	35
5.2.5	Oscilloscope Tools.....	36
5.2.6	Status Tool a History Log.....	36
6	Prehľad komerčne dostupných Lock-in zosilňovačov.....	37
6.1	Zosilňovač s fázovým závesom SR850 DSP	37
6.2	Zosilňovač s fázovým závesom UHFLI.....	39
6.3	Zosilňovač s fázovým závesom 7270 DSP	40
6.4	Porovnanie HF2LI s inými zariadeniami	41
7	Návrh experimentu	43
7.1	Generovanie testovacieho sínusového signálu.....	43
7.2	Zobrazenie testovacieho signálu	43
7.3	Meranie testovacieho signálu	44
7.4	Meranie amplitúdovo modulovaného testovacieho signálu.....	44
7.5	Meranie frekvenčne modulovaného testovacieho signálu	45
8	Overenie funkcií zosilňovača s fázovým závesom HF2LI	46
8.1	Meranie amplitúdovo modulovaného signálu.....	46
8.1.1	Použité nástroje.....	46
8.1.2	Riešenie.....	46
8.1.3	Zhrnutie.....	48
8.2	Meranie frekvenčne modulovaného signálu	49
8.2.1	Použité nástroje.....	49
8.2.2	Riešenie.....	49
8.2.3	Zhrnutie.....	51
8.3	Meranie s využitím fázového závesu	51
8.3.1	Použité nástroje.....	51
8.3.2	Riešenie.....	51
8.3.3	Zhrnutie.....	53
8.4	Meranie vstupného šumu zariadenia HF2LI	53
8.4.1	Použité nástroje.....	53
8.4.2	Riešenie.....	54
8.4.3	Zhrnutie.....	56
8.5	Diskusia výsledkov	57
9	Záver	59

1 ÚVOD

Diplomovú prácu na tému „Zesilovač s fázovým závěsem“ som si vybral z dôvodu záujmu o meraciu techniku, ku ktorej som sa dostal už pri písaní bakalárskej práce. Pred diplomovou prácou som sa stretol s pojmom zosilňovač s fázovým závesom len veľmi okrajovo a nevedel som, ako dané zariadenie funguje, čo vyvolalo u mňa záujem o danú tému. Ďalším z dôvodov je, že na pôde Vysokého učení technického v Brně nebola daná téma ešte spracovávaná.

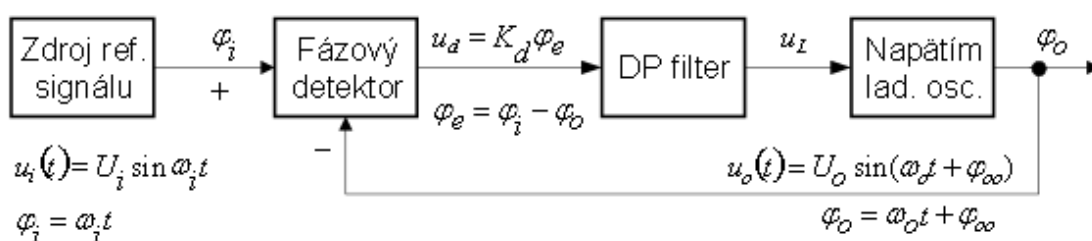
Zosilňovač s fázovým závesom je špeciálny typ zosilňovača používaný na detekciu a meranie veľmi malých striedavých signálov, ležiacich aj hlboko pod úrovňou šumu. Prvé komerčne dostupné zariadenie sa objavilo na trhu v roku 1962 a bolo realizované analógovou technológiou. Pokrok v polovodičovej technike umožnil v posledných dvadsiatich rokoch realizovať vysoko kvalitné zosilňovače s fázovým závesom výhradne číslicovými metódami.

Začiatok diplomovej práce je venovaný popisu činnosti základných častí zosilňovača a obvodom fázového závesu. Ďalej je v práci popísaná konštrukcia prístroja HF2LI, jeho prevádzkové režimami a programom ziControl. Osobitná kapitola je venovaná prehľadu prístrojov dostupných na svetovom trhu a porovnaniu zariadenia HF2LI s produktmi konkurencie. V práci je obsiahnutý návrh experimentu zameraného na generovanie a meranie sínusového signálu, frekvenčne modulovaného signálu a amplitúdovo modulovaného signálu. Záverečná kapitola je venovaná popisu vykonaných experimentov, ktorých cieľom je overiť vlastnosti prístroja HF2LI a programu ziControl.

Po prečítaní tejto diplomovej práce by mal byť čitateľ oboznámený s teoretickými princípmi využívanými u zosilňovačoch s fázovým závesom, komerčne dostupnými zariadeniami (a ich parametrami), ovládaním a funkciami prístroja HF2LI a experimentmi overujúcimi jeho vlastnosti.

2 FÁZOVÝ ZÁVES

Fázový záves PLL (Phase Locked Loop) je zostava elektronických obvodov, ktoré slúžia na generovanie periodického signálu a realizáciu frekvenčnej, alebo fázovej synchronizácie (koherencie) dvoch periodických signálov. V roku 1932 bol objavený efekt fázovej synchronizácie pri experimentoch so synchronnou detekciou amplitúdovo modulovaných signálov v rádiových prijímačoch. Prvé komerčné využitie nastalo v päťdesiatych rokoch vo frekvenčných syntetizátoroch krátkovlnných prijímačov. Z pohľadu teórie riadenia a regulácie predstavuje PLL špeciálny regulačný obvod, ktorého regulovanou veličinou je okamžitá fáza periodického signálu.^{[1][2]}



Obr. č. 2.1: Bloková schéma analógového fázového závesu ^[1]

Fázový záves (Obr. č. 2.1) sa skladá z fázového detektoru PD (Phase Detector), dolnopriepustného filtra DP, napätím riadeného oscilátora VCO (Voltage Controlled Oscillator) a popri prípade generátoru referenčného signálu. Fázový detektor porovnáva fázový posun vstupného referenčného signálu $u_i(t)$ oproti signálu z VCO $u_o(t)$ a vytvára napätie u_d úmerné ich vzájomnému fázovému posunu. V ideálnom prípade je vzťah medzi napätím u_d a fázovou chybou φ_e lineárny

$$u_d = K_d \cdot \varphi_e \quad (2.1)$$

kde K_d [V/rad] je prevodová konštanta DP filtra.

Napätie u_d prechádza DP filtrom na ktorého výstupe vzniká jednosmerné napätie u_L , ktoré je riadiacou veličinou VCO. „Po ustálení synchronného stavu v slučke fázového závesu platí: $\omega_o = \omega_i$ t.j. signály sú frekvenčne synchronizované.“^[1] O fázovej synchronizácii hovoríme vtedy, ak je rozdiel fáz signálov zanedbateľný (menší ako 1 stupeň). Ak nie je rozdiel fáz zanedbateľný, ale je konštantný, vtedy hovoríme o frekvenčnej synchronizácii. Doplnením deličiek frekvencie pred fázový detektor v priamej a spätnej väzbe vznikne frekvenčný syntetizátor.^{[1][2][3]}

2.1 Fázový detektor

Fázový detektor je jeden z najdôležitejších obvodov PLL a od jeho vlastností sú prakticky závislé všetky parametre fázového závesu. Existuje viacero konštrukcií fázového detektoru. PD môžeme rozdeliť na analógové a číslicové, fázové a frekvenčno-fázové.^[2]

2.1.1 Analógový detektor

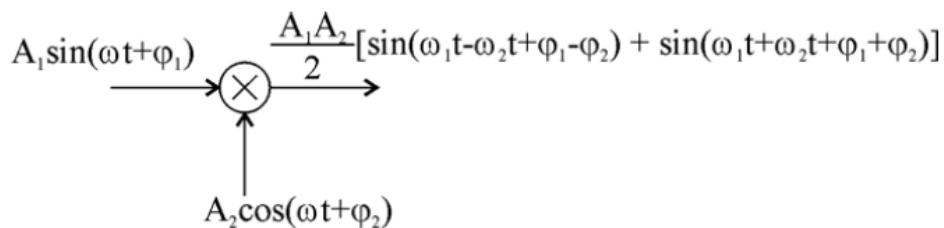
Analógový detektor je násobič s dvoma vstupmi (obr. č. 2.2), na ktoré sú privedené harmonické signály $A_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$ a $A_2 \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$. Signály sa prenasobia a dôjde k ich zmiešaní. Na výstupe násobiča vzniká signál skladajúci sa zo súčtovej a rozdielovej zložky:

$$A_1 \cdot A_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot [\sin(\omega_1 t - \omega_2 t + \varphi_1 - \varphi_2) + \sin(\omega_1 t + \omega_2 t + \varphi_1 + \varphi_2)] \quad (2.2)$$

V synchronnom režime, sú signály frekvenčne synchronizované ($\omega_1 = \omega_2$), môžeme teda vzťah (2.2) zjednodušiť na:

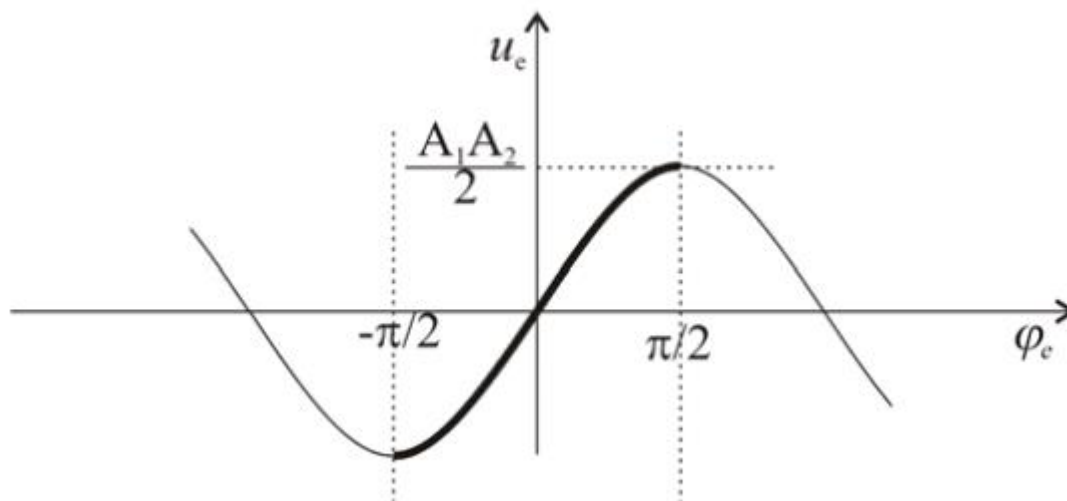
$$A_1 \cdot A_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot [\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin(2 \cdot \omega t + \varphi_1 + \varphi_2)] \quad (2.3)$$

Rozdielová zložka je jednosmerný signál s amplitúdou závislou na fázovom rozdiel vstupných signálov a nesie užitočnú informáciu (fázový rozdiel). Frekvencia súčtovej zložky sa zdvojnásobila a je to neužitočná zložka, pretože neobsahuje informáciu o vzájomnej fáze vstupných signálov. Táto neužitočná rušivá zložka sa odfiltruje pomocou dolnopriepustného filtra, ktorý prepustí len jednosmernú rozdielovú zložku.^[2]



Obr. č. 2.2: Analógový násobič^[2]

Na obr. č. 2.3 je prechodová charakteristika analógového detektoru, ktorá vyjadruje závislosť výstupného napätia na fázovom rozdiely vstupných signálov. Hrubou čiarou je vyznačená pracovná oblasť detektoru.

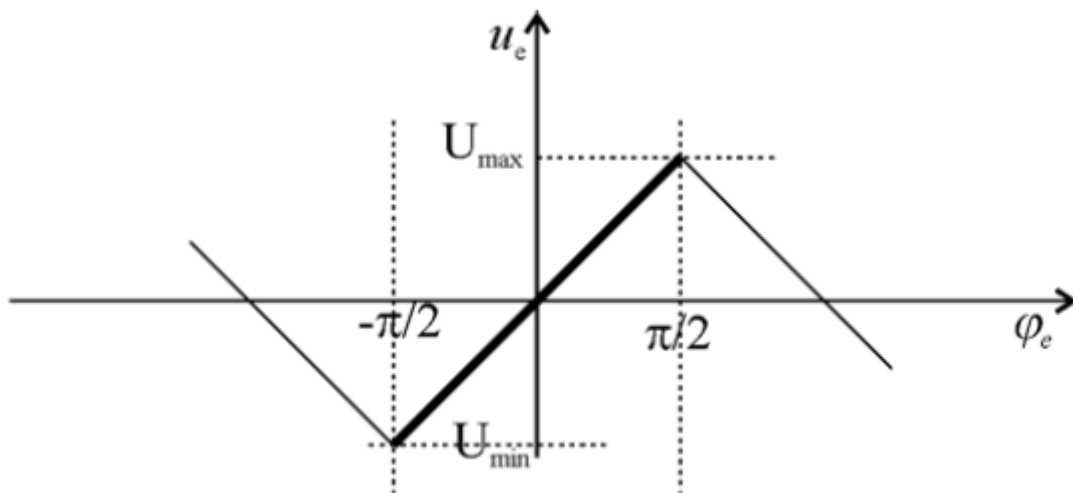


Obr. č. 2.3: Prechodová charakteristika analógového detektoru ^[2]

2.1.2 Číslicový detektor s hradlom Exclusive OR

Vstupné a výstupné signály nadobúdajú len dve hodnoty a vstupy hradla vyhodnocujú, či sa jedná o kladnú, alebo zápornú hodnotu signálu. Vstupy hradla majú charakter napäťového komparátoru. Výstupný signál nezávisí od amplitúdy vstupných signálov, ale len od ich vzájomnej fázy. Číslicový detektor sa vyznačuje jednoduchšou konštrukciou oproti analógovému. Prevodom vstupného harmonického signálu na pravouhlý vznikajú vyššie harmonické zložky, ktoré kladú vyššie nároky na následnú filtráciu výstupného signálu.

Na obr. č. 2.4 je prechodová charakteristika číslicového detektoru s hradlom exclusive OR. Konštrukciou detektoru sú dané hodnoty U_{MAX} a U_{MIN} , ktorých krajná hodnota závisí na napájacom napätí.^[2]



Obr. č. 2.4: Prechodová charakteristika číslicového detektoru s hradlom Exclusive OR^[2]

2.1.3 Číslicový detektor s preklápacími obvodmi

Je to frekvenčne-fázový detektor skladajúci sa z viacerých preklápacích obvodov, ktoré sa vyrábajú aj vo forme integrovaných obvodov. Stavový diagram obvodu je rozdelený na tri časti. Obvod pracuje v jednej časti diagramu v závislosti od pomeru frekvencií signálov (signál A má väčšiu, rovnú, alebo menšiu frekvenciu ako signál B). Jednosmerná zložka výstupného signálu je potom presne definovaná rozdielom frekvencií.^[2]

2.2 Dolnopriepustný filter (DP)

Hlavnou funkciou DP filtru je odstránenie nežiaducej striedavej zložky zo signálu a prepustenie jednosmernej zložky. Ďalej má potláčať rýchle zmeny signálu spôsobené rušením, alebo moduláciou referenčného signálu. DP filter nesmie mať veľký fázový posun, aby nebola ohrozená stabilita slučky. Taktiež rozhoduje o dynamických vlastnostiach PLL. Používa sa RC filter s tlmením. Klasický RC filter má veľký fázový posun pri vyšších frekvenciách (približuje sa k 90°).^[2]

2.3 Napätím riadený oscilátor (VCO)

VCO (tiež používaná skratka NLO) má v obvodoch PLL charakteristiku ako ideálny integrátor s prenosovou funkciou $\frac{1}{p}$. V praxi je riešený ako RC alebo LC oscilátor. RC oscilátory (multivibrátory) sa používajú pre nižšie frekvencie a spravidla majú pravouhlý priebeh výstupného signálu. LC oscilátory sa zas používajú pre vyššie frekvencie skladajú sa z varikapov a majú harmonický priebeh výstupného signálu. Výstupná frekvencia ideálneho VCO je lineárna závislosť vzhľadom k riadiacemu napätiu u_L . Pre lineárnu aproximáciu charakteristiky VCO v okolí ω_{Ostr} platí:

$$\omega_O = \omega_{Ostr} + K_O \cdot (u_L - u_{Lstr}) \quad (2.4)$$

kde ω_O je výstupná napätím riadeného oscilátoru [rad/s], K_O je konštanta predstavujúca strmosť prechodovej charakteristiky a u_L je jednosmerné riadiace napätie.

Konštantu K_O vieme konštrukciou oscilátoru nastaviť, v praxi sa pohybuje vo veľkých medziach (napr. 0,1 Hz/V až po 100 MHz/V).^{[1][3]}

3 ZOSILŇOVAČ S FÁZOVÝM ZÁVESOM

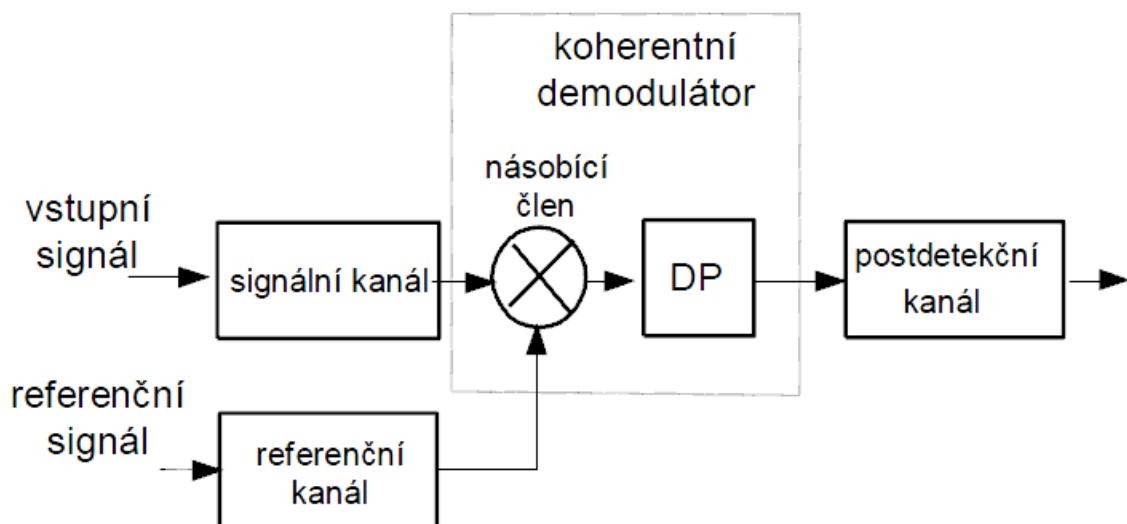
Zosilňovač s fázovým závesom (Lock-in amplifier) je špeciálny typ zosilňovača používaný na detekciu a meranie veľmi malých striedavých signálov (až do jednotiek nanovoltov), ležiacich aj hlboko pod úrovňou šumu. Známy je tiež ako fázovo-citlivý detektor (phase-sensitive detector) využívajúci vlastnosti koherentnej demodulácie.^[6]

„Prvá zmienka o koherentnej demodulácii a jej využití pochádza z článku Waltera C. Michelse z roku 1941 (*Review of Scientific Instruments*), v ktorom sa po prvé používa označenie LIA (Lock-in amplifier). Za tvorcu prvého zosilňovača s fázovým závesom sa považuje tím pracovníkov vedecko-výskumných laboratórií Princeton Applied Research (PAR). Prvý komerčne dostupný LIA z dielne PAR sa objavil na trhu v roku 1962. Prevažná väčšina prístrojov patriacich do kategórie LIA bola v minulom storočí realizovaná analógovou technikou. Pokrok v polovodičovej technike umožnil v posledných 20-tich rokoch realizovať vysoko kvalitné LIA skoro výhradne číslicovými metódami.“^[4]

3.1 Základné časti zosilňovača s fázovým závesom

Obr. č. 3.1 vyjadruje zapojenie základných štyroch častí LIA skladajúceho sa z:^[4]

- 1) Preddetekčného spracovania signálu (signální kanál)
- 2) Vlastného koherentného demodulátoru
- 3) Spracovania referenčného signálu (referenční kanál)
- 4) Postdetekčného spracovania signálu



Obr. č. 3.1: Základné časti prístrojovo realizovaného koherentného demodulátoru ^[5]

3.2 Predetekčné spracovanie signálu

„Hlavnou úlohou tejto časti je dosiahnuť požadovaného pomeru užitočného výstupného signálu U_{PV} k rušeniu (driftu) koherentného demodulátoru (KD) a obvodov pre postdetekčné spracovanie. Súčasne musí byť zaistené, aby mohol prístroj bez následkov spracovávať čo najväčšiu hodnotu rušivého signálu (tzv. dynamickú rezervu).“^[4]

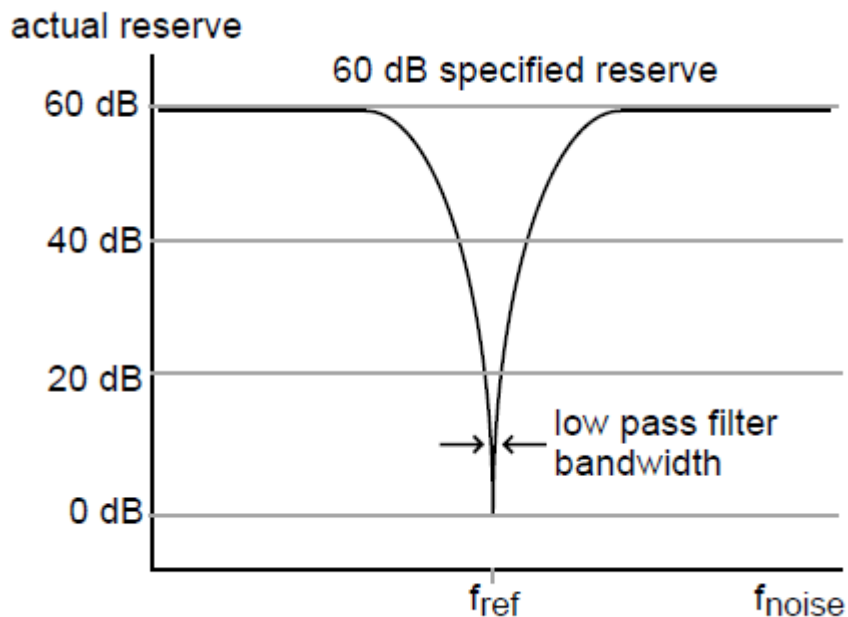
Dynamická rezerva (DR) je definovaná ako pomer:

$$DR = \frac{U_{SATA}}{U_{PV}} \quad (3.1)$$

kde U_{SATA} je hranica linearity prevodovej charakteristiky zosilňovača, U_{PV} je úroveň napätia na vstupe koherentného demodulátoru nutná pre plnú výchylku.^[4]

Dynamická rezerva je pomer najväčšieho tolerovateľného šumového signálu k plnému rozsahu vstupného signálu, udávaný v dB. Musíme zabezpečiť, aby šum neprekročil „tolerovateľnú“ hranicu dynamickej rezervy a nedošlo tak k preťaženiu prístroja. To je možné dosiahnuť nastavením veľmi malého vstupného zisku. Šum nemôže spôsobiť preťaženie ale zato signál z koherentného demodulátoru bude veľmi malý. Väčšinou je tolerovateľný šum definovaný ako úroveň šumu, ktorá neovplyvní výstup viac ako o pár percent (v praxi 5 %). Analógový KD má problém s vysokou dynamickou rezervou z dôvodu linearity fázového detektoru a DC offsetu Δu_{DDZ} (drift vlastného demodulátoru a post detekčného zosilňovača).^{[4][6]}

Pri použití 60 dB dynamickej rezerve u analógových zosilňovačoch je posun DC v rádoch 1000 ppm/°C. To znamená, že sa hýbe nulový bod okolo 1 % z plného rozsahu pri zmene teploty o 10 °C čo je považované za hranicu tolerovateľnosti. Čistý šum na referenčnej frekvencii prejde na výstup bez utlmenia. Ako ukazuje obr. č. 3.2 na referenčnej frekvencii je dynamická rezerva 0 dB a zo vzdiaľovaním šumovej frekvencie od referenčnej frekvencie dynamická rezerva narastá vďaka útlmu na dolnopriepustnom filtri. Rýchlosť ktorou dynamická rezerva narastá závisí od časovej konštanty a maximálneho potlačenia (rolloff) dolnopriepustného filtra. To je dôvod prečo je filter s nárastom 24 dB/oct lepší ako filter s 6 dB/oct, alebo s 12 dB/oct. Ak je frekvencia šumu dostatočne vzdialená od referenčnej frekvencie rezerva závisí už len od nastaveného vstupného zisku a je udávaná výrobcom. Vzhľadom na spomínané obmedzenia analógového KD je nutné použiť rôzne techniky na zvýšenie dynamickej rezervy. Najčastejšie sa používajú predradné analógové filtre s laditeľnými pásmovými priepustkami, ktoré zvýšia dynamickú rezervu až o 20 dB. Filtre sú navrhnuté tak aby automaticky sledovali referenčnú frekvenciu. Pridávajú tiež svoj vlastný šum, ktorý spôsobuje fázovú chybu a preto sú aplikované iba, keď je to nutné.^[6]



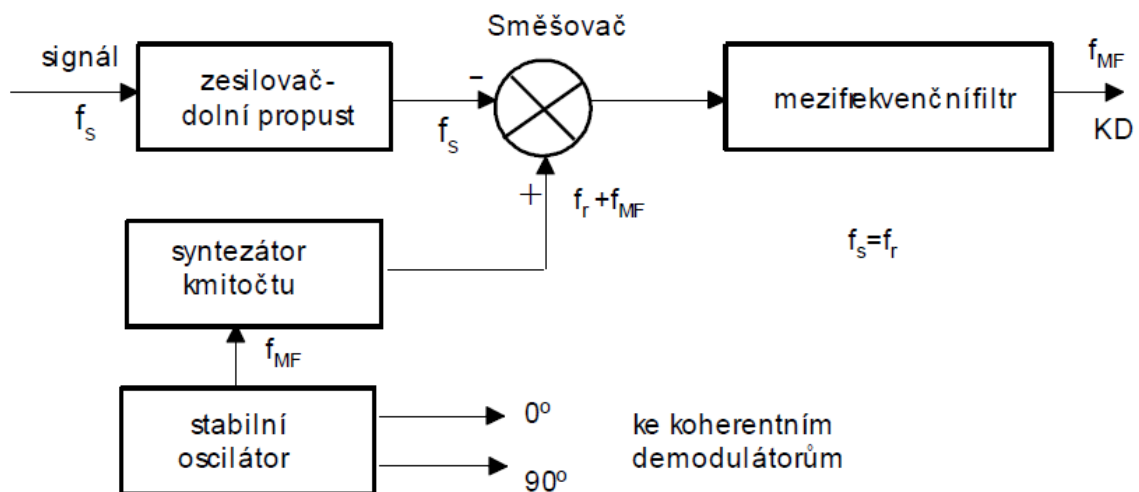
Obr. č. 3.2: Pokles dynamickej rezervy vzhľadom na frekvenciu šumu ^[6]

Vďaka tomu, že digitálne koherentné demodulátory nemajú na výstupe DC chybu, môže byť ich dynamická rezerva nastavená na úroveň 100 dB bez toho aby nastala chyba merania. Jedinou nevýhodou je nárast šumu na výstupe A/D prevodníku. Ten nastáva v prípade, že je dynamická rezerva zvýšená nad 60 dB (čo u digitálnej je) a zároveň nad minimálnu rezervu. Dôvod prečo nie je prekročená minimálna rezerva tak dôležitá je ten, že vstupný šum (napr. $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) je po zosilnení väčší ako šum vytvorený A/D prevodníkom. Použitím viacerých dolnopriepustných filtrov za fázový detektor sa zvyšuje dynamická rezerva v okolí referenčnej frekvencie. Spomínaná dynamická rezerva (100 dB) sa týka rušivých signálov na pracovných frekvenciách do 100 kHz, na vyšších frekvenciách je v skutočnosti dynamická rezerva väčšia. ^[6]

Najúčinnejšie prístupy zvýšenia dynamickej rezervy sú založené na filtrácii rušivého signálu na výstupe zosilňovača. Preto by mal byť signálový kanál koncipovaný ako úzkopásmový obvod. To však odporuje požiadavku prevádzky prístroja v širokom rozsahu kmitočtov, pretože úzkopásmová priepusť vytvára značné zmeny fáze i pri relatívne malých odchýlkach kmitočtu signálu a referenčného priebehu. Realizácia pomocou laditeľných úzkopásmových filtrov by bola obvyklými metódami veľmi ťažko realizovateľná. Riešením je heterodynná filtrácia. ^[4]

3.3 Heterodynná filtrácia

Na obr. č. 3.3 sa nachádza bloková schéma heterodynnej filtrácie založenej na zmiešavacom princípe. Zmiešavač (směšovač) spracováva zosilnený vstupný signál s frekvenciou f_s a signál z referenčného kanálu s frekvenciou $f_r + f_{MF}$. Na výstupe vzniká rozdielový signál na medzifrekvenčnej frekvencii f_{MF} , ktorý je úzkopásmovo zosilnený medzifrekvenčnými obvodmi. Pre splnenie podmienky koherencie musí platiť $f_s = f_r$, alebo musí byť frekvencia f_s dopredu známa.



Obr. č. 3.3: Signálový kanál s hererodynnou filtráciou ^[5]

Výhody heterodynnej filtrácie:^[4]

- 1) koherentný demodulátor pracuje na jednej frekvencii f_{MF} , vďaka čomu je jednoduché optimalizovať jeho vlastnosti
- 2) použitím pevne ladených piezokeramických filtrov s ekvivalentným činiteľom jakosti Q sa dá podstatne zvýšiť selektivita (šírka priepustného pásma radovo v 100 Hz)
- 3) jednoduché generovanie referenčných signálov na frekvencii f_{MF} navzájom fázovo posunutých o 90°
- 4) správnu voľbou frekvencie f_{MF} sa potlačia vyššie harmonické signály

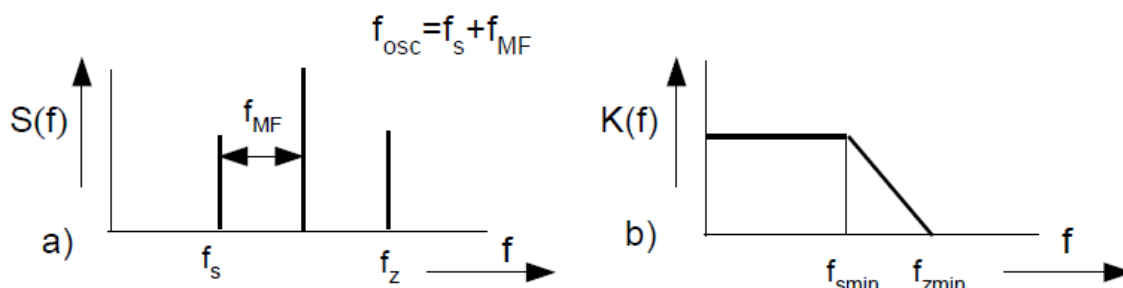
Nevýhody heterodynnej filtrácie:^[4]

- 1) zložitejšia konštrukcia
- 2) možnosť vzniku rušivých signálov na nelinearitách zmiešavača, t.j. signálov na frekvenciách odpovedajúcich lineárnej kombinácii frekvencií, na ktorých obvod zmiešavača pracuje
- 3) rušivé pôsobenie zrkadlových frekvencií

Zrkadlové frekvencie sa potláčajú pomocou dolnofrekvenčnej priepuste pred zmiešavačom (obr. č. 3.3). Dolnofrekvenčná priepusť je koncipovaná tak, aby aj v prípade, keď je zrkadlová frekvencia minimálna $f_{z\ min}$, bola jej úroveň pred zmiešavačom menšia ako prípustná (obr. č. 3.4 b)). Z obr. č. 3.4 a) platí:

$$f_{z\ min} = f_{s\ min} + 2 \cdot f_{MF} \quad (3.2)$$

kde $f_{s\ min}$ je minimálna frekvencia signálu, f_{MF} je medzifrekvenčná frekvencia. Zo zväčšovaním f_{MF} klesajú nároky na dolnú priepusť (DP), tú však nie je možné príliš zvyšovať. Pri vyšších frekvenciách by bolo zložité zaistiť správnu funkciu násobičky, alebo spínačov v koherentnom demodulátore.^[4]



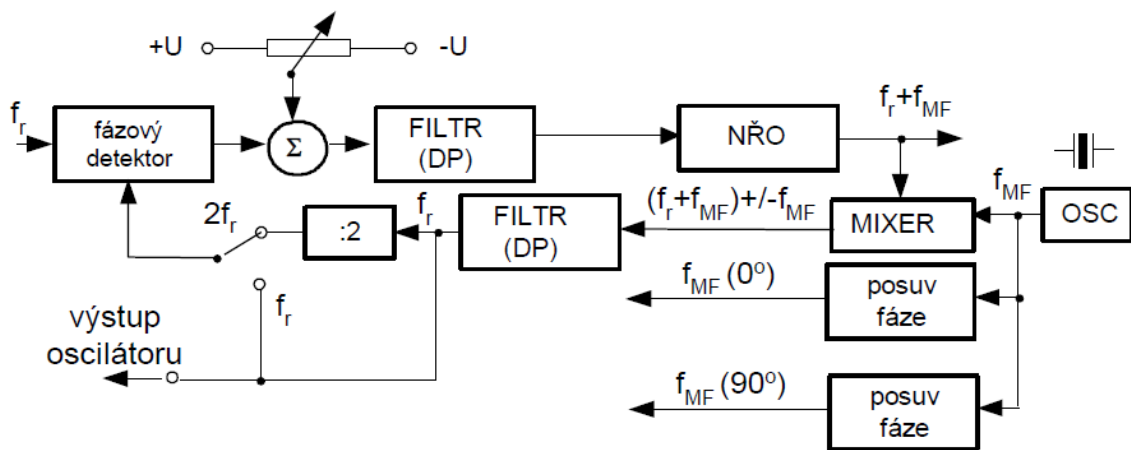
Obr. č. 3.4: Zrkadlová frekvencia a jej potlačenie ^[5]

3.4 Referenčný kanál

„Jeho hlavnou úlohou je zaistiť splnenie podmienky koherencie funkcionálu signálu $s(t)$ a referenčného priebehu, a to i pri zmenách frekvencie signálu v dovolených medziach. Obecne to vyžaduje apriornú znalosť tých parametrov signálu, z ktorých je možné odvodiť jeho frekvenciu a fázu.“ Táto úloha je v obecných situáciách pre z celá neznáme signáli neriešiteľná. Správnou stratégiou návrhu experimentu je však možné docieľiť, aby bol priebeh $s(t)$ dopredu známim.^[4]

„Obr. č. 3.5 zobrazuje typickú architektúru referenčného kanálu prístroja pre koherentnú demoduláciu. Základ tvorí slučka fázového závesu (PLL) so zmiešavačom vo vetve spätnej väzby. Výstupný signál napätím riadeného oscilátora (NŘO) na frekvencii $f_r + f_{MF}$ predstavuje signál pre zmiešavač heterodynneho filtra v signálovom kanály. Stabilita frekvencie výstupného signálu slučky je odvodená z kryštálom riadeného oscilátora, pracujúceho na frekvencii f_{MF} . Vstupná informácia o frekvencii signálu $s(t)$ pre fázový detektor PLL, na základe ktorej má byť zaistená koherencia, je po prípadných tvarových a úrovňových úpravách získaná z experimentu.

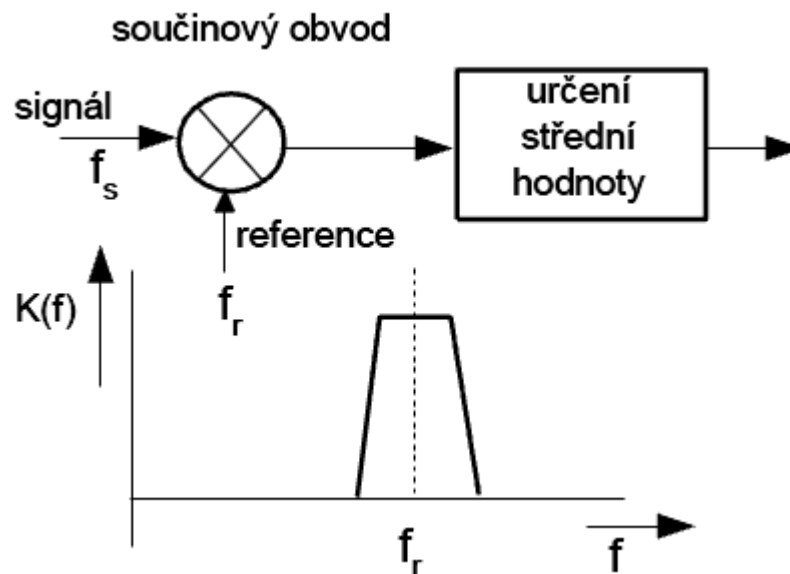
V prípadoch, keď nie je voľba frekvencie f_s z hľadiska charakteru pokusu kritická, dá sa pre účely experimentu použiť priamo výstupné napätie za zmiešavačom referenčného kanálu. Pri tomto tzv. internom režime je NŘO preladený napätím ovládaným z čelného panelu na požadovanú hodnotu f_s a úloha PLL sa zredukuje na generovanie signálu na frekvencii $f_r + f_{MF}$. V externom režime ide z podstaty činnosti PLL očakávať, že i pri krátkodobých výpadkoch informácií o frekvencii signálu bude ďalej generovať signál na frekvencii blízkej požadovanej hodnote.“ Použitím deličiek frekvencie v spätnej väzbe PLL zabezpečíme aby frekvencia f_r bola celočíselným násobkom základnej frekvencie f_s . Ak je potrebné použiť dva ortogonálne referenčné signály, využíva sa zapojenie tzv. stavových oscilátorov u ktorých sú jednoducho dostupné dva signály s fázou 0° a 90° nezávislou na zmenách frekvencie.^[4]



Obr. č. 3.5: Referenčný kanál koherentného demodulátoru ^[5]

3.5 Koherentný demodulátor

„Ideálny KD by mal realizovať matematické operácie potrebné pre odhad amplitúdy signálu. V prístrojovom prevedení sa používajú suboptimálne algoritmy vhodné pre rušenie typu biely šum, kde je základným modelom analógová násobička s filtráciou výstupného signálu dolnofrekvenčnou priepusťou.“ I v prípade bieleho šumu je potrebná úprava tvaru referenčného signálu s ohľadom na priebeh $s(t)$, ktorý sa najčastejšie v praxi vyskytuje ako harmonický.^[4]



Obr. č. 3.6: Ekvivalentná amplitúdovo-frekvenčná charakteristika ideálneho KD ^[5]

„Ekvivalentná amplitúdovo-frekvenčná charakteristika koherentného demodulátoru sa odlišuje od zaužívaného pojatia pre lineárne obvody, v ktorých každá frekvencia vstupného signálu odpovedá výstupnému signálu na rovnakej frekvencii, avšak s inou amplitúdou a fázou. Pod amplitúdovo-frekvenčnou charakteristikou sa tu rozumie vyjadrenie oblastí frekvencií, ktoré vyvolajú príspevok k výstupnému signálu za dolnofrekvenčnou priepusťou demodulátoru. Spektrum výstupného signálu násobičky je dané konvolúciou Fourierovej transformácie spektra vstupného signálu $v(t)$ a referenčného priebehu $s(t)$, takže platí:^[4]

$$Y(j\omega) = V(j\omega) * S(j\omega) \quad (3.3)$$

kde * znamená konvolúciu.

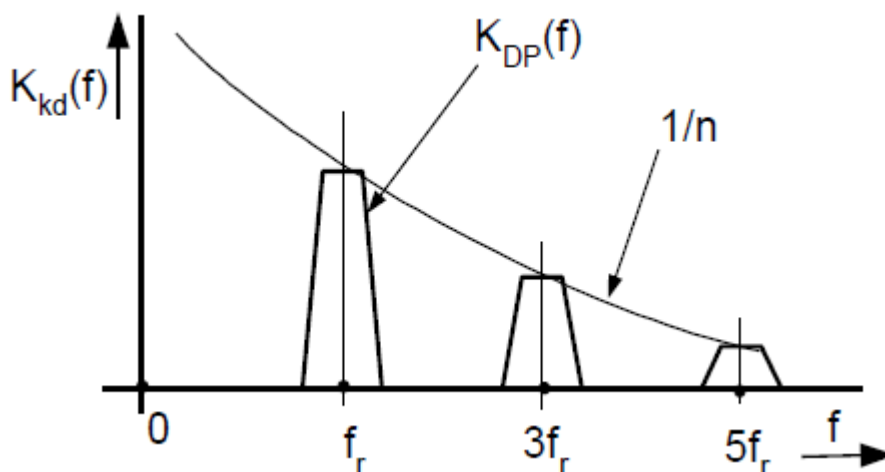
Na obr. č. 3.6 je ekvivalentná amplitúdovo-frekvenčná charakteristika, ktorá má pri harmonickom signály $s(t)$ tvar pásmovej priepuste s priebehom kopírujúcim prenos dolnej priepuste zrkadlovo symetricky okolo frekvencie referenčného priebehu f_r . Koherentné demodulátory s analógovou násobičkou sú vhodné pre aplikácie, kde je potrebná regenerácia signálu zo šumu a pritom sú maximálne úrovne rušenia relatívne malé oproti pásmu linearity obvodu násobičky. S ohľadom na požadovanú dynamickú rezervu je obvodová realizácia násobičky zložitá, pretože sa pri väčších signáloch nepriaznivo uplatnia jej nelinearity.^[4]

3.6 Spínačové koherentné demodulátory

„Periodicky pracujúci spínač predstavuje obvod s časovo premenným prenosom, ovládaným referenčným signálom. Výstupné napätie za spínačom ide popísať ako súčin priebehov vstupného signálu a v rytme premennej spínacej funkcie referenčného signálu $K(t)$, t.j.:“^[4]

$$y(t) = v(t) \cdot K(t) \quad (3.4)$$

Obr. č. 3.7 zobrazuje amplitúdovo-frekvenčnú charakteristiku (AFCH) spínačového koherentného demodulátora, ktorá má tvar hrebeňového filtra zloženého z kópií AFCH dolnej priepuste, symetricky rozložených okolo harmonických.



Obr. č. 3.7: Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika spínačového koherentného demodulátora^[5]

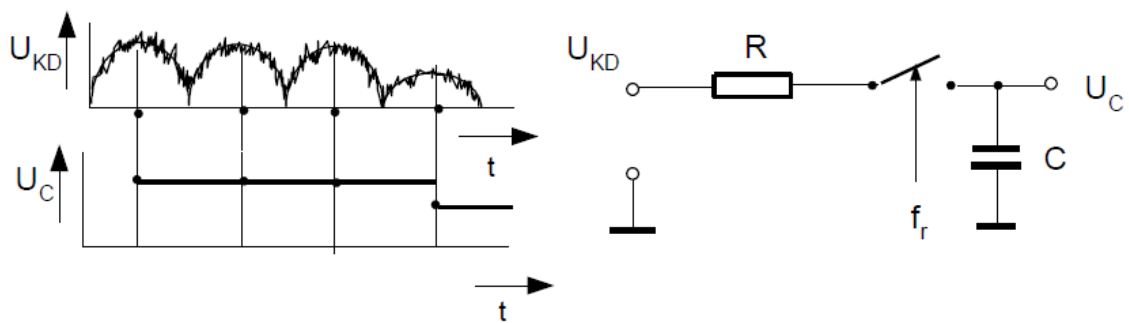
U spínačových KD je možné docieľiť najväčšiu dynamickú rezervu, vďaka stálosti prenosovej charakteristiky $K(t)$ a to i pri veľkých signáloch na vstupe spínača. Pre obmedzenie prieniku riadiaceho signálu na výstup spínača sa používajú galvanicky oddelené zdroje riadiaceho napätia a optoelektronické väzby. „Vlastnosti spínačových KD sú značne závislé na stálosti prepínacej funkcie $K(t)$ a v najčastejšom prípade dvojcestného spínania na jeho presnej symetrii. Nesymetria býva spôsobená kolísaním doby prepnutia Δt_a medzi oboma krajnými hodnotami +1 a -1 priebehu $K(t)$. Nesymetria spôsobuje vznik jednosmernej zložky, ktorá pri zmene Δt_a vplyvom teploty a predovšetkým amplitúdy signálu pôsobí ako prídavný drift a tým znižuje dosiahnuteľnú hodnotu dynamickej rezervy. Preto i pri pomerne nízkych kmitočtoch (desiatky kHz) sú nároky na rýchlosť spínačov mimoriadne. Spínačový KD je vzhľadom k hrebeňovému tvaru AFCH nevýhodný pre spracovanie harmonických signálov pod úrovňou šumu.“ Potlačenie vplyvu na vyšších harmonických je možné dosiahnuť pomocou:^[4]

- 1) Realizácie násobiaceho obvodu na princípe Č/A prevodníku.
- 2) Impulzne šírkovej modulácie.
- 3) Číslicových koherentných demodulátorov.

3.7 Post detekčné obvody

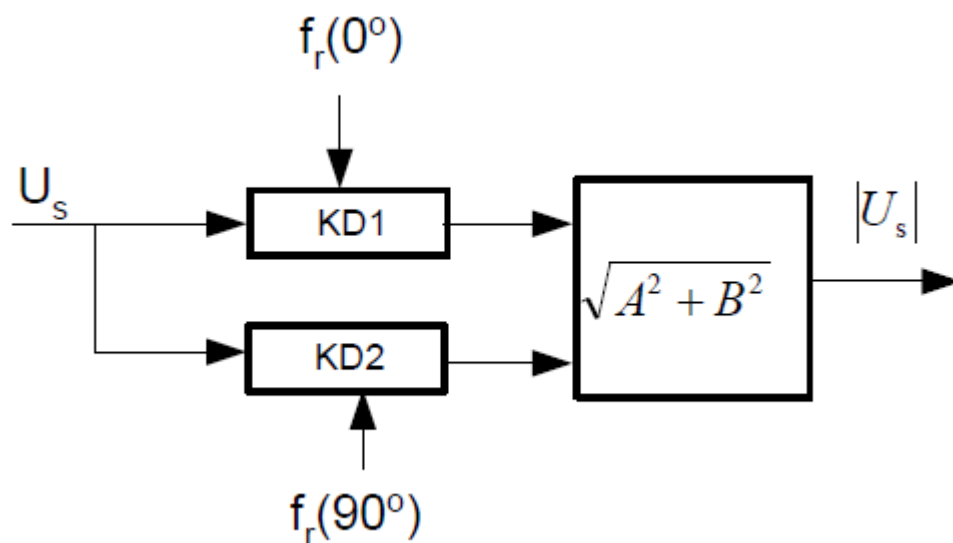
Post detekčné obvody obsahujú dolnofrekvenčnú priepusť, ktorá je navrhnutá ako kompromis medzi potlačením striedavej zložky po detekcii a rýchlosťou reakcie na zmenu amplitúdy signálu z ohľadom na minimálny drift post detekčného obvodu. Je možné zmierniť dané požiadavky použitím „spínanej“ priepuste (obr. č. 3.8), kde je kapacita C nabíjaná na hodnotu výstupného signálu za spínačovým koherentným demodulátorom v presne definovanom okamžiku maxima usmerného priebehu.

„Hlavnou výhodou je, že skoková zmena amplitúdy vyhodnocovaného signálu je zistená už za dobu polperiódy signálu, pokiaľ je časová konštanta RC podstatne kratšia než daná polperióda. Tento postup je však nevhodný pre silne rušené signály, kde okamžité hodnoty zisťované týmto obvodom môžu kolísať. Zo systémového hľadiska je tento typ dolnofrekvenčnej filtrácie zvláštnym prípadom koherentnej demodulácie, v ktorej je referenčným signálom úzky impulz ovládajúci spínač s kmitočtom opakovania rovným dvojnásobku f_s a fáze rovnaj $\pi/2$.“^[4]



Obr. č. 3.8: Použitie vzorkovacieho obvodu ako dolnej priepuste pre koherentný demodulátor ^[5]

Súčasťou post detekčných obvodov je často vektorvoltmeter pracujúci s dvoma koherentnými demodulátormi, ktorých referenčné signály sú navzájom v kvadrature. Jeho úlohou je určenie modulu fázoru meraného signálu. „Obvodom (obr. č. 3.9), alebo výpočtom sa z výstupu A, B oboch KD určí modul U_s , prípadne fáza ($\arctg B/A$). Takto je možné vyhodnotiť amplitúdu (modul) signálu i pri neznámej a premennej fáze signálu.“^[4]



Obr. č. 3.9: Princíp vektorvoltmetru ^[5]

3.8 Jednotky zobrazovaných hodnôt

Podľa všeobecného pravidla sú zobrazované hodnoty napätia v rms (root mean square). Fourierov teorém hovorí, že sa signál skladá so súčtu sínusových signálov s rôznymi amplitúdami a frekvenciami. Ak by bol vstupný obdĺžnikový signál s amplitúdou $2 V_{pp}$, zobrazená veľkosť bude $0,9 V_{rms}$ ($1,273/\sqrt{2}$). Zosilňovač bude detekovať prvú sínusovú zložku $1,273\sin(\omega t)$ z čoho vychádza výpočet zobrazovanej hodnoty vo V_{rms} . Frekvencia je vždy udávaná v Hz, alebo jej násobkoch. Zaužívaným zvykom je tiež, aby bola fáza udávaná v stupňoch.^[6]

3.9 Oblasti použitia zosilňovačov s fázovým závesom

V tejto kapitole sú uvedené oblasti aplikácií udávané výrobcami zosilňovačov s fázovým závesom. Zosilňovač má širokú škálu využitia od nanofyziky cez spektroskopiu až po použitie v senzorovej a meracej technike.

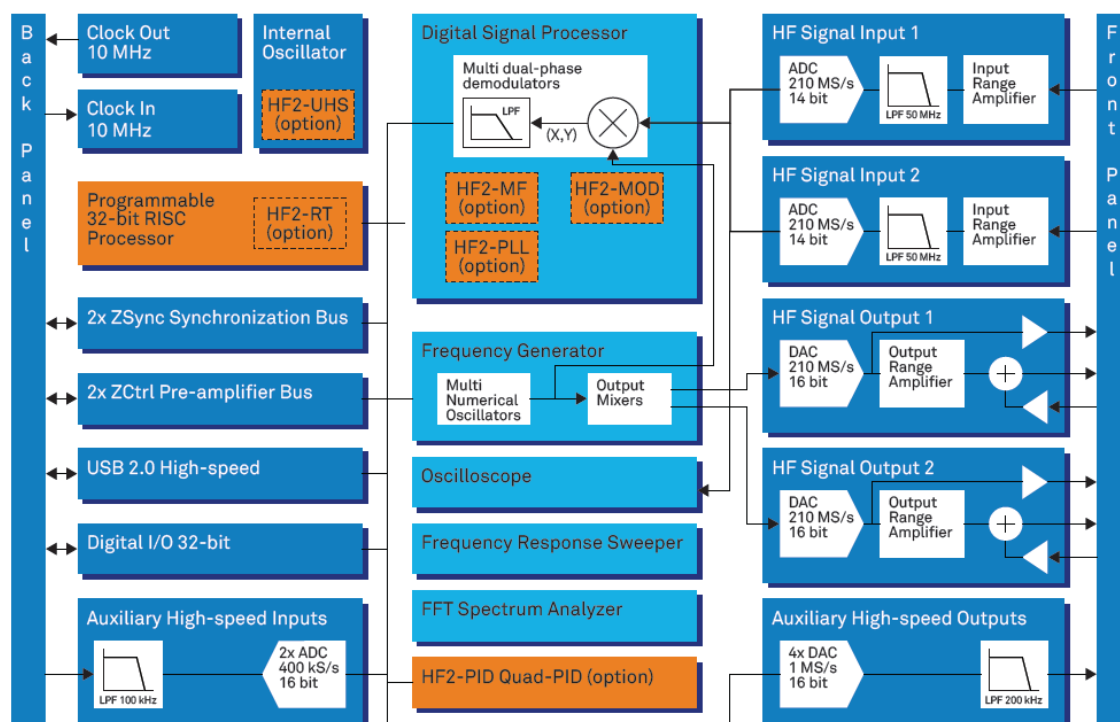
- 1) **Kvantová fyzika a nanofyzika** (Mezoskopické systémy, Spintronika, počítadlo množstva)
- 2) **Mikroskopia** (Mikroskopia atomárnych síl, tunelová spektroskopia)
- 3) **Laserová a fotonická spektroskopia** (THz spektroskopia, nelineárne optické mikroskopy, merač frekvencie a fáze, tandemové demodulátory)
- 4) **Biomedicína** (Elektrická impedančná spektroskopia (EIS), elektrická impedančná tomografia (EIT), bunecná analýza)
- 5) **Senzory a pohony** (Mechanické a optické gyroskopy, MEMS control (Micro-Elektro-Mechanical Systems), vektorový voltmeter, DSP oscilátory (digital signal processing))
- 6) **Polovodičová technika** (Demodulátory, solárne články, radarová detekcia)

4 ZOSILŇOVAČ HF2LI

Zosilňovač s fázovým závesom HF2LI je digitálne meracie zariadenie od firmy Zurich Instruments, u ktorého ovládanie riadiacich komponent prebieha softwarovo. Existuje viacero softwarových programov ako sú ziBase, ziControl, ziServer a ziAPI, ktorých najnovšie verzie je možné získať na internetovej stránke výrobcu [7].

4.1 Konštrukcia HF2LI

Zariadenie HF2LI sa skladá zo štyroch vysoko-frekvenčných analógových blokov, dvoch nízko-frekvenčných pomocných blokov, vnútornej procesorovej časti (bledomodrá), meracích zariadení (spektroskopu, osciloskopu, frekvenčného analyzátoru, FFT spektrálneho analyzátoru atď.), rozhraní (USB 2.0, 32-bitový digitálny I/O, hodinového vstupu, dvoch portov ZSync a dvoch portov ZCtrl) a ďalších prídavných modulov (oranžová), ktoré rozširujú aplikačné možnosti zariadenia. O vybraných parametroch tohto prístroja pojednáva 6. kapitola diplomovej práce. Na obr. č. 4.1 je vyobrazený funkčný diagram zariadenia zo série HF2.^[7]



Obr. č. 4.1: Funkčný diagram série HF2^[7]

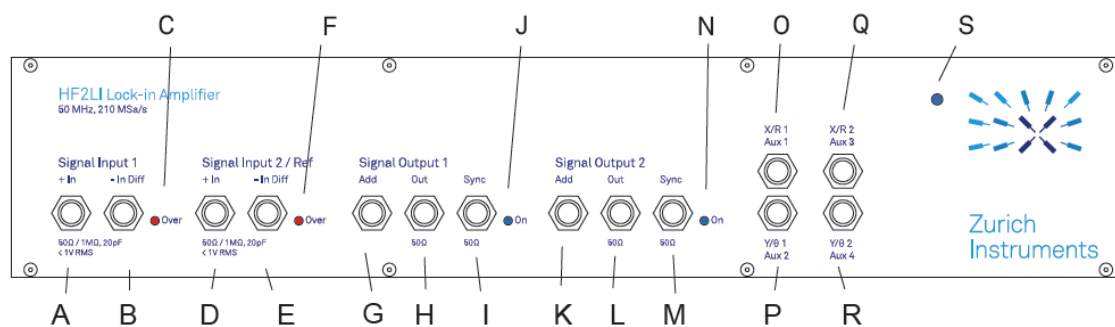
Meraný signál sa pripojí k jednému z dvoch vysokofrekvenčných analógových vstupov, kde je zosilnený v definovanom rozsahu, filtrovaný a digitalizovaný. Výstupný diskretný signál ide do digitálnej signálovej procesnej časti, kde je spracovávaný pomocou šiestich (dual-phase) demodulátorov. Výstupné dáta z demodulátoru prúdia do RISC procesoru (ak je súčasťou zariadenia), alebo sa posielajú priamo do počítača pomocou USB. Tiež je ich možné poslať na pomocné výstupy.^[7]

4.2 Popis zariadenia HF2LI

V tomto odstavci sú popísané jednotlivé časti čelného a zadného panelu, ako sú konektory a signalizačné diódy.

4.2.1 Čelný panel HF2LI

Na čelnom paneli (obr. č. 4.2) sa nachádzajú BNC konektory a kontrolné LED diódy uložené v piatich sekciách. Popis jednotlivých častí čelného panelu obsahuje tab. č. 4.1.



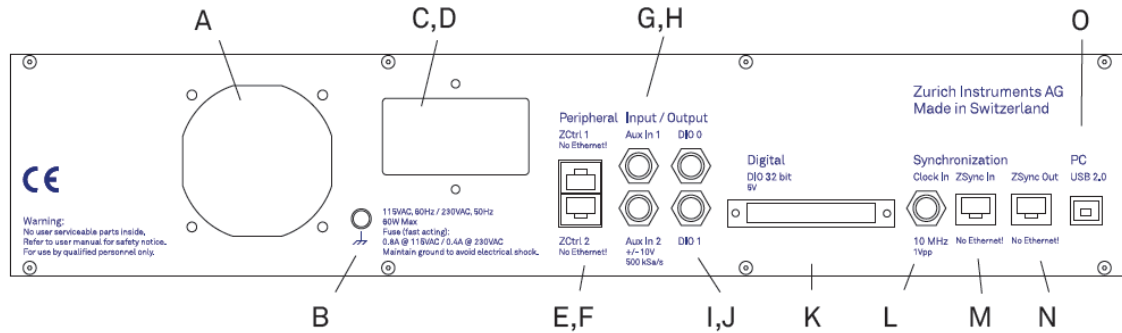
Obr. č. 4.2: Čelný panel HF2LI^[7]

Tab. č. 4.1: Popis čelného panelu HF2LI^[7]

Pozícia	Popis
A, D	Vstupy (1, 2)
B, E	Diferenčné vstupy (1, 2)
C, F	LED dióda indikujúca dosiahnutie rozsahu A/D prevodníku
G, K	Signál na konektore je analógovo pridaný k výstupnému signálu
H, L	Vysoko-frekvenčný výstupy (1, 2)
I, M	Výstupný signál použiteľný pre synchronizáciu
J, N	LED dióda indikujúca zapnutie výstupného signálu
O, P, Q, R	Pomocné výstupy
S	LED dióda indikujúca zapnutie zariadenia

4.2.2 Zadný panel HF2LI

Na zadnom paneli (obr. č. 4.3) sú uložené rozhranie pre napájanie, ovládanie, servis a pripojenie k iným zariadeniam Zurich Instruments. Popis jednotlivých častí zadného panelu obsahuje tabuľka číslo 2.



Obr. č. 4.3: Zadný panel HF2LI ^[7]

Tab. č. 4.2: Popis zadného panelu HF2LI ^[7]

Pozícia	Popis
A	Ventilátor
B	4 mm jack konektor pre uzemnenie
C, D	Napájací prívod s nastavením napájania (115 V a 230 V) a prepínač On/Off
E, F	Dve periférie predzosilňovača (ZCtrl)
G, H	Pomocné „high-samplig rate“ vstupy
I	Digitálny vstup / výstup 0
J	Digitálny vstup / výstup 1
K	Digitálny vstup / výstup 0 - 31
L	Hodinový vstup
M	Vstup medzi-prístrojovej synchronizačnej siete
N	Výstup medzi-prístrojovej synchronizačnej siete
O	USB konektor

4.3 Prevádzkové režimy HF2LI

Zariadenie HF2LI môže pracovať v štyroch rozdielnych módoch, ktoré sa od seba líšia hlavne spôsobom zapojenia experimentov a získavaním referenčného signálu.

4.3.1 Vnútorň referenčný mód

Vo vnútorň referenčnom móde (Internal Reference Mode) sa využívajú generátory zariadenie HF2LI. K dispozícii je šesť frekvenčných generátorov, ktorých výstupný signál je privedený k vstupu zariadenia. Táto činnosť prebieha vo vnútri prístroja a nedochádza tak ku komplikáciám spojených s použitím externého analógového signálu. Signál je možné priviesť na obidva vstupy (dual-channel operation) čím sa otvára možnosť vykonávať dve na sebe nezávislé merania. Celkovo HF2LI môže merať dve základné a štyri harmonické frekvencie.^[7]

4.3.2 Externý referenčný mód

V externom referenčnom móde (External Reference Mode) je použitý vonkajší zdroj (generátor) referenčného signálu. V prípade jednokanálového merania je vstup 2 použitý pre prívod referenčný signál a na vstup 1 je privedený meraný signál. Tak isto ako vo vnútorň referenčnom móde je možné využiť obidva vstupy pre dve nezávislé merania. V tomto prípade je referenčný TTL signál privedený na digitálne vstupy DIO0 a DIO1 na zadnom paneli.^[7]

4.3.3 Auto referenčný mód

V auto referenčnom móde je použitý vnútorň fázový záves na obnovu referenčného signálu zo signálu na vstupe. Vnútorň frekvenčné generátory nie sú v auto referenčnom móde použité. Vstupný signál musí mať dostatočnú amplitúdu a rozstup od šumu (dostatočný pomer signálu ku šumu). Tak ako v predchádzajúcich módoch aj tu je možné merať dva signály zároveň, cez vstup 1 a vstup 2.^[7]

4.3.4 Multi-frekvenčné operácie

Multi-frekvenčné operácie zväčšujú počet frekvencií, ktoré je možné paralelne analyzovať. Pre HF2LI sú význačné dva módy. V multi-harmonickom móde je možné analyzovať signál na základnej frekvencii a na piatich harmonických frekvenciách zároveň. Arbitrary frequency mód poskytuje možnosť analyzovať šesť úplne nezávislých frekvencií.^[7]

4.4 Ovládanie zariadenia HF2LI

1. Pripojte napájací vodič do napájacieho vstupu na zadnom paneli zariadenia.
2. Zapnite zariadenie HF2LI prepínačom na zadnom paneli. Na prednom paneli bude svietiť modrá LED dióda pre indikáciu zapnutia.
3. Pomocou USB káblu pripojte zariadenie HF2LI k počítaču. Je potrebné mať nainštalovaný software ziBase a popřípade ziControl.
4. Prepojte zariadenie HF2LI podľa druhu vykonávaného experimentu.
5. Spustite program ziControl.

5 ZI CONTROL

Software ziControl je grafické užívateľské rozhranie vytvorený v programe LabView od firmy National Instruments slúžiace na ovládanie prístroja HF2LI a zobrazovanie meraných hodnôt a priebehov. Software má podporu pre operačné systémy Windows a Linux. Na komunikáciu s PC je nutné mať nainštalovaný program ziBase, ktorého súčasťou je aj ziAPI (Application Programming Interface) umožňujúci komunikáciu medzi zariadením a softwarovými komponentmi v rôznych programovacích jazykoch (napr. LabView, Matlab, C, Python).

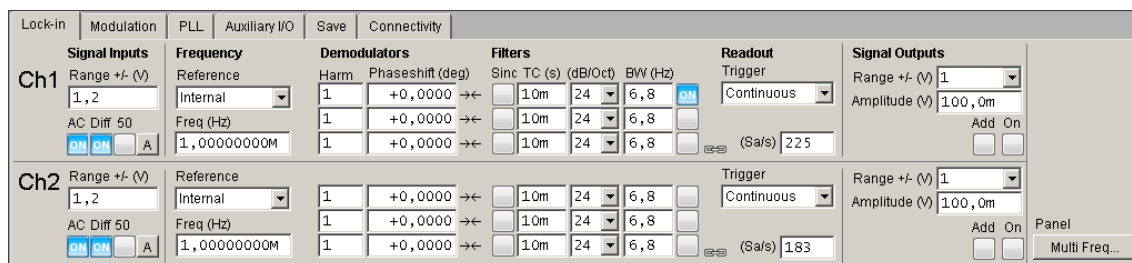
Okno ziControl je rozdelené na dve časti, „Settings“ sekciu na vrchu okna a „Tools“ sekciu v spodnej časti okna. „Tools“ sekcia je pre všetkých užívateľov spoločná, ale „Settings“ sekcia sa líši podľa zakúpených modulov. Výzor jednotlivých okien sa môže líšiť aj v závislosti od verzie softwaru (v tejto práci je použitá verzia 11.02.1.7923).

5.1 Sekcia Settings

V okne „Settings“ sa môžu nachádzať karty Lock-in, Modulation, PLL, PID, Real-time, Auxiliary I/O, Save a Connectivity. V tomto texte sú popísané len časti, ktoré podporuje prístroj S/N HF2 DEV372.

5.1.1 Lock-in

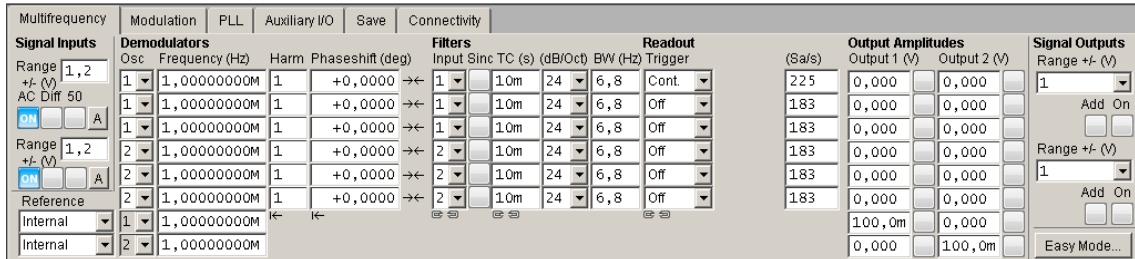
Karta „Lock-in“ obsahuje základné nástroje ako je ovládanie dvoch vstupných kanálov a im prislúchajúcich demodulátorov, ovládanie pre dva signálové generátory a ďalšie nastavenia pre vstupný a výstupný signál. Obr. č. 5.1 zobrazuje kartu „Lock-in“, ktorá je rozdelená na dve identické časti. Vrchná časť slúži na ovládanie signálového vstupu 1, výstupu 1, demodulátorov 1 až 3 a im prislúchajúcich filtrov, spodná časť je venovaná signálovému vstupu 2, výstupu 2, demodulátorom 4 až 6 a ich filtrom.^[7]



Obr. č. 5.1: Karta Lock-in v programe ziControl

5.1.2 Multifrequency

Karta „Multifrequency“ sa zobrazuje namiesto karty „Lock-in“ ak je táto funkcia v zariadení dostupná a je možné sa na ňu prepnúť s karty „Lock-in“. Karta ponúka ovládanie vstupných a výstupných kanálov a oproti základnej verzii je rozšírená o možnosť riadenia až šesťce nezávislých numerických oscilátorov a šesťce demodulátorov pre dva vstupné a výstupné signály.^[7]

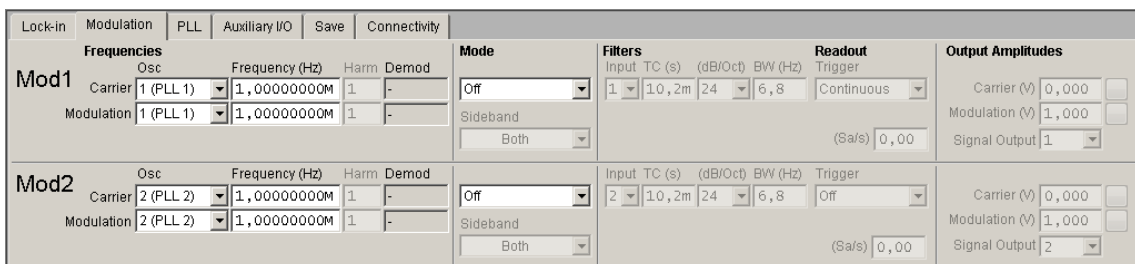


Obr. č. 5.2: Karta Lock-in MF v programe ziControle

5.1.3 Modulation

Karta „Modulation“ slúži na ovládanie amplitúdovej AM a frekvenčnej FM modulácie. Pri amplitúdovej modulácii sú použité tri demodulátory pre tvorbu nosného signálu a dvoch modulačných signálov (Dual Side Band). Na karte je ovládanie pre dve samostatné modulačné jednotky MOD1 a MOD2. MOD1 pracuje s modulátormi 1,2 a 3 a MOD2 s 4,5 a 6. V časti „Output Amplitudes“ je možné nastaviť amplitúdy nosného a modulačného signálu a vybrať výstup kam bude signál privedený.

Pri frekvenčnej modulácii sa využívajú dva demodulátory na generovanie nosnej a modulačnej frekvencie na základe nastavenej nosnej amplitúdy (Carrier), modulačnej frekvencie a maximálnej odchýlky frekvencie.^[7]



Obr. č. 5.3: Karta Modulation v programe ziControle

5.1.4 PLL

Karta „PLL“ poskytuje užívateľovi ovládanie dvoch plne programovateľných fázových závesov a otvorenie panelu PLL Advisor pre pohodlnejšiu analýzu prenosovej funkcie. V časti PLL1 a PLL2 sa aktivuje fázový záves, vyberá sa zdroj referenčného signálu, zapína automatické, alebo manuálne nastavenie dolnopriepustného filtra a PI regulátoru. Časť PLL Setpoint ponúka bližšie nastavenia fázového závesu a sekcia PI Dynamics poskytuje nastavenie parametrov PI regulátora (zosilnenie a časovú konštantu) vo fázovom závese.^[7]

Obr. č. 5.4: Karta PLL v programe ziControl

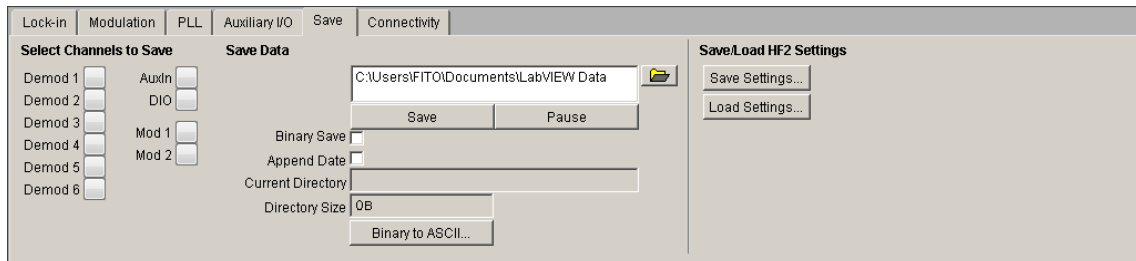
5.1.5 Auxiliary I/O

Táto karta poskytuje ovládanie pomocných výstupov, monitorovanie pomocných vstupov a riadenie a kontrolu digitálnych vstupov a výstupov. Je rozdelená do troch častí Auxiliary Outputs, Auxiliary Inputs, Digital I/O.^[7]

Obr. č. 5.5: Karta Auxiliary v programe ziControl

5.1.6 Save

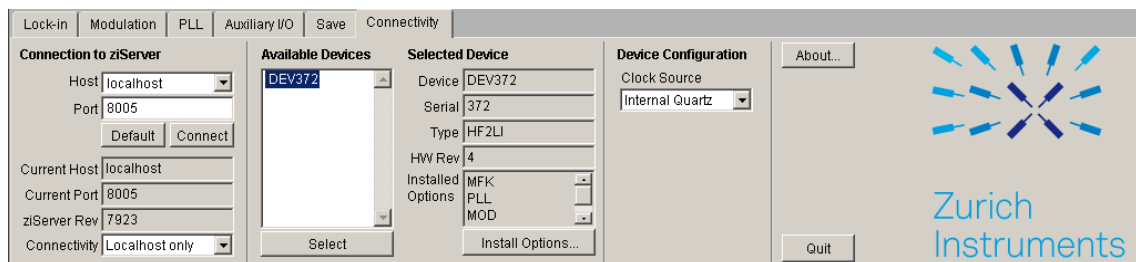
Karta „Save“ ponúka možnosť uloženia nameraných dát na disk počítača (Select Channels to Save), výber miesta uloženia (Save Data) a možnosť nahrania, alebo uloženia nastavení prístroja HF2LI (SaveLoad HF2 Settings).^[7]



Obr. č. 5.6: Karta Save v programe ziControl

5.1.7 Connectivity

Karta „Connectivity“ slúži na nastavenie údajov pripojenia, výber zariadenia pre komunikáciu, informácie o vybranom zariadení, prehľad nainštalovaných produktov, aktiváciu nových rozšírení a ukončenie programu.^[7]



Obr. č. 5.7: Karta Connectivity v programe ziControl

5.2 Sekcia Tools

V okne „Tools“ sa nachádzajú karty Numerical, Spectroscope, Frequency response sweeper, ZoomFFT, Oscilloscope a Status.

5.2.1 Numerical Tools

Na tejto karte je numerický prehľad výstupov z demodulátorov, kde sa dá graficky meniť rozsah zobrazovaných jednotiek. Hodnoty je možné zobrazovať v polárnom, alebo karteziánskom formáte a popri prípade je možné sa pozrieť na informácie o amplitúdovej, alebo frekvenčnej modulácii.^[7]

5.2.2 Spectroscope Tools

Karta „Spectroscope“ ponúka grafické zobrazenie výstupov z demodulátorov v polárnom a karteziánskom formáte. V časti „Scale“ sa nastavuje rozsah zobrazovaných hodnôt a v časti „Control“ sa vyberá zdroj zobrazovaného signálu. V zobrazovanej oblasti je možné použiť dva kurzory C1 a C2, ktorým prislúchajúce hodnoty sú zobrazené v časti „Cursors“.^[7]

5.2.3 Frequency Sweeper Tools

„Frequency Sweeper“ používa užívateľom vybraný referenčný signál ako budiace napätie a meria frekvenčnú a fázovú odozvu v zvolenom demodulátore. V časti „Sweep Range“ sa nastavuje rozsah zobrazovaných hodnôt, v „Sweep Control“ sa púšťa zobrazovanie a v „Signal In/Out“ sa volí použitý demodulátor. V zobrazovanej oblasti je možné použiť kurzor, ktorému prislúchajúce hodnoty sú zobrazené v časti „Cursor“.^[7]

5.2.4 Zoom FFT Tools

Nástroj „Zoom FFT“ umožňuje FFT spektrálnu analýzu komplexných vzoriek ($X+jY$) z výstupov demodulátorov. Časť „Signal Input“ poskytuje výber zdroja analyzovaného signálu. V sekcii „FFT“ je možné nastavovať počet vzorkou vstupného signálu, ktorý sa analyzuje a možnosť priemerovania hodnôt. Sekcia „Display“ umožňuje nastavenie zobrazovaných rozsahov v lineárnych, alebo exponenciálnych hodnotách. V zobrazovanej oblasti je možné použiť dva kurzory C1 a C2, ktorým prislúchajúce hodnoty sú zobrazené v časti „Cursors“.^[7]

5.2.5 Oscilloscope Tools

Integrovaný osciloskop s pamäťou pre 2048 vzorkou umožňuje rýchlo kontrolovať signály na vstupe a výstupe prístroja HF2LI. V časti „Source“ je si možné vybrať zo štyroch zdrojov zobrazovaného signálu a 16 rôznych vzorkovacích frekvencií. Časť „Trigger“ ponúka 13 zdrojov spúšťania časovej základne a dvoch metód. K dispozícii sú tri záložky pre rýchlu fourierovu transformáciu, signálovú analýzu a funkciu vzorkového histogramu. Tak isto ako v predchádzajúcich kartách je možné využiť kurzory.^[7]

5.2.6 Status Tool a History Log

Rozkliknutím „Show History“ je si možné detailne zobrazit' históriu vykonaných úkonov. Sekcia Status je rozdelená na tri časti. „Input Levels“ graficky indikuje úroveň signálu na vstupe 1 a vstupe 2 v rozsahu ± 1 . „USB Communication“ zobrazuje percentuálne zaplnenie bufferu a prenosovú rýchlosť medzi PC a prístrojom HF2LI. Posledná časť je „Error Flags“.^[7]

6 PREHĽAD KOMERČNE DOSTUPNÝCH LOCK-IN ZOSILŇOVAČOU

Táto kapitola obsahuje popis a parametre vybraných zosilňovačov s fázovým závesom od rôznych výrobcov. Na záver sú v tab. č. 6.4 porovnané parametre zariadenia HF2LI s výrobkami konkurencie, ktoré spadajú do rovnakej skupiny digitálnych zosilňovačov.

Na svetovom trhu existujú piati významnejší výrobcovia zosilňovačov z fázovým závesom. Americká spoločnosť Stanford Research Systems má momentálne v ponuke päť zosilňovačov (SR850, SR830, SR124, SR844 a SR530). Pod značkou Ametek predáva Signal Recovery zosilňovače 7265 DSP a 7270 DSP. Signal Recovery vlastní aj niekdajšieho výrobcu EG&G, od ktorého je možné nájsť na trhu radu 5000 DSP a zosilňovač 7260 DSP. Významným výrobcom je aj švajčiarsky Zurich Instruments s dvoma zosilňovačmi UHFLI a HF2LI. Americký Edmund optics ponúka zosilňovač NT55 – 784. Piatym výrobcom je spoločnosť ITHACO od ktorej za zmienku stoja zosilňovače 3961B a 3981A.

6.1 Zosilňovač s fázovým závesom SR850 DSP

SR850 je digitálny zosilňovač firmy Stanford Research Systems založený na DSP architektúre. Výrobca sa chváli radou významnejších výhod oproti tradičným zosilňovačom s fázovým závesom: frekvenčný rozsah (od 1mHz do 102,4 kHz) vyššia dynamická rezerva (> 100 dB), výrazné fázové rozlíšenie ($0,001^\circ$), menšie skreslenie, malý fázový posun ($< 0,01^\circ/\text{C}$ do 10 kHz). Podrobný prehľad ďalších parametrov ponúka tab. č. 6.1.



Obr. č. 6.1: Zosilňovač SR850 DSP ^[9]

Tab. č. 6.1: Parametre zosilňovača SR850 DSP ^[9]

Signálový kanál	
Napáťové vstupy	Jeden vstup (A) ,alebo rozdielový vstup (A-B)
Rozsah citlivosti	Od 2 nV do 1 V
Vstupná impedancia	Napätie: 10 M Ω + 25 pF
	Prúd: 1 k Ω na virtuálnu zem
Max. chyba zosilnenia	± 1 % (20 °C až 30 °C), $\pm 0,2$ % typická
Vstupný šum	6 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ na 1 kHz
Dynamická rezerva	> 100 dB
Harmonické skreslenie	< -90 dB do 10 kHz, < -80 dB do 100 kHz
Referenčný kanál	
Frekvenčný rozsah	Od 1 mHz do 102 kHz
Referenčný vstup	TTL (nábežná, alebo zostupná hrana), alebo sinusový
Fázové rozlíšenie	0,001°
Absolútna fázová chyba	< 1°
Relatívna fázová chyba	< 0,001°
Fázový šum	Externý ref. signál: 0,005° rms na 1 kHz
	Vnútorý ref. signál: < 0,0001° rms na 1 kHz
Fázový posun	< 0,01°/°C pod 10 kHz
	< 0,1°/°C do 100 kHz
Demodulátor	
Stabilita nuly	Digítálny výstup: nemá posun 0
	Analógový výstup: < 5 ppm/°C
Potlačenie harmonických sig.	-90 dB
Vnútorý oscilátor	
Frekvenčný rozsah	Od 1 mHz do 102 kHz
Max. chyba frekvencie	25 ppm + 30 μHz
Frekvenčné rozlíšenie	5 digits, alebo 0,1 mHz
Výstupná impedancia	50 Ω
Amplitúdový rozsah	Od 4 mV rms do 5 V rms
Max. chyba amplitúdy	1 %
Stabilita amplitúdy	50 ppm/°C

6.2 Zosilňovač s fázovým závesom UHFLI

UHFLI je produktom spoločnosti Zurich Instruments. Jedná sa o digitálny dvojkanalový zosilňovač s 1,8 GHz vzorkovacou frekvenciou a dvomi vysoko frekvenčnými generátormi. Prehľad parametrov je v tab. č. 6.2.



Obr. č. 6.2: Zosilňovač UHFLI ^[10]

Tab. č. 6.2: Parametre zosilňovača UHFLI ^[10]

Vstupy	
Frekvenčný rozsah	Do 600 MHz DC
Vstupná impedancia	50 Ω, alebo 1 MΩ 20 pF
Vstupný šum	5 nV/√Hz
Dynamická rezerva	100 dB
Rozsah citlivosti	Od 1 nV do 1,5 V
A/D prevodník	12 bit, 1,8 GS/s
Výstupy	
Frekvenčný rozsah	Do 600 MHz DC
Rozsah výstupu	±150 mV, ±1,5 V
D/A prevodník	14 bit, 1,8 GS/s
Demodulátory	
Počet demodulátorov	6
Vzorkovacia frekvencia výstupu	USB: 2 MS/s
	Aux: 28 MS/s
Časová konštanta	Od 30 ns do 500 s
Šírka meracieho pásma	Od 80 μHz do 5 MHz
Pokles filtra (dB/Oct)	6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48
Referenčná frekvenčná rezerva	6 μHz
Referenčná fázová rezerva	(10 ⁻⁶)°

6.3 Zosilňovač s fázovým závesom 7270 DSP

Obr. č. 6.3 zobrazuje digitálny zosilňovač Ametek 7270 DSP od spoločnosti Signal Recovery. Vyznačuje sa amplitúdovým rozsahom od 1 μV , frekvenčným rozsahom od 1 mHz do 250 kHz a fázovým rozlíšením 0,001°. Prehľad parametrov poskytuje tab. č. 6.3.



Obr. č. 6.3: Zosilňovač 7270 DSP ^[12]

Tab. č. 6.3: Parametre zosilňovača 7270 DSP ^[12]

Frekvenčný rozsah	Od 1 mHz do 250 kHz
Rozsah citlivosti	Od 2 nV do 1 V
Vstupná impedancia	FET: 10 M Ω 25 pF
	Bipolar: 10 k Ω 25 pF
Max. chyba zisku	± 1 %
Vstupný šum	5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Skreslenie	-90 dB
Dynamická rezerva	> 100 dB
Fázové rozlíšenie	0,001°
Fázový posun	Externý ref. signál: 0,01° rms na 1 kHz
	Vnútorňý ref. signál: < 0,0001° rms na 1 kHz
Stabilita nuly	Digítálny výstup: nemá posun 0
	Analógový výstup: < 100 ppm/°C
Potlačenie harmonických sig.	-90 dB
Amplitúdový rozsah	1 μV až 5 V
Výstupná impedancia	50 Ω

6.4 Porovnanie HF2LI s inými zariadeniami

V tejto časti sú porovnané parametre digitálneho zosilňovača s fázovým závesom HF2LI s digitálnym zosilňovačom SR 830 od firmy Stanford Reasearch Systems a digitálnym zosilňovačom DSP 7230 od firmy Signal Recovery. V tab. č. 6.4 sú vybrané parametre týchto prístrojov usporiadané do stĺpcov pre prehľadnejšie porovnanie.

Tab. č. 6.4: Porovnanie parametrov zosilňovačov s fázovým závesom ^{[13][14][15][16]}

Zariadenie	ZI HF2LI	SR 830	DSP 7230
Počet napät'ových vstupov	2	1	1
Vstupný frekvenčný rozsah	0,7 μ Hz – 50 MHz	1 mHz – 102,4 kHz	1 mHz – 120 kHz (až 250 kHz)
Vstupný napät'ový rozsah (AC)	1 mV – 1,5 V	2 nV – 1V	10 nV – 1V
Vstupný šum	5 nV/ \sqrt Hz do 10kHz	6 nV/ \sqrt Hz do 10kHz	2 nV/ \sqrt Hz
A/D prevodník	14 bit 210 MS/s	16 bit 256 kHz	16 bit, 1 MS/s
D/A prevodník	16 bit 210 MS/s	16 bit 256 kHz	16 bit, 1 MS/s
Počet demodulátorov	6	1	2
Dynamická rezerva	120 dB	100 dB	100 dB
Fázové rozlíšenie	0,1 μ °	0,01 °	0,1 m°
Počet pomocných vstupov/výstupov	2 / 4	4 / 4	4 / 4
Vnútorý oscilátor	Áno(10 MHz)	Áno (102 kHz)	Áno (250 kHz)
PC pripojenia	USB 480 Mbit/s	GPIB, RS-232	USB, Ethernet, RS-232
PC Software	Áno	Nie	Áno

U prístroja HF2LI treba vyzdvihnúť, že obsahuje dva signálové vstupy, ktoré rozširujú množstvo naraz vykonateľných experimentov. Zariadenia ma tak isto výrazne väčší frekvenčný rozsah (0,7 μ Hz až 50 MHz) oproti porovnávaným zariadeniam. Porovnávané zariadenia konkurencie majú nižšiu spodnú hranicu napätového rozsahu pre meranie striedavého signálu, až 2 nV (prístroj SR 830) oproti 10 mV prístroja HF2LI. V prípade vstupného šumu zariadenia výrobcu Signal Recovery udáva u prístroja hodnotu 2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ čo je nižšie ako u HF2LI, ale neudáva na akej frekvencii čím nie je možné dané hodnoty relevantne porovnať. Ďalšou výraznou výhodou HF2LI je možnosť využiť až šesť demodulátorov, pričom konkurenčné zariadenia obsahujú pre DSP 7230 dva demodulátory a u SR 830 dokonca len 1 demodulátor. Zariadenie HF2LI má značné fázové rozlíšenie 0,000 000 1° a dynamickú rezervu 120 dB. Okrem vysokej presnosti, frekvenčnému rozsahu a množstvu naraz vykonateľných meraní je k zariadeniu HF2LI dodávaný software, ktorý rozširuje možnosti aplikácií a činností, ktoré je možné zo zariadením uskutočniť.

7 NÁVRH EXPERIMENTU

Cieľom tohto experimentu je overiť základné funkcie zariadenia HF2LI a softwaru ziControl, ako je generovanie periodického sínusového signálu, amplitúdovo a frekvenčne modulovaného signálu a hlavne zmeranie parametrov generovaných signálov. Pre túto úlohu budeme potrebovať PC s nainštalovaným softwarom ziBase a ziControl, zariadenie HF2LI, osciloskop, USB kábel, tri koaxiálne vodiče a T odbočku pre privedenie signálu na osciloskop a meracie zariadenie. Osciloskop bude slúžiť na kontrolné zobrazenie meraného signálu. Schéma zapojenia je na obr. č. 7.1.



Obr. č. 7.1: Bloková schéma zapojenia pre experiment

7.1 Generovanie testovacieho sínusového signálu

V tejto časti vytvoríme sínusový signál na frekvencii 1 MHz s amplitúdou 0,5 V, ktorý bude na výstupe 2. Docielime toho pomocou karty „Lock-in“ (obr. č. 5.1) v programe ziControle, kde prevedieme sériu nasledovných nastavení na kanály 2 (Ch2). V časti „Frequency“ nastavíme „Reference“ na „Internal“ čo znamená použitie vnútorného oscilátora a frekvenciu „Freq“ na 1 MHz. V časti „Signal Outputs“ nastavíme rozsah „Range“ na 1 V, amplitúdu „Amplitude“ na 0,5 V a aktivujeme výstup 2 zakliknutím tlačidla „ON“. Prístroj nám začne generovať sínusový signál o nami požadovanej frekvencii a amplitúde, čo si môžeme overiť pomocou osciloskopu, pripojeného na výstup 2.

7.2 Zobrazenie testovacieho signálu

V tejto časti urobíme sériu úkonov potrebnú pre získanie testovaného signálu zo vstupu 1. Na karte „Lock-in“ nastavíme na kanály 1 (Ch1) vstupný rozsah „Range“ na 1 V, meranie striedavého signálu musí byť aktívne „AC = ON“, „DIFF“ a „50“ vypnuté. Ďalej využijeme kartu „Oscilloscope“ v sekcii „Tools“. V časti „Source“ ako zdroj zobrazovaného signálu zvolíme „Signal Input 1“ a počet vzorkou „Sampling Rate“ nastavíme na 210MS, 10us. Neskôr môžeme „Sampling Rate“ meniť podľa potreby. V časti „Trigger“ zvolíme „Signal Input 1“ a aktivujeme ho pomocou tlačidla „RUN“. Začne sa nám zobrazovať meraný signál a na kartách FFT, Analysis, a Histogram si môžeme prezrieť jeho parametre.

7.3 Meranie testovacieho signálu

Na meranie získaného testovacieho signálu použijeme demodulátory a karty „Numerical“ a „Spectroscope“. Na karte „Lock-in“ v sekcii „Filters“ nastavíme pre demodulátor 1 parametre jeho filtra nasledovne: sklon filtra na 24 dB/Oct a šírku pásma „BW“ na 10 Hz, „readout rate“ na 225 Sa/s a aktivujeme demodulátor tlačidlom „ON“. Výstup z filtra demodulátoru je zobrazený na kartách „Numerical“ a „Spectroscope“.

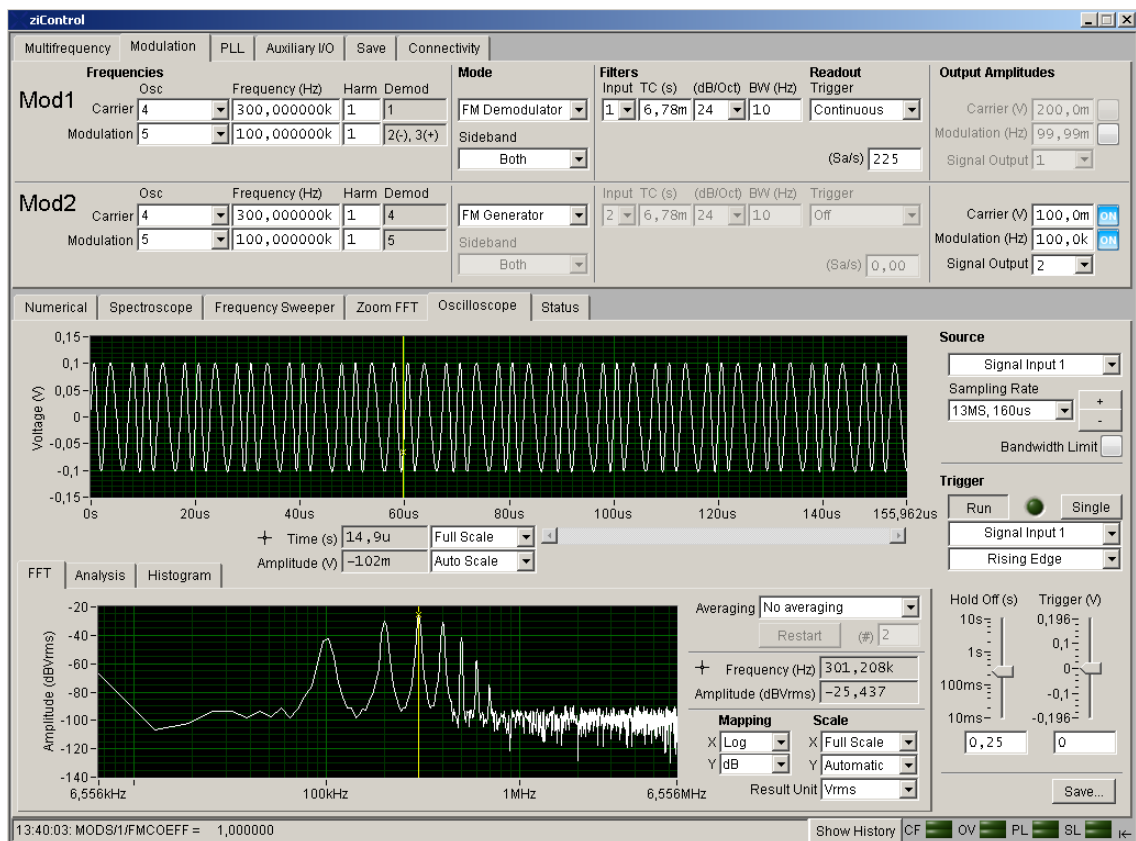
Na karte „Numerical“ je možné sledovať hodnoty pre všetkých šesť demodulátorov v karteziánskej (X,Y) a polárnej (R, θ) forme spolu s nastavenou frekvenciou (1 MHz). V našom prípade bude aktívne iba okno demodulátoru 1. Tu stojí za zmienku počet zobrazovaných jednotiek až na päť desatinných miest. Karta „Spectroscope“ ponúka grafický priebeh signálu z výstupu demodulátora a je možné si zobrazit' výstup všetkých šiestich v polárnych, alebo karteziánskych súradniciach v rôznych mierkach. Pre získanie hodnoty vo vybranom mieste je možné použiť dva kurzory C1 a C2.

7.4 Meranie amplitúdovo modulovaného testovacieho signálu

V tejto kapitole využijeme kartu „Modulation“ (obr. č. 5.3) na generovanie testovacieho signálu. Prístroje necháme zapojené podľa obr. č. 7.1, na karte „Lock-in“ deaktivujeme demodulátor 1 a vypneme výstup 2, na karte „Oscilloscope“ vypneme „Trigger“. Na karte „Modulation“ v časti Mod2 vyberieme oscilátor 4 „Osc“ pre nosnú frekvenciu „Carrier“ s kmitočtom 500 kHz a amplitúdou „Carrier (V)“ 500 mV a aktivujeme ho tlačidlom „ON“. Karta „Lock-in“ sa zmenila na „Multifrequency“ (obr. č. 5.2) na ktorej vypneme v časti „Output amplitudes“ výstupy 100 mV z vnútorných generátorov a aktivujeme výstup 2. Na karte „Oscilloscope“ nastavíme zdroj zobrazovaného signálu „Source“ na „Signal Input 1“, „Sampling Rate“ na 53 MS, 39 us, zdroj spúšťania časovej základne „Trigger“ na „Signal Input 1“ a spustíme osciloskop tlačidlom „RUN“. Vidíme nosný sínusový signál na frekvencii 500 kHz a amplitúdou 500 mV, ktorého spektrum si môžeme pozrieť na záložke „FFT“. Na karte „Modulation“ v časti Mod2 vyberieme oscilátor 5 „Osc“ pre modulačnú frekvenciu „Modulation“ s kmitočtom 50 kHz a amplitúdou „Modulation (V)“ 250 mV a aktivujeme ho tlačidlom „ON“. Po aktivácii modulačného signálu by sa mal zmeniť testovací signál zobrazovaný pomocou osciloskopu. Na záver ešte zmeriame amplitúdy nosného a modulačného signálu a modulačný index. Na karte „Modulation“ v časti „Filters“ nastavíme „Input“ na 1, pokles filtra necháme na 24 dB/Oct a šírku pásma „BW“ zmeníme na 10 Hz, vzorkovanie „Sa/s“ na 225 a „Trigger“ prepneme do stavu „Continuous“. Na záložke „Numerical“ nám demodulátory 1 až 3 merajú amplitúdu nosného signálu (demodulátor 1), modulačný index (demodulátor 2) a amplitúdu modulačného signálu (demodulátor 3). Zobrazované hodnoty sú vo voltoch a zmeraná hodnota amplitúdy modulačného signálu je polovičná vzhľadom k zadanej hodnote amplitúdy modulačného signálu z dôvodu použitia dvoch postranných pásiem („Sideband“ = „Both“).

7.5 Meranie frekvenčne modulovaného testovacieho signálu

Zapojenie prístrojov a nastavenia zariadenia ponecháme v predchádzajúcom stave a urobíme pár nasledovných zmien. Na karte „Modulation“ nastavíme v časti „Mod1“ aj „Mod2“ frekvenciu nosného signálu „Carrier“ z oscilátoru „Osc“ 4 s frekvenciou 300 kHz, frekvenciu modulačného signálu „Modulation“ z oscilátoru „Osc“ 5 s frekvenciou 100 kHz. Ďalej len v časti „Mod2“ vyberieme mód „FM Generator“, amplitúdu nosného signálu „Carrier (V)“ 100 mV s odchýlkou frekvencií „Modulation (Hz)“ 50 kHz. V časti „Mod1“ prepne môd do „FM Demodulator“ s nastaveniami filtra „Input“ na 1 pokles filtra necháme na 24 dB/Oct a šírku pásma „BW“ zmeníme na 10 Hz, vzorkovanie „Sa/s“ na 225 a „Trigger“ prepne do stavu „Continuous“. Na záver urobíme ešte úpravy na karte „Oscilloscope“, kde zmeníme „Sampling Rate“ na 13 MS, 160 us a na záložke „FFT“, kde „Mapping“ pre os X prepne na „Log“ ako ilustruje obr. č. 7.2. Uvidíme najsilnejší signál na 300 kHz a ďalšie s odstupom 100 kHz. Na záložke „Numerical“ nám demodulátory 1 až 3 merajú amplitúdu nosného signálu (demodulátor 1), amplitúdy postranného pásma a modulačný index.



Obr. č. 7.2: Nastavenia pre frekvenčnú moduláciu v programe ziControl

8 OVERENIE FUNKCIÍ ZOSILŇOVAČA S FÁZOVÝM ZÁVESOM HF2LI

Kapitola 8 obsahuje popis a výsledky štyroch experimentov zameraných na overenie funkcií zariadenia HF2LI DEV 372 a nástrojov programu ziControl preň dostupných. Prvý experiment testuje vlastnosti zariadenia pri práci s amplitúdovo modulovaným signálom. Druhý experiment využíva pre pokus frekvenčne modulovaný signál. Tretí experiment používa frekvenčne modulovaný signál s využitím fázového závesu a pomocných výstupov na meranie frekvencie modulačného signálu f_M a meranie odchýlky kmitočtov f_p . Posledný experiment je zameraný na meranie vstupného šumu zariadenia HF2LI pri využití programu ziExample-HF2-Noise.vi vytvoreného v Labview.

8.1 Meranie amplitúdovo modulovaného signálu

Cieľom tejto úlohy je využiť zariadenie HF2LI ako generátor amplitúdovo modulovaného testovacieho signálu s použitím karty „Modulation“ v programe ziControl a zmeranie amplitúdy a frekvencie nosného a modulačného signálu pomocou toho istého zariadenia za využitia nástrojov „Numerical“, „Zoom FFT“ a „Oscilloscope“.

8.1.1 Použité nástroje

Zosilňovač s fázovým závesom HF2LI DEV 372

Notebook Toshiba s programom ziControl verz. 11.02.1.7923

USB kábel

1x BNC kábel

8.1.2 Riešenie

Prístroje pre prvý experiment boli zapojené podľa obr. č. 8.1. Frekvencia nosného signálu bola $f_C = 500$ kHz s frekvenciou modulačného signálu $f_M = 100$ kHz. Bolo uskutočnených trinásť meraní pre rôzne amplitúdy nosného a modulačného signálu pri nastaveniach filtrov so šírkou pásma (BW) 10 Hz a poklesom 24 dB/Oct.

Prehľad nameraných a vypočítaných hodnôt ponúka tab. č. 8.1 kde:

A_C - nastavená amplitúda nosného (carrier) signálu

A_M - nastavená amplitúda modulačného signálu

A_{CRMS} - zmeraná amplitúda nosného signálu

A_{CV} - prepočítaná amplitúda nosného signálu v mV

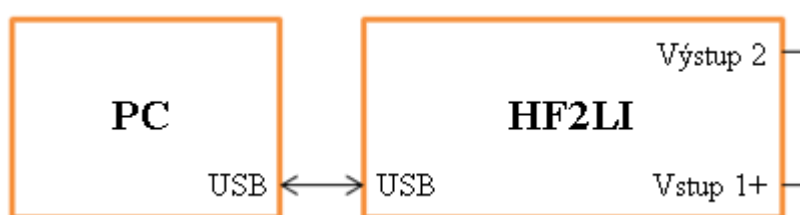
A_{PRMS} - zmeraná amplitúda postranného pásma (1/2 modulačného signálu)

A_{MV} - prepočítaná amplitúda modulačného signálu v mV

h - hĺbka modulácie (modulačný index)

Δ_C - odchýlka prepočítanej amplitúdy nosného signálu od nastavenej

Δ_M - odchýlka prepočítanej amplitúdy modulačného signálu od nastavenej



Obr. č. 8.1: Bloková schéma zapojenia pre meranie amplitúdovo modulovaného signálu

Na meranie frekvencie nosného a modulačného signálu boli využité nástroje „FFT“ a „Zoom FFT“, kde frekvencie zmerané prístrojom zodpovedali frekvenciám nastaveným na generátore (karta „Modulation“).

Tab. č. 8.1: Namerané a vypočítané hodnoty pre amplitúdovo modulovaný signál

A_C [mV]	A_M [mV]	A_{CRMS} [mV]	A_{CV} [mV]	A_{PRMS} [mV]	A_{MV} [mV]	h [%]	Δ_C [mV]	Δ_M [mV]
300,00	200,00	213,84	302,42	71,29	201,64	66,68	2,42	1,64
300,00	150,00	213,83	302,40	53,46	151,21	50,01	2,40	1,21
300,00	99,99	213,60	302,08	35,60	100,69	33,33	2,08	0,70
300,00	49,99	213,60	302,08	17,80	50,35	16,67	2,08	0,36
200,00	200,00	142,56	201,61	71,28	201,61	100,01	1,61	1,61
200,00	99,99	142,53	201,57	35,59	100,66	49,99	1,57	0,67
200,00	49,99	142,52	201,55	17,82	50,40	25,00	1,55	0,41
150,00	150,00	106,90	151,18	53,47	151,24	100,02	1,18	1,24
150,00	49,99	106,89	151,17	17,80	50,35	33,33	1,17	0,36
100,00	200,00	71,29	100,82	71,28	201,61	199,99	0,82	1,61
100,00	150,00	71,27	100,82	53,45	151,18	149,98	0,82	1,18
100,00	99,99	71,27	100,82	35,63	100,78	99,98	0,82	0,79
100,00	49,99	71,27	100,82	17,81	50,37	49,98	0,82	0,38

Príklady výpočtu hodnôt z tab. č. 8.1:

$$\begin{aligned}A_{CV} &= A_{CRMS} \cdot \sqrt{2} = 213,84 \cdot \sqrt{2} = 302,42 \text{ mV} \\A_{MV} &= A_{PRMS} \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 71,29 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 201,64 \text{ mV} \\ \Delta_C &= A_{CV} - A_C = 302,42 - 300,00 = 2,42 \text{ mV} \\ \Delta_M &= A_{MV} - A_M = 201,64 - 200,00 = 1,64 \text{ mV}\end{aligned}$$

Výpočet hĺbky modulácie pre AM signál:^[18]

$$h = \frac{A_M}{A_C} \cdot 100 [\%] \quad (8.1)$$

Pri generovaní AM signálu s dvoma postrannými pásmami vzniká súčtová a rozdielová zložka, ktorých amplitúda zodpovedá polovine amplitúdy modulačného signálu. Z toho dôvodu je pri prepočte zmeranej amplitúdy postranného pásma A_{PM} na amplitúdu modulačného signálu použité násobenie konštantou 2.^[7]

8.1.3 Zhrnutie

Experiment overil funkciu prístroja HF2LI ako generátora amplitúdovo modulovaného signálu, ktorý bol následne využitý pri meraní. Zmeranych bolo päť parametrov: hĺbka modulácie, amplitúda nosného a modulačného signálu a frekvencia nosného a modulačného signálu, pri čom boli využité funkcie „Numerical“, „Zoom FFT“ a „Oscilloscope“. Maximálny rozdiel medzi nameranou a referenčnou hodnotou amplitúdy dosiahol odchýlky 0,82% z referenčnej hodnoty čo odpovedalo odchýlke 0,82 mV pri referenčnej hodnote 100,00 mV. Hĺbka modulácie je počítaná z pomeru zmeraných amplitúd nosného a modulačného signálu a jej hodnota korešpondovala očakávaniu. Zmerané frekvencie zodpovedali frekvenciám referenčným.

8.2 Meranie frekvenčne modulovaného signálu

V experimente je použité zariadenie HF2LI ako generátor frekvenčne modulovaného testovacieho signálu s využitím karty „Modulation“ v programe ziControl. Ďalej zariadenie slúži na meranie amplitúdy nosného signálu a najväčšej amplitúdy postranného pásma testovacieho signálu pri použití nástrojov „Numerical“ a „Oscilloscope“. Cieľom experimentu je okrem otestovania generovania signálu a jeho merania nájsť modulačný index, pri ktorom by mala vymiznúť nosná frekvencia (t.j. nadobúda amplitúda nosnej frekvencie minimálnu hodnotu).

8.2.1 Použité nástroje

Zosilňovač s fázovým závesom HF2LI DEV 372

Notebook Toshiba s programom ziControl verz. 11.02.1.7923

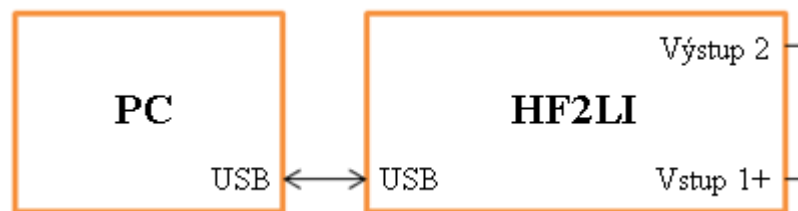
USB kábel

1x BNC kábel

8.2.2 Riešenie

Prístroje pre druhý experiment boli zapojené podľa obr. č. 8.2. Frekvencia nosného signálu bola $f_C = 500$ kHz s amplitúdou $A_C = 100$ mV. Modulačná frekvencia bola udržiavaná na konštantnej hodnote $f_M = 100$ kHz pričom bol modulačný index menený pomocou frekvencie f_P (peak frequency). Výpočet modulačného indexu pre frekvenčnú moduláciu je:^[18]

$$m = \frac{f_P}{f_M} \quad (8.2)$$



Obr. č. 8.2: Bloková schéma zapojenia pre frekvenčne modulovaný signál

Kanál dva bol využitý ako generátor FM signálu a kanál jedna ako FM demodulátor pri nastaveniach filtrov so šírkou pásma (BW) 10 Hz a poklesom 24 dB/Oct. Pri zisťovaní minimálnej hodnoty amplitúdy nosného signálu, bolo uskutočnených viacero meraní okolo hodnoty 240,5 kHz a do tabuľky je doplnená len hodnota splňujúca požiadavku na minimálnu amplitúdu.

Zmerané a vypočítané hodnoty obsahuje tab. č. 8.2, kde:

f_P - (peak frequency) odchýlka kmitočtu

A_{CRMS} - zmeraná amplitúda nosného signálu

A_{CV} - prepočítaná amplitúda nosného signálu v mV

A_{1RMS} - zmeraná amplitúda postranného pásma na 400 kHz

A_{1V} - prepočítaná amplitúda postranného pásma na 400 kHz v mV

A_{2RMS} - zmeraná amplitúda postranného pásma na 600 kHz

A_{2V} - prepočítaná amplitúda postranného pásma na 600 kHz v mV

m - modulačný index

Tab. č. 8.2: Namerané a vypočítané hodnoty pre frekvenčne modulovaný signál

f_P [kHz]	A_{CRMS} [mV]	A_{CV} [mV]	A_{1RMS} [mV]	A_{1V} [mV]	A_{2RMS} [mV]	A_{2V} [mV]	m [-]
5,00	71,42	101,00	1,78	2,52	1,78	2,52	0,0500
10,00	71,28	100,81	3,57	5,05	3,57	5,05	0,1000
14,99	71,06	100,49	5,34	7,55	5,34	7,55	0,1499
20,00	70,75	100,06	7,11	10,06	7,11	10,06	0,2000
24,99	70,35	99,49	8,86	12,53	8,86	12,53	0,2499
50,00	67,06	94,84	17,31	24,48	17,31	24,48	0,5099
74,99	61,77	87,36	24,95	35,28	24,95	35,28	0,7499
100,00	54,68	77,33	31,44	44,46	31,44	44,46	1,0000
125,00	46,16	65,28	36,49	51,60	36,49	51,60	1,2500
150,00	36,58	51,73	39,87	56,38	39,87	56,38	1,5000
175,00	26,37	37,29	41,46	58,28	41,46	58,28	1,7500
200,00	16,00	22,63	41,21	58,28	41,21	58,28	2,0000
220,00	7,88	11,14	39,73	56,19	39,73	56,19	2,2000
230,00	3,97	5,61	38,58	54,56	38,58	54,56	2,3000
240,00	1,17	1,65	37,18	52,58	37,18	52,58	2,4000
240,48	$5,70 \cdot 10^{-3}$	$8,06 \cdot 10^{-3}$	37,09	52,45	37,09	52,45	2,4048
250,00	3,45	4,88	35,52	50,23	35,52	50,23	2,5000
300,00	18,58	26,28	24,23	34,27	24,23	34,27	3,0000
350,00	27,17	38,42	9,82	13,89	9,82	13,89	3,5000

Príklady výpočtu hodnôt z tab. č. 8.2:

$$A_{CV} = A_{CRMS} \cdot \sqrt{2} = 71,42 \cdot \sqrt{2} = 101,00 \text{ mV}$$

$$A_{1V} = A_{1RMS} \cdot \sqrt{2} = 1,78 \cdot \sqrt{2} = 2,52 \text{ mV}$$

$$m = \frac{f_P}{f_M} = \frac{5,00}{100,00} = 0,0500$$

8.2.3 Zhrnutie

Experiment overil funkciu prístroja HF2LI ako generátora frekvenčne modulovaného signálu, ktorý bol následne využitý pri meraní. Merané boli tri parametre: amplitúda nosného signálu a dve amplitúdy postranného pásma, ktoré boli od seba fázovo posunuté o $179,4^\circ$. Teoreticky dosahuje Besselova funkcia hodnotu 0 pri modulačnom indexe 2,4048 , 5,5201 , 8,5637 atď.^[18] Pri modulačnom indexe 2,4048 nadobudla amplitúda nosného signálu hodnotu $5,7 \mu\text{V}$ čo predstavovalo jej minimum a splnilo aj teoretický predpoklad. Zariadenie HF2LI umožňuje merať aj fázový posun jednotlivých amplitúd a modulačný index, označený ako F_p udávaný v %.

8.3 Meranie s využitím fázového závesu

V experimente je použité zariadenie HF2LI ako generátor frekvenčne modulovaného testovacieho signálu s využitím karty „Modulation“ v programe ziControl. Cieľom experimentu je zmerať frekvencie modulačného signálu f_M a odchýlky kmitočtov f_p pri použití fázového závesu a pomocných výstupov zariadenia HF2LI.

8.3.1 Použité nástroje

Zosilňovač s fázovým závesom HF2LI DEV 372

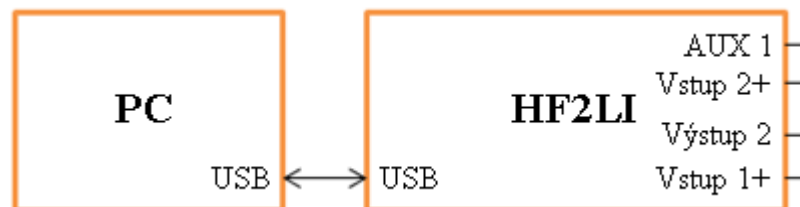
Notebook Toshiba s programom ziControl verz. 11.02.1.7923

USB kábel

2x BNC kábel

8.3.2 Riešenie

Prístroje pre tretí experiment boli zapojené podľa obr. č. 8.3. Frekvencia nosného signálu bola $f_C = 500 \text{ kHz}$ s amplitúdou $A_C = 300 \text{ mV}$. Experiment bol prevedený pre dve frekvencie modulačného signálu $f_M = 5 \text{ kHz}$ a $f_M = 1 \text{ kHz}$.



Obr. č. 8.3: Bloková schéma zapojenia pre experiment s využitím fázového závesu

Testovací signál bol privedený na fázový záves PLL1 s centrálnou frekvenciou na 500 kHz. Pomocou funkcie „PLL Advisor“, ktorá simuluje prenosovú funkciu fázového závesu som našiel nastavenia parametrov PLL, pre ktoré bol pokles amplitúdy na 5 kHz a 1 kHz blízky 0 dB. Na vstup 2 bol privedený signál z pomocného výstupu 1 (Aux 1) , ktorý odpovedal frekvenčnej odchýlke signálu na vstupe 1 (frekvenčne modulovaný signál) od centrálnej frekvencie PLL 500 kHz. Počas experimentu bola mierka pomocného výstupu 100 mV/Hz. Pri modulačnej frekvencii 5 kHz mal fázový detektor PLL nastavenú šírku pásma 88 kHz s poklesom 24 dB/Oct a zložky PI regulátoru boli $P = 410 \text{ Hz/deg}$ a $I = 20 \text{ ms}$. Tab. č. 8.3 udáva namerané a vypočítané hodnoty pre modulačnej frekvencii 5 kHz, kde:

- f_M - nastavená modulačná frekvencia generátoru
- f_P - nastavená odchýlka kmitočtov na generátore
- f_{MM} - zmeraná frekvencia modulačného signálu
- A_{PM} - zmeraná amplitúda signálu na výstupe fázového závesu
- f_{PV} - vypočítaná hodnota frekvencie odchýlky kmitočtov
- Δ_M - odchýlka vypočítanej modulačnej frekvencie od referenčnej
- Δ_P - odchýlka vypočítanej odchýlky kmitočtov od referenčnej

Tab. č. 8.3: Namerané a vypočítané hodnoty pri f_M 5 kHz

f_M [Hz]	f_P [Hz]	f_{MM} [Hz]	A_{PM} [mV]	f_{PV} [Hz]	Δ_M [Hz]	Δ_P [Hz]
5000	5000	4999	496,9	4969	-1	-31
5000	4000	4999	399,0	3990	-1	-10
5000	3000	5000	298,3	2983	0	-17
5000	2000	5000	199,6	1996	0	-4
5000	1000	5001	102,6	1026	1	26

Pri modulačnej frekvencii 1 kHz mal fázový detektor PLL nastavenú šírku pásma 20 kHz s poklesom 24 dB/Oct a zložky PI regulátoru boli $P = 130 \text{ Hz/deg}$ a $I = 10 \text{ ms}$. Tab. č. 8.4 udáva namerané a vypočítané hodnoty pre modulačnej frekvencii 1 kHz.

Tab. č. 8.4: Namerané a vypočítané hodnoty pri f_M 1 kHz

f_M [Hz]	f_P [Hz]	f_{MM} [Hz]	A_{PM} [mV]	f_{PV} [Hz]	Δ_M [Hz]	Δ_P [Hz]
1000	800	1000	79,4	794	0	-6
1000	500	1000	47,3	473	0	-27
1000	300	1000	26,9	269	0	-31
1000	200	1001	19,2	192	1	-8
1000	100	1002	12,5	125	2	25

Príklady výpočtu hodnôt z tab. č. 8.3 a tab. č. 8.4:

$$f_{PV} = \frac{A_{PM}}{100mV/Hz} = \frac{79,4}{0,1} = 794 \text{ Hz}$$

$$\Delta_M = f_{MM} - f_M = 1002 - 1000 = 2 \text{ Hz}$$

$$\Delta_P = f_{PV} - f_P = 794 - 800 = -6 \text{ Hz}$$

8.3.3 Zhrnutie

V tretom experimente boli merané hodnoty odčítané pomocou kurzorov z priebehu signálu na vstupe 2 na karte „Oscilloscope“ programu ziControl. Frekvencia modulačného signálu odpovedala prepočtu periódy signálu na vstupe 2 a frekvencia odchýlky kmitočtov odpovedala prepočtu amplitúdy signálu na vstupe 2. Hodnota amplitúdy závisela na nastavenej mierke pomocného výstupu (v našom prípade 100 mV/Hz). Výraznejší rozdiel medzi referenčnou frekvenciou odchýlky kmitočtov f_P a zmeranou frekvenciou bol spôsobený útlmom na fázovom závese 0,053 dB, pričom sa počítalo s útlmom 0 dB. Najväčšiu chybu zanesla do výpočtu zvolená metóda, kde pri meraní nižších frekvencií f_P (hlavne 100 Hz) boli hrany priebehu signálu rozmazané a nebolo možné určiť presnú polohu pre odčítanie hodnoty čo sa prenieslo aj do merania periódy signálu.

8.4 Meranie vstupného šumu zariadenia HF2LI

Experiment je zameraný na zmeranie šumovej spektrálnej hustoty na vstupoch prístroja a jej porovnaní s údajom výrobcu. Využitý bude program ziExample-HF2-Noise.vi vytvoreného v Labview, ktorý dodáva Zurich Instruments pri zakúpení ich zariadenia.

8.4.1 Použité nástroje

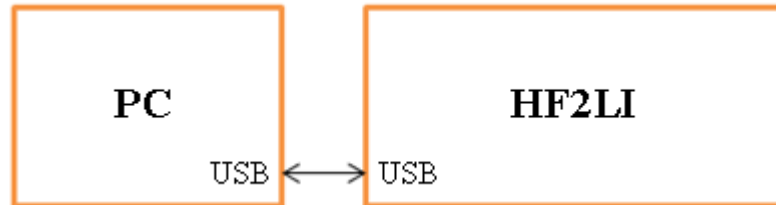
Zosilňovač s fázovým závesom HF2LI DEV 372

Notebook Toshiba s programom ziControl verz. 11.02.1.7923 a programom LabView 2012

USB kábel

8.4.2 Riešenie

Pre účel merania šumu na vstupe zariadenia nesmie byť na konektoroch zariadenia nič pripojené (obr. č. 8.4). Program ziControl je počas experimentu použitý len na nastavenie hodnôt prístroja podľa tab. č. 8.5 a zmenu frekvencie.



Obr. č. 8.4: Bloková schéma zapojenia pri meraní šumu

Tab. č. 8.5: Nastavenia zariadenia HF2LI pre meranie vstupného šumu ^[7]

Vstup rozsah/AC/Diff/50	0,01 V / ON / OFF / ON
Demodulátor 1 a 4	BW = 100 Hz, dB/Oct = 24
„Output switch“ kanálu 1	OFF
„Output switch“ kanálu 2	OFF

Pre minimalizáciu chyby bolo uskutočnených desať meraní po dobu desiatich sekúnd pre každú referenčnú frekvenciu oboch vstupov. Počas merania sa hodnota šumu mierne menila a pre účel výpočtu bola zobrazená vždy najväčšia vyskytujúca sa hodnota. Priemerná šumová spektrálna hustota NSD v tab. č. 8.6 bola spočítaná z 10 nameraných hodnôt podľa vzťahu:

$$NSD = \frac{\sum_1^N NSD_N}{N} \quad (8.3)$$

Šumová spektrálna hustota NSD (Noise Spectral Density) nie je závislá na šírke pásma filtra a preto je vo väčšine prípadov zaujímavejšia ako hodnota šumu. Na výpočet NSD zo šumu vo V_{rms} , musí byť meraná hodnota delená odmocninou šírky pásma \sqrt{BW} z čoho vychádzajú aj jej jednotky vo V/\sqrt{Hz} .^[7]

Tab. č. 8.6: Namerané a vypočítané hodnoty pri meraní šumu

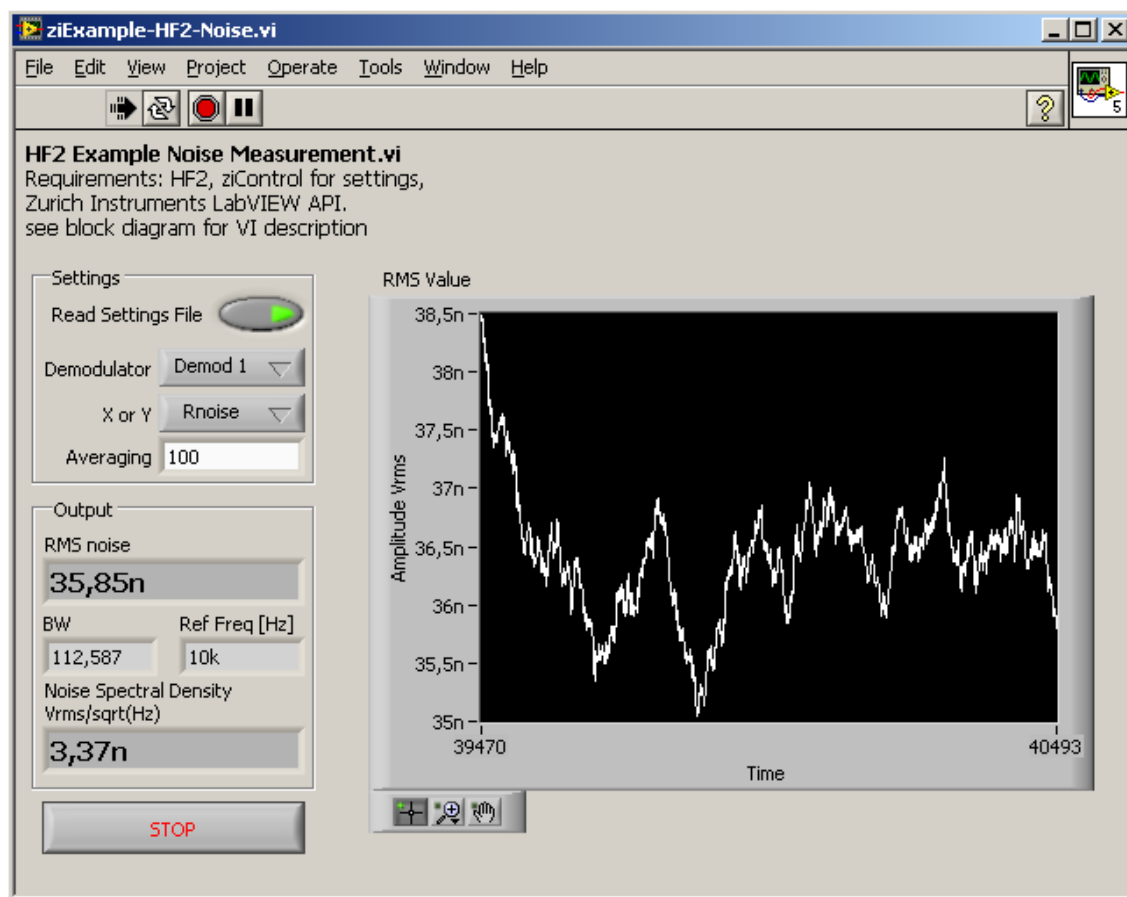
f_{REF} [kHz]	Vstup 1		Vstup 2	
	NSD_{1RMS} [nV/ \sqrt{Hz}]	NSD_{1V} [nV/ \sqrt{Hz}]	NSD_{2RMS} [nV/ \sqrt{Hz}]	NSD_{2V} [nV/ \sqrt{Hz}]
10	3,51	4,96	3,49	4,94
20	3,40	4,81	3,33	4,71
50	3,19	4,51	3,13	4,43
100	3,11	4,40	3,07	4,34
200	3,04	4,30	3,07	4,34
500	3,02	4,27	2,98	4,21
1000	3,00	4,24	2,92	4,13

Príklady výpočtu hodnôt z tab. č. 8.6:

$$NSD_{1V} = NSD_1 \cdot \sqrt{2} = 3,51 \cdot \sqrt{2} = 4,96 \text{ nV}/\sqrt{Hz}$$

$$NSD_{2V} = NSD_2 \cdot \sqrt{2} = 3,49 \cdot \sqrt{2} = 4,94 \text{ nV}/\sqrt{Hz}$$

Na obr. č. 8.5 je aplikácia ziExample-HF2-Noise, v ktorej sme spustili meranie stlačením čiernej šípky v ľavej hornej časti. V sekcii Output je vidieť aktuálne meraný šum, nastavenú šírku pásma filtra (BW), referenčnú frekvenciu a šumovú spektrálnu hustotu NSD.



Obr. č. 8.5: Aplikácia ziExample-HF2-Noise.vi

8.4.3 Zhrnutie

V tomto experimente bolo otestované použitie programu Labview pri meraní šumu na vstupoch zariadenia HF2LI DEV 372. Výrobca udáva na svojich stránkach a v užívateľskej príručke zariadenia šumovú spektrálnu hustotu $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ pre frekvencie do 10 kHz , na meracom rozsahu 10 mV , pri meraní striedavých signálov s odporom vstupu 50Ω a $1 \text{ M}\Omega$. Meraním sme overili, že ani pre jednu hodnotu referenčnej frekvencie šum neprekročil výrobcom udávanú hodnotu $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a s nárastom referenčnej frekvencie jeho hodnota klesala.

8.5 Diskusia výsledkov

Práca so samotným prístrojom HF2LI je jednoduchá. Ovládanie prebieha softwarovo čo minimalizuje činnosť na zariadení. Užívateľ prepojí prístroj s PC a pripojí BNC vodiče na konektory zariadenia podľa potreby experimentu. Po spustení programu ziControl sú identifikované pripojené zariadenia a nie je nutné žiadne zložité nastavovanie. K prístroju je priložený podrobný užívateľský manuál obsahujúci návod k ovládaniu zariadenia a aplikácie ziControl. Program ziControl kontroluje užívateľom nastavené parametre a nedovolí prekročenie povolených rozsahov.

V experimentoch som sa zamerlal na generovanie modulovaných signálov, ktoré využívajú oscilátory zariadenia. Šesť oscilátorov umožňuje generovať dva nezávislé modulované signály, ktoré sú ovládané cez kartu „Modulation“. Výrobca ponúka možnosť generovania amplitúdovo modulovaného signálu a frekvenčne modulovaného signálu, čo bolo v experimentoch overené. Pri amplitúdovej modulácii odpovedá modulačný index pomeru amplitúdy modulačného signálu k amplitúde nosného signálu. Pri meraní AM signálu odpovedal modulačný index teoretickému predpokladu. Priebeh frekvenčne modulovaného signálu je popísaný Besselovými funkciami. Pri modulačnom indexe 2,4048 by mala amplitúda nosného signálu nadobúdať nulovú hodnotu. Pri danom modulačnom indexe mal testovací FM signál minimálnu hodnotu $5,7 \mu\text{V}$.

Ovládanie fázových závesov prebieha na karte „PLL“ pomocou parametrov filtra fázového detektoru a PI regulátoru, čo bolo odskúšané v experimente. Nástroj „PLL Advisor“ slúži na veľmi presnú simuláciu prenosovej funkcie fázového závesu a uľahčuje návrh parametrov PLL. Z Bode diagramu pre prenos fázového závesu, nie je možné presne odčítať útlm amplitúdy pre danú frekvenciu, čo spôsobuje chybu pri jej výpočte.

Zariadenie má šesť demodulátorov, čo poskytuje možnosť súčasne merať tri parametre na každom vstupe zariadenia. To bolo využité pri meraní amplitúdy nosného signálu a dvoch amplitúd postranných pásiem frekvenčne modulovaného signálu. Hodnoty sú zobrazované v polárnych a karteziánskych čo bolo pri experimentoch overené. Výstup z demodulátoru, alebo z fázového závesu je možné priviesť na pomocný výstup AUX, čo bolo aplikované pri experimente využívajúcom fázový záves.

Karta „Spectroscope“ vykresľuje grafický priebeh výstupu vybraného demodulátoru. Na priebehu je možné pozorovať vplyv zmeny šírky pásma filtra daného demodulátoru. Pri väčšej šírke pásma sú zmeny výstupu demodulátoru rýchlejšie, ale aj vplyv šumu je výraznejší. Pri menšej šírke pásma sú zmeny pomalšie, ale znižuje sa aj vplyv šumu. Daný záver vychádza zo skúsenosti pri práci so zariadením a je podložený aj tvrdením výrobcu.

Kartu „Zoom FFT“ som využil v dvoch experimentoch. Výberom demodulátoru a centrálnej frekvencie sa zobrazí frekvenčné spektrum okolo centrálnej frekvencie. Za veľký nedostatok pokladám pevne danú šírku zobrazovaného okna v rozsahu ± 100 Hz okolo centrálnej frekvencie. Výhodou je presné frekvenčné spektrum, ktorého počet vzorkou je možné meniť.

Karta „Oscilloscope“ bola využitá v troch experimentoch. Slúži na zobrazovanie priebehu signálu z vybraného zdroja. Je si možné vybrať zo štyroch zdrojov signálu, trinástich zdrojov spúšťania časovej základne a šestnástich vzorkovacích frekvencií. Pre účely vykonaných experimentov v rozsahu 100 Hz až 1 MHz boli voliteľné vzorkovacie frekvencie úplne postačujúce. Rozsah „FFT“ okna sa mení so vzorkovacou frekvenciou a má skôr informačný charakter. Pre presné meranie frekvencií odporúčam použiť nástroj „Zoom FFT“.

Výrobca deklaruje možnosť použitia programov vytvorených v Labview, ktoré užívateľovi rozšíria aplikačné možnosti prístroja. Záverečný experiment bol zameraný na otestovanie takéhoto programu. Bola zmeraná šumová spektrálna hustota na vstupoch prístroja. Zmerané hodnoty neprekročili výrobcom stanovenú hranicu $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

9 ZÁVER

Predložená diplomová práca sa zaoberala problematikou zosilňovačov s fázovým závesom so zameraním na zariadenie HF2LI. Úvod práce je venovaný popisu činnosti fázového závesu a blokov zosilňovača s fázovým závesom, konštrukcii a prevádzkovým režimom prístroja HF2LI a softwaru ziControl.

Na svetovom trhu sú piati významný výrobcovia zosilňovačov s fázovým závesom: Stanford Research Systems, Signal Recovery, Zurich Instruments, Edmund optics a ITHACO. V práci je porovnaný digitálny zosilňovač HF2LI s prístrojmi SR 830 a DSP 7230, s ktorých mal zosilňovač HF2LI najlepšie parametre.

Predposledná kapitola je venovaná návrhu experimentu, ktorý overuje základné funkcie prístroja HF2LI a ponúka čitateľovi podrobný návod ich realizácie. Experiment má otestovať generovanie a meranie sínusového signálu, amplitúdovo modulovaného signálu a frekvenčne modulovaného signálu.

Experiment „**Meranie amplitúdovo modulovaného signálu**“ overil schopnosť prístroja generovať a merať amplitúdovo modulovaný signál. Meraná bola hĺbka modulácie, amplitúda nosného signálu, amplitúda modulačného signálu, frekvencia nosného signálu a frekvencia modulačného signálu. Zmerané frekvencie zodpovedali frekvenciám referenčným. Maximálny rozdiel medzi nameranou a referenčnou hodnotou amplitúdy dosiahol odchýlky 0,82%. Hodnota hĺbky modulácie odpovedala teoretickému predpokladu.

Experiment „**Meranie frekvenčne modulovaného signálu**“ ma za cieľ overil schopnosť prístroja generovať a merať frekvenčne modulovaný signál. Meraná bola amplitúda nosného signálu a dve amplitúdy postranného pásma, ktoré boli od seba fázovo posunuté o $179,4^\circ$. Pri modulačnom indexe 2,4048 nadobudla amplitúda nosného signálu hodnotu $5,7 \mu\text{V}$ čo predstavovalo jej minimum a splnilo aj teoretický predpoklad vychádzajúci z Besselovej funkcie pre nosnú frekvenciu.

V experimente „**Meranie s využitím fázového závesu**“ bola otestovaná činnosť fázového závesu pri využití pomocných výstupov prístroja. Meraná bola frekvencia modulačného signálu a frekvencia odchýlky kmitočtov. Frekvencia modulačného signálu sa líšila maximálne o 0,2 %. Výraznejší rozdiel (až 25 % pri 100 Hz) medzi referenčnou frekvenciou odchýlky kmitočtov a zmeranou frekvenciou bol z časti spôsobený útlmom na fázovom závese 0,053 dB, pričom sa počítalo s útlmom 0 dB. Najväčšiu chybu zanesla do výpočtu zvolená metóda, kde pri meraní nižších frekvencií (hlavne 100 Hz) boli hrany priebehu signálu rozmazané a nebolo možné určiť presnú polohu pre odčítanie.

V experimente „**Meranie vstupného šumu zariadenia HF2LI**“ bola zmeraná šumová spektrálna hustota vstupov prístroja pri použití externého programu ziExample-HF2-Noise. Zmerané hodnoty neprekročili výrobcom stanovenú hranicu $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ pre frekvencie do 10 kHz, na meracom rozsahu 10 mV, pri meraní striedavých signálov s odporom vstupu 50Ω .

Čitateľ bol v práci oboznámený s teoretickými princípmi využívanými u zosilňovačoch s fázovým závesom, komerčne dostupnými zariadeniami (a ich parametrami), ovládaním a funkciami prístroja HF2LI a experimentmi overujúcimi jeho vlastnosti.

Literatura

- [1] FEI STUBA. *EPO – Elektronické prvky a obvody* [online]. FEI STUBA ©2012 [cit. 30.4.2012]. Dostupné z: <http://kre.elf.stuba.sk/~epo/DV/EPO-12.pdf>
- [2] PIOVARČI, S. *Simulácia činnosti obvodov generovania nosného signálu koherentného prijímača DS-SS prenosového systému*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. 71 s.
- [3] KONEČNÝ, T. *Návrh fázového závěsu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 54 s.
- [4] Ďaďo S.; Vedral J. *Číslicové měření: Přístroje a metody*. Praha: nakladatelství ČVUT, 2006. 232 s. ISBN 80-01-02492-X
- [5] Ďaďo, S. *Koherentní demodulace a její využití v měřicí technice: Teorie, přístroje, aplikace* [online]. Brno: Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií, 2011. 70 s. [cit. 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.crr.vutbr.cz>
- [6] STANFORD RESEARCH SYSTEMS. *About Lock-In Amplifiers* [online]. ©2012 [cit. 30.4.2012]. Dostupné z: www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf
- [7] ZURICH INSTRUMENTS AG. *HF2 User Manual* [online]. ©2012 [cit. 27.12.2012]. Dostupné z: <http://www.zhinst.com/downloads>
- [8] ZURICH INSTRUMENTS AG. *HF2LI Lock-in Amplifier* [online]. ©2012 [cit. 27.12.2012]. Dostupné z: <http://www.zhinst.com/products/hf2li>
- [9] STANFORD RESEARCH SYSTEMS. *Model SR850 DSP Lock-In Amplifier* [online] ©2009 [cit. 27.5.2012]. Dostupné z: <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/SR850m.pdf>
- [10] ZURICH INSTRUMENTS. *UHFLI Lock-In Amplifier* [online] ©2012 [cit. 27.5.2012]. Dostupné z: http://www.zhinst.com/docs/leaflets/zi_uhfli_leaflet.pdf

- [11] AMETEK ADVANCED MEASUREMENT TECHNOLOGY. *Model 7270 DSP Lock-In Amplifier: Instruction Manual* [online] ©2009 [cit. 27.5.2012]. Dostupné z:
<http://www.sunnytek.net/admin/xiazai/files/201011316817265.pdf>
- [12] AMETEK ADVANCED MEASUREMENT TECHNOLOGY. *Model 7270 DSP Lock-In Amplifier* [online] ©2009 [cit. 27.5.2012]. Dostupné z:
<http://www.tlsbv.nl/pages/news/7270Brochure.pdf>
- [13] STANFORD RESEARCH SYSTEMS. *Model SR830 DSP Lock-In Amplifier* [online] ©2011 [cit. 1.1.2013]. Dostupné z:
<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/SR830m.pdf>
- [14] STANFORD RESEARCH SYSTEMS. *SR810 and SR830 Lock-In Amplifier* [online] ©2012 [cit. 1.1.2013]. Dostupné z:
<http://www.thinksrs.com/products/SR810830.htm>
- [15] SIGNAL RECOVERY. *Model 7230 DSP Lock-In Amplifier* [online] ©2012 [cit. . 1.1.2013]. Dostupné z:
<http://www.signalrecovery.com/literature/manuals.aspx>
- [16] ZURICH INSTRUMENTS AG. *HF2LI Lock-in Amplifier; Product Specification* [online] ©2011 [cit. . 1.1.2013]. Dostupné z:
http://www.zhinst.com/docs/leaflets/zi_hf2li_leaflet.pdf
- [17] ČEJKA, M. *Elektronická měřicí technika*, skripta, VUT: Brno, 2003
- [18] ČEJKA, M. *Elektronická měřicí technika*, prednasky, VUT: Brno, 2003

Zoznam použitých symbolov a skratiek

PLL (Phase Locked Loop)	Fázový záves
DP	Dolnopriepustný
PD (Phase Detector)	Fázový detektor
VCO (Voltage Controlled Oscillator)	Napätím riadený oscilátor
NLO	Napätím ladený oscilátor
LIA (Lock-In Amplifier)	Zosilňovač s fázovým závesom
KD	Koherentný demodulátor
NŘO (Napětím Řízený Oscilátor)	Napätím riadený oscilátor
AFCH	Amplitúdovo-Frekvenčná Charakteristika
RMS (Root Mean Square)	Efektívna hodnota
DSP (Digital Signal Processing)	Digitálny signálový procesor
MS/s (Mega Samples per second)	Milión vzorkou za sekundu
PC (Personal Computer)	Osobný počítač
AM	Amplitúdová modulácia
FM	Frekvenčná modulácia
NSD (Noise Spectral Density)	Šumová spektrálna hustota

Zoznam príloh

Príloha 1. CD/DVD