

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie

---



Bakalářská práce

**Optimalizace optického spektrometru  
pomocí softwarového lock-in analyzáru**

**Upgrade of optical spectrometer by  
software lock-in analyzer**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika  
Vedoucí práce: Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.  
Vypracoval: Lukáš Wimmer

Praha 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Wimmer** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **434837**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Optimalizace optického spektrometru pomocí softwarového lock-in analyzáru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Upgrade of optical spectrometer by software lock-in analyzer**

Pokyny pro vypracování:

1. Studium doporučené literatury, rešerše
2. Realizace optické cesty (zrcadla, dělič svazku)
3. Realizace detekce ze 3 detektorů (fotoproud, transmise, reference)
4. Instalace A-D převodníku (PXIe-4464, NI PXIe-1073 Integrated MXIe, MXI-Express/ExpressCard MXI Cable)
5. Použití komerčního softwarového lock-inu (mcDLA multichannel Digital Lock-in Analyzer)
6. Porovnání poměru signál/šum A-D převodníku a lock-in analyzáru
7. Zhodnotit možnosti případného naprogramování vlastního softwarového lock-inu

Seznam doporučené literatury:

- [1] Manuály komponent National Instruments <http://www.ni.com/pdf/manuals/376165b.pdf>
- [2] Princip lock-in analýzy signálu <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>
- [3] Článek: P. Kromer, R. Robinett, R. Bengtson, C. Hays, PC-Based Digital Lock-In Detection of Small Signals in the Presence of Noise <http://www.science.unitn.it/~bassi/Signal/AAPTpaper.pdf>
- [4] kniha: A. Platil, P. Ripka, Senzory a převodníky, Vydavatelství ČVUT v Praze 2004

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Mgr. Jakub Holovský Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: do 7.9.2018

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá realizací optické cesty aparatury pro měření kvantové účinnosti a jejího ovládání pomocí softwaru. Dále popisuje princip činnosti analogových lock-in zesilovačů a způsobem jejich nahrazení s využitím A/D převodníku a digitálního lock-in analyzátoru. Výstupem práce je fungující aparatura, se kterou je provedeno měření a výsledky měření jsou porovnány.

Klíčová slova: Optický spektrometr, Kvantová účinnost, Lock-in zesilovač, Šum

# **Abstract**

This bachelor thesis was aimed at realization optical path of the setup for quantum efficiency measurement and its control by software. It also deals with principle of analog-lock-in amplifiers and how it could be replaced by using and A/D converter and a digital lock-in analyzer. The output of this thesis is the full functional setup which was used for measurements and results were compared.

Keywords: Optical spectrometer, Quantum efficiency, Lock-in amplifier, Noise

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze 20. 5. 2017

.....

Lukáš Wimmer

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Mgr. Jakobovi Holovskému, Ph.D. za odborné vedení při zpracování této práce a konzultace k jejímu obsahu.

# Obsah

Kapitola 1	Úvod.....	10
Kapitola 2	Optika.....	11
2.1	Geometrická optika.....	11
2.1.1	Rovinné zrcadlo .....	11
2.1.2	Kulová zrcadla .....	11
2.1.3	Čočky .....	12
2.2	Vlnová optika.....	12
2.2.1	Spektrometry.....	12
2.3	Étendue .....	13
2.4	Kvantová účinnost.....	14
Kapitola 3	Šum .....	16
3.1	Zdroje šumu .....	16
3.1.1	Vnitřní zdroje šumu .....	16
3.1.2	Vnější zdroje šumu.....	17
3.1.3	Kvantizační šum.....	18
Kapitola 4	Lock-in zpracování signálu.....	19
4.1	Princip lock-in.....	19
Kapitola 5	Sestavení aparatury .....	22
5.1	Přístroje.....	22
5.1.1	Světelné zdroje.....	22
5.1.2	Monochromátor Bentham TMc 300.....	22
5.1.3	Lock-in amplifier Bentham 485 .....	23
5.2	Komponenty optické cesty.....	24
5.3	Sestavení aparatury .....	24
5.4	Ovládání aparatury .....	25
Kapitola 6	Implementace digitálního lock-in analyzátoru.....	33
6.1	Popis aparatury.....	33
6.1.1	A/D převodník.....	33
6.1.2	Digitální lock-in analyzátor.....	33
6.2	Popis programu .....	34
6.3	Porovnání analogového a digitálního lock-in analyzátoru.....	38
Kapitola 7	Závěr .....	42

# Seznam použitých symbolů a zkratek

$a$	mřížková konstanta
$A_{in}$	amplituda vstupního signálu
$A_{noise}$	amplituda šumu
$d$	je rozměr omezující apertury
$D$	průměr
$e$	elementární elektrický náboj
$EQE$	external quantum efficiency – externí kvantová účinnost
$EQE_{kalib}$	externí kvantová účinnost kalibrovaného detektoru
$EQE_{vzorek}$	externí kvantová účinnost vzorku
$F$	ohnisková vzdálenost
$f$	frekvence
$f\#$	f-číslo
$f_{ref}$	referenční kmitočet
$G$	Étendue
$h$	Planckova konstanta
$I$	elektrický proud
$IQE$	internal quantum efficiency – vnitřní kvantová účinnost
$k$	Boltzmannova konstanta
$l$	geometrická šířka mřížky
$m$	difrakční řád
$M$	absolutní hodnota vektoru
$N$	celkový počet vrypů mřížky
$P$	výkon
$Q$	prostorový úhel
$R$	elektrický odpor
$R_{refl}$	reflexe
$Rs$	spektrální rozlišení
$S$	obsah plochy
$S(f)$	spektrální hustota šumu závislá na frekvenci
$S_{in}$	vstupní signál
$S_{mult}$	signál vzniklý násobením signálů
$SR$	spektrální odezva
$S_{ref}$	signál o referenčním kmitočtu
$S_{vzorek}$	signál naměřený na vzorku
$T$	translace
$t$	čas
$T_{th}$	termodynamická teplota
$U$	elektrické napětí
$U_{Jonhson\ noise\ (rsm)}$	efektivní hodnota napětí Jonhsonova šumu
$U_{noise\ (rsm)}$	celkový vnitřní šum
$U_{shot\ noise\ (rsm)}$	efektivní hodnota napětí rázového šumu
$X$	x-ová složka vektoru
$Y$	y-nová složka vektoru
$\Delta \lambda$	rozdíl vlnových délek
$\lambda$	vlnová délka
$\varphi$	úhel svírající výstupní paprsky k normále mřížky
$\varphi_i$	úhel vstupních paprsků k normále mřížky
$\varphi_{in}$	fázový posun vstupního signálu
$\varphi_{noise}$	fázový posun šumu
$\omega_{noise}$	úhlová rychlost šumu
$\omega_{ref}$	referenční úhlová rychlost

AC	alternating current – střídavý proud
CLF	call library function
DC	direct current – stejnosměrný proud
FL	focal length – ohnisková vzdálenost
mcDLA	Multiple-channel Digital Lock-in
PSD	phase sensitive detector – detektor citlivý na fázi
SDK	Software development kit



# Seznam obrázků

Obr. 2.1 - Rovinné zrcadlo .....	11
Obr. 2.2 - Duté zrcadlo (vlevo), vypuklé zrcadlo (vpravo) .....	12
Obr. 2.3 - Spojková čočka (vlevo), rozptylová čočka (vpravo) .....	12
Obr. 2.4 – Systém monochromátoru [8] .....	14
Obr. 2.5 - Křivka externí kvantové účinnosti [5] .....	15
Obr. 3.1 - $1/f$ a bílý šum .....	17
Obr. 5.1 - Relativní spektrum záření xenonové [7] (vlevo) a halogenové lampy [6] (vpravo) .....	22
Obr. 5.2 - Princip monochromátoru .....	23
Obr. 5.3 - Rozmístění komponentů .....	25
Obr. 5.4 - BI_select_wavelength .....	26
Obr. 5.5 - Call Library Function - BI_select_wavelength .....	26
Obr. 5.6 - SDK - BI_select_wavelength[10] .....	27
Obr. 5.7 - Hlavní panel .....	28
Obr. 5.8 - Hlavní panel - pokročilá nastavení .....	29
Obr. 5.9 - Inicializace systému .....	30
Obr. 5.10 - Načtení referenčních dat ze souborů .....	31
Obr. 5.11 - Příprava hlavičky souboru s naměřenými hodnotami .....	31
Obr. 5.12 - Hledání hodnot v referenčních datech .....	32
Obr. 5.13 - Průběh EQE .....	32
Obr. 6.1 - mcDLA .....	34
Obr. 6.2 - Hlavní panel .....	35
Obr. 6.3 - mcDLA - Inicializace .....	36
Obr. 6.4 - mcDLA - Analýza .....	36
Obr. 6.5 - mcDLA - kontrola rozsahu .....	37
Obr. 6.6 - mcDLA – ukončení .....	37
Obr. 6.7 - Zápis a zobrazení naměřených dat .....	38
Obr. 6.8 - Reference .....	39
Obr. 6.9 - Fotoproud .....	40
Obr. 6.10 - Fáze .....	41
Obr. 6.11 - Transmise .....	41

# Kapitola 1 Úvod

V dnešní době je kladen čím dál větší tlak na využívání obnovitelných zdrojů. Mezi hlavní obnovitelné zdroje energie patří sluneční záření, které se přeměňuje na elektrickou energii například pomocí fotovoltaických systémů. Účinnost fotovoltaických systémů je relativně malá, což vede k tlaku na rozvoj technologie výroby fotovoltaických článků, ale i k potřebě mít standardizované testovací prostředí pro zkoušení těchto článků. Jedním z možných způsobů posuzování fotovoltaických článků jsou křivky kvantové účinnosti.

Kvantová účinnost fotovoltaických článků udává poměr počtu fotogenerovaných elektronů ku počtu dopadajících fotonů a měří se v závislosti na vlnové délce světla. Jako zdroj záření se nevyužívá Slunce, ale většinou kombinace různých typů světelných zdrojů. Využívají se xenonové a halogenové lampy kvůli rozdílným spektrálním rozsahům, jež se navzájem doplňují. Světlo ze zdroje rozloží monochromátor a vybere se požadovaná vlnová délka, která je přivedena na zkoušený fotovoltaický článek a je změřena jeho účinnost.

Cílem této práce je sestavit a naprogramovat ovládání aparatury sloužící k měření kvantové účinnosti fotovoltaických článků, který využívá analogový lock-in zesilovač. Dále pak provést nahrazení analogového lock-in zesilovače digitálním a porovnat výsledky měření pomocí analogového a digitálního lock-in analyzátoru.

# Kapitola 2 Optika

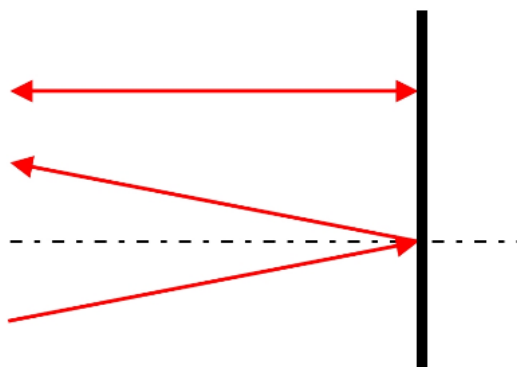
Optika je věda zkoumající podstatu světla a zákonitosti světelných jevů, které vznikají při šíření světla a při vzájemném působení světla a objektů. Optika se dále dělí na geometrickou, vlnovou a kvantovou optiku.

## 2.1 Geometrická optika

Na přímočarém šíření světla a nezávislosti chodu světelných paprsků v homogenním prostředí a zákonech odrazu a lomu je založena paprsková optika, která se uplatňuje při popisu optického zobrazení. Obraz zdroje světla je obvykle nalezen pomocí geometrické konstrukce tvořené přímkami, které odpovídají vybraným světelným paprskům. Přitom se nepřihlíží k jevům spojeným s vlnovou povahou světla. Popisuje interakci světla s objekty, jež mají rozměry značně větší, než je vlnová délka světla. Pro návržení optické cesty, která distribuuje světelný svazek od monochromátoru k měřenému vzorku fotovoltaického článku a referenčním detektorům, byly využity poznatky geometrické neboli paprskové optiky. Podle geometrické optiky lze popsat chování paprsků při kontaktu se základními optickými prvky, jako jsou rovinná a kulová zrcadla a čočky.

### 2.1.1 Rovinné zrcadlo

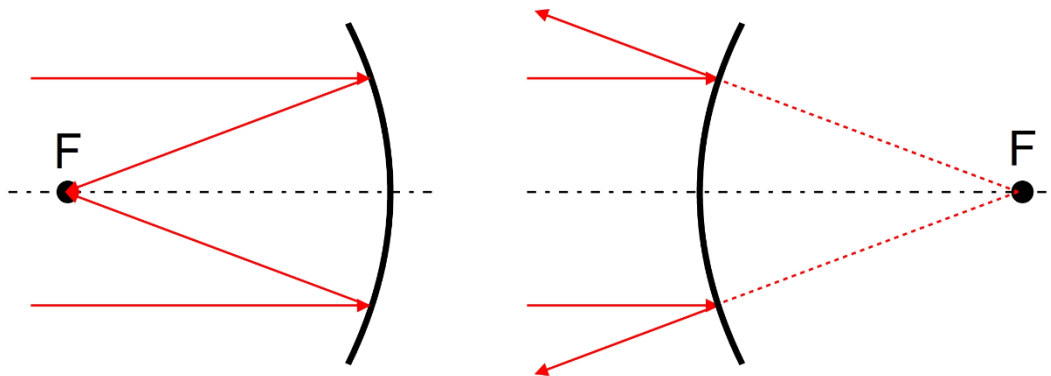
Rovinné zrcadlo je takový optický prvek, jež lze charakterizovat ohniskovou vzdáleností rovnou nekonečnu. Rovnoběžné paprsky přicházející k rovinnému zrcadlu se odrazí a po odrazu zůstávají rovnoběžné.



Obr. 2.1 - Rovinné zrcadlo

### 2.1.2 Kulová zrcadla

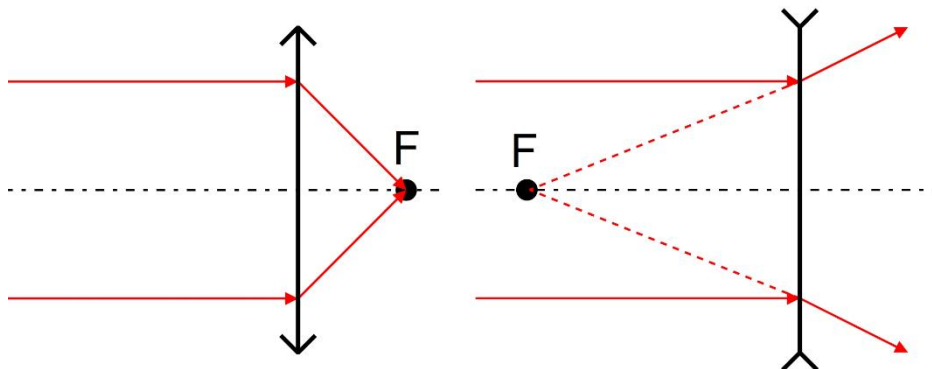
Kulová zrcadla nesou také označení zrcadla sférická. Tato zrcadla rozlišujeme dle umístění zrcadlicí plochy na kulovém vrchlíku. Duté (konkávní) zrcadlo má zrcadlicí plochu na vnitřní ploše vrchlíku, zrcadlicí plocha vypuklého (konvexní) zrcadla se nachází na vnějším povrchu vrchlíku. Pokud na duté zrcadlo dopadnou dva rovnoběžné paprsky, po odrazu se protnou v ohnisku zrcadla. Pokud dva rovnoběžné paprsky dopadnou na zrcadlo vypuklé, po odrazu se stávají rozbíhavými.



Obr. 2.2 - Duté zrcadlo (vlevo), vypuklé zrcadlo (vpravo)

### 2.1.3 Čočky

Typy čoček jsou děleny dle způsobu šíření světelného paprsku čočkou. Pokud jsou světelné paprsky dopadající na povrch čočky rovnoběžné a po průchodu se lámou do jednoho bodu jedná se o spojnou čočku, pokud jsou po průchodu prostředím čočky paprsky rozbíhavé jedná se o čočku rozptylnou.



Obr. 2.3 - Spojková čočka (vlevo), rozptylová čočka (vpravo)

## 2.2 Vlnová optika

Vlnová optika řeší jevy, jež není možné objasnit na základě geometrické optiky. Jedná se o jevy, které vznikají na objektech, které mají srovnatelný charakteristický rozměr s vlnovou délkou světla – interference, ohyb, polarizace. Pro objasnění těchto jevů je potřeba brát v úvahu vlnovou povahu světla. Jedná se o objekty, jako jsou optické mřížky, štěrby nebo polarizační filtry.

### 2.2.1 Spektrometry

Spektrometry jsou přístroje, jejichž poloha obrazu vstupní štěrby je závislá na vlnové délce světla. Závislost je dána vlastnostmi disperzního prvku. Jako disperzní prvek se často využívá optická ohybová mřížka. Na optické mřížce dochází k Fraunhoferově difrakci. Důležitým parametrem pro popis spektrometrů je spektrální rozlišení. Spektrální rozlišení se dá definovat pomocí vztahu (2.1), kde  $R_s$  je spektrální rozlišení,  $\lambda$  vlnová délka,  $\Delta \lambda$  je nejmenší rozdíl mezi vlnovými délkami maxim dvou blízkých spektrálních čar, které lze rozlišit.

$$Rs = \left| \frac{\lambda}{\Delta \lambda} \right| \quad (2.1)$$

Dopadá-li na optickou mřížku světlo, vzniká mezi dvěma paprsky ze dvou sousedních vrypů dráhový rozdíl. Tento dráhový rozdíl je popsán vztahem (2.2), kde  $a$  je mřížková konstanta,  $\varphi_i$  úhel vstupních paprsků k normále mřížky a  $\varphi$  úhel, který svírají výstupní paprsky k normále mřížky.

$$a(\sin \varphi_i - \sin \varphi) \quad (2.2)$$

Jsou-li vstupní a výstupní paprsky ve stejné rovině, je ve vztahu (2.2) místo rozdílu součet, což vychází ze zavedené znaménkové konvence. Na základě vztahu pro dráhový rozdíl lze vyjádřit mřížkovou rovnici (2.3), kde  $m$  je celé číslo určující difrakční řád.

$$a(\sin \varphi_i - \sin \varphi_m) = m\lambda \quad (2.3)$$

Z hlediska použité mřížky je maximální možné rozlišení mřížkového přístroje dáno vztahem (2.4), kde  $l$  je geometrická šířka mřížky,  $a$  je mřížkový parametr a  $m$  je difrakční řád, ve kterém je světlo pozorováno,  $N$  představuje celkový počet vrypů mřížky a  $d$  je rozměr omezující apertury.

$$Rs = d \frac{|m|}{a \cos \varphi_m} = \frac{l}{a} |m| = N|m| \quad (2.4)$$

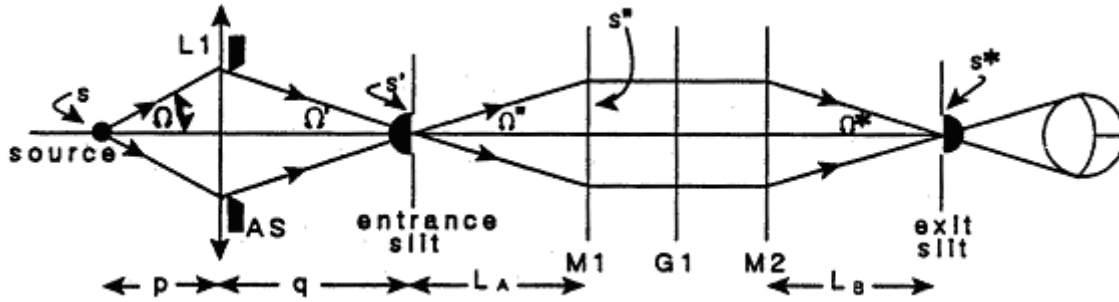
## 2.3 Étendue

Z hlediska využití světelného zdroje je snaha využít světlo z co největší jeho vyzařovací plochy a zároveň z co největšího vyzařovacího úhlu. Naopak například pro monochromátor je třeba světlo přivádět pod omezeným úhlem na co nejmenší plochu. Pro vztah těchto veličin platí fyzikální zákon, kde vystupuje veličina zvaná étendue. Étendue  $G$  je definováno vztahem (2.5), kde  $dS$  je element plochy a  $dQ$  je element prostorového úhlu. V celé optické soustavě se hodnota étendue zachovává, pokud nedochází k rozptylu světla. Pokud je dodržena rovnost étendue jednotlivých částí systému, je systém dobře navržen z hlediska maximálního využití světelného zdroje. Pokud rovnost není dodržena, étendue systému určeno jeho největší hodnotou.

$$dG = dS \cdot dQ$$

$$G = \iint dS dQ = \pi \cdot S \cdot \sin^2 \Omega \quad (2.5)$$

Na Obr. 2.4 je zobrazen systém monochromátoru, kde  $S$  je plocha zdroje,  $\Omega$  je polovina úhlu světla dopadajícího na čočku  $L1$ ,  $S'$  představuje plochu vstupní štěrby monochromátoru,  $\Omega'$  je polovina úhlu světla vycházejícího z  $L1$ ,  $\Omega''$  polovina úhlu světla dopadajícího na  $M1$ ,  $S''$  plocha zrcadla  $M1$ ,  $\Omega^*$  je polovina úhlu světla vycházejícího ze zrcadla  $M2$  a  $S^*$  je plocha výstupní štěrby. Písmena  $p$ ,  $q$ ,  $L_A$ ,  $L_E$  představují vzdálenosti mezi komponenty.



Obr. 2.4 – Systém monochromátoru [8]

Rovnice (2.6) popisuje optimalizovaný systém s monochromátorem dle Obr. 2.4

$$G = \pi S \sin^2 \Omega = \pi S' \sin^2 \Omega' = \pi S'' \sin^2 \Omega'' = \pi S^* \sin^2 \Omega^* \quad (2.6)$$

Étendue lze pro vyšší  $f\#$  čísla, která jsou definována vztahem (2.7) a popisují poměr ohniskové vzdálenosti ku průměru, aproximovat rovnicí (2.8). Monochromátory mají zpravidla  $f\#$  čísla okolo 4 touto hodnotou je poté omezeno étendue celé soustavy.

$$f\# = \frac{F}{D} = \frac{1}{2 \sin(\Omega)} \quad (2.7)$$

$$G \approx Q \cdot S \Rightarrow S \cdot \frac{L_S}{p^2} = S' \cdot \frac{L_S}{q^2} \quad (2.8)$$

## 2.4 Kvantová účinnost

Ideálně by se do struktury fotovoltaického článku dostaly k přeměně energie všechny přicházející fotony, ale ve skutečnosti se část fotonů odrazí, mluvíme o reflexi, a část článkem projde, mluvíme o transmissi. Část fotonů se sice absorbuje, ale do generovaného elektrického proudu nepřispěje. Pro zhodnocení se využívá křivek kvantové účinnosti.

Externí kvantová účinnost  $EQE$  je definována jako podíl počtu elektronů při režimu nakrátko ku počtu přicházejících fotonů (2.9). Dále je možné na základě první příčiny snížení účinnosti definovat vnitřní kvantovou účinnost  $IQE$ , která nezapočítává reflektované a propuštěné fotony (2.10). Vztah mezi externí kvantovou účinností a spektrální odezvou lze vyjádřit podle (2.11), spektrální odezva  $SR$  je rovna podílu externí kvantové účinnosti a energii fotonu vyjádřené v elektronvoltech.

$$EQE = \frac{\text{počet elektronů při režimu na krátko}}{\text{počet přicházejících fotonů}} = \frac{\frac{I}{e}}{\frac{P}{\hbar f}} [-] \quad (2.9)$$

$$IQE = \frac{\text{počet elektronů při režimu na krátko}}{\text{počet fotonů proniklých do struktury}} = \frac{EQE}{1 - R_{refl} - T} [-] \quad (2.10)$$

$$SR = EQE \cdot \frac{q}{hf} = \frac{EQE}{hf[eV]} [AW^{-1}] \quad (2.11)$$

*e ... elementární náboj*

*h ... Planckova konstanta*

*f ... frekvence*

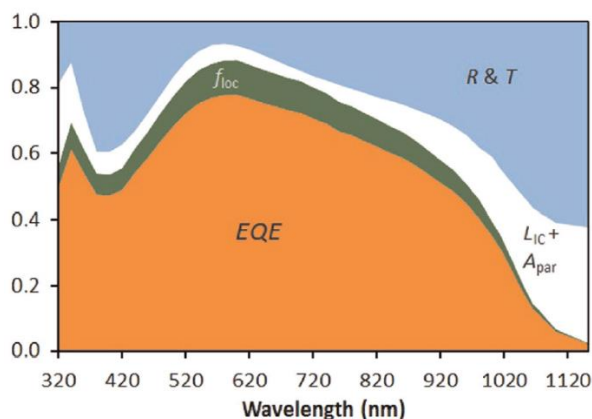
*I ... elektrický proud v režimu na krátko*

*P ... výkon*

*R<sub>refl</sub> ... reflexe*

*T ... transmise*

Příklad křivky kvantové účinnosti s vyznačením jednotlivých optických ztrát je ukázán na Obr. 2.5 – oranžová oblast *EQE*, vliv reflexe a transmise je modrá oblast označena *R & T*.



Obr. 2.5 - Křivka externí kvantové účinnosti [5]

Energie nesená fotonem je přímo úměrná frekvenci. Při stejném zářivém výkonu je tedy tok fotonů v ultrafialové oblasti značně nižší než infračervené, což znamená, že odpovídající spektrální odezva, což je křivka popisující přeměnu energie bez ohledu na kvantování, je v ultrafialové oblasti nižší a v infračervené oblasti vyšší.

# Kapitola 3 Šum

## 3.1 Zdroje šumu

Hlavní zdroje šumu se dají rozdělit do tří odvětví. Do prvního odvětví patří vnitřní šum aparatury (Johnsonův šum, rázový šum, 1/f šum). V druhém odvětví jsou externí zdroje šumu. Třetím odvětvím je kvantizační šum způsobený číslicovým zpracováním signálu.

### 3.1.1 Vnitřní zdroje šumu

#### 3.1.1.1 Johnsonův šum

Johnsonův šum má každá látka s elektrickým odporem. Tento šum je způsoben teplotním pohybem elektronů. Pohyb elektronů vede k nábojovým nehomogenitám, které způsobují napěťové fluktuace. Šum roste s rostoucí teplotou a lze jej popsat rovnicí (3.1).

$$U_{Johnson\ noise\ (rsm)} = \sqrt{4kT_{th}R\Delta f} \quad [V] \quad (3.1)$$

V rovnici vystupuje Boltzmannova konstanta  $k$ ,  $T$  je termodynamická teplota,  $R$  představuje odpor součástky,  $\Delta f$  je frekvenční rozsah měření. Uvažujeme-li standardní teplotu 300 kelvinů, lze rovnici přepsat do tvaru (3.2).

$$U_{Johnson\ noise\ (rsm)} = \sqrt{4kT_{th}R\Delta f} \cong 0,1287\sqrt{R\Delta f} \quad [nV] \quad (3.2)$$

#### 3.1.1.2 Rázový šum

Rázový šum způsobuje fluktuace pohybu elektronů, tato fluktuace vede k fluktuacím elektrického proudu. Šum lze popsat rovnicí (3.3), kde  $e$  je náboj elektronu,  $I$  je buď efektivní hodnota střídavého proudu obvodu nebo střední hodnota stejnosměrného proudu obvodu.

$$U_{shot\ noise\ (rsm)} = R\sqrt{2eI\Delta f} \quad [V] \quad (3.3)$$

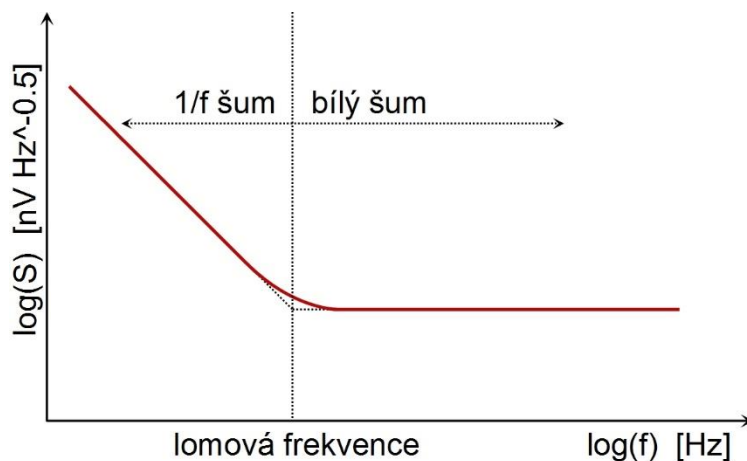
#### 3.1.1.3 Růžový a bílý šum

Růžový neboli 1/f šum je šum elektronických prvků (např. odporů, MOSFET a bipolárních tranzistorů). Energie šumu klesá s rostoucí frekvencí a lze ji popsat funkcí spektrální hustoty šumu závislé na frekvenci (3.4).

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (3.4)$$



Při zvýšení frekvence až nad tzv. lomovou frekvenci se dostáváme do oblasti bílého šumu. Spektrální hustota bílého šumu už na dalším zvyšování frekvence není závislá a je konstantní. Kvůli omezení vlivu toho šumu, přenesení do oblasti s nižší spektrální hustotou šumu, se využívá převedení signálu ze stejnosměrného na střídavý pomocí modulační optickým přerušovačem, tzv. choppování. Choppování v optických soustavách se provádí například kmitajícím plíškem nebo kolem s definovaným počtem otvorů, které střídavě zakrývají a odkrývají světelný zdroj.



Obr. 3.1 - 1/f a bílý šum

### 3.1.1.4 Celkový vnitřní šum

Jednotlivé složky šumu jsou nezávislé na sobě. Pro celkovou efektivní hodnotu napětěového šumu lze psát rovnici (3.5).

$$U_{noise (rsm)} = \sqrt{U_{Johnson\ noise (rsm)}^2 + U_{shot\ noise (rsm)}^2 + U_{1/f\ noise (rsm)}^2} \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Vnější zdroje šumu

Vnějších zdrojů šumu je neomezené množství. Navzájem na sebe působí na základě elektromagnetických vazeb. Rušení může způsobovat elektrické osvětlení laboratoře, klimatizace, motory či počítače. Značné rušení se objevuje při kmitočtu rozvodné elektrizační sítě, pro omezení vlivu této frekvence na měřenou veličinu je dobré volit frekvenci, pokud je to možné, měřeného signálu rozdílnou. Mnoho těchto zdrojů rušení lze minimalizovat správným návrhem aparatury a laboratoře.

### 3.1.3 Kvantizační šum

Chceme-li převést analogový signál na signál digitální dochází ke vzorkování analogového signálu v čase a kvantování v amplitudě. Tento proces zajišťuje A/D převodník. Při vzorkování mluvíme o vzorkovací frekvenci, která popisuje počet vzorků signálu převedených za jednotku času. Pořízený vzorek signálu je porovnán s rozhodovacími úrovněmi a je mu přidělena odpovídající kvantizační hladina. Rozhodovací úrovně jsou při lineárním kvantování uprostřed intervalu mezi kvantizačními hladinami. Počet rozhodovacích a kvantizačních hladin je dán počtem bitů A/D převodníku. Signál je převodem zkreslen. Toto zkreslení je způsobeno konečným počtem kvantizačních hladin a má charakter šumu.

# Kapitola 4 Lock-in zpracování signálu

Lock-in analýza se využívá u měření velmi malých AC signálů až po signály v řádech nanovoltů. Takto slabý signál není možné jiným způsobem měřit, jelikož šum pozadí má větší amplitudu než hledaný signál. Detekování signálu pomocí lock-in analýzy využívá znalost frekvence měřeného signálu, což vede k separaci signálu a signály jiných frekvencí měření neovlivňují.

## 4.1 Princip lock-in

Pro lock-in měření je potřeba znát frekvenci signálu, jehož amplitudu chceme měřit. Frekvenci je možné určit z externího i interního zdroje. Pro pochopení principu budeme uvažovat signál čistě kosinusový. Signál nesoucí informaci o frekvenci označíme jako signál referenční  $S_{ref}$  o frekvenci  $f_{ref}$  a odpovídající úhlové rychlosti  $\omega_{ref}$ . Referenční signál je popsán rovnicí (4.1). Vstupní signál obsahující šum a měřený signál označíme  $S_{in}$ . Vstupní měřený signál má amplitudu  $A_{in}$  a fázový posun vůči referenčnímu signálu  $\varphi_{in}$ . Šum reprezentuje suma signálů o amplitudách  $A_{noise}$ , úhlových rychlostech  $\omega_{noise}$  a fázových posunech  $\varphi_{noise}$ . Signál lze tedy popsat následující rovnicí (4.2).

$$S_{ref} = A_{ref} \cos(\omega_{ref} \cdot t) \quad (4.1)$$

$$S_{in} = A_{in} \cos(\omega_{ref} \cdot t + \varphi_{in}) + \sum_{\omega_{noise}} A_{noise} \cos(\omega_{noise} \cdot t + \varphi_{noise}) \quad (4.2)$$

Abychom získali signál, využijeme známé goniometrický vztah (4.3), který popisuje kosinus součtu a rozdílu argumentů. Z těchto vztahů lze vyjádřit vztah pro součin kosinů různých argumentů (4.4), jež dále využijeme.

$$\begin{aligned} \cos(a + b) &= \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b) \\ \cos(a - b) &= \cos(a) \cos(b) + \sin(a) \sin(b) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \cos(a) \cos(b) &= \frac{\cos(a + b) + \cos(a - b)}{2} \\ \cos(a) \cos(b) &= \frac{1}{2} (\cos(a + b) + \cos(a - b)) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Pokud mezi sebou vynásobíme referenční signál a vstupní signál (4.5), získáme dle předchozího vztahu signál  $S_{mult}$ , který lze zapsat rovnicemi (4.6) za předpokladu rovnosti frekvence měřeného a referenčního signálu.

$$S_{mult} = S_{ref} \cdot S_{in} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
S_{mult} &= \frac{1}{2} A_{in} A_{ref} [\cos(2 \cdot \omega_{ref} \cdot t + \varphi_{in}) + \cos(0 \cdot \omega_{ref} \cdot t + \varphi_{in})] \\
&\quad + A_{ref} \cos(\omega_{ref}) \sum_{\omega_{noise}} A_{noise} \cos(\omega_{noise} \cdot t + \varphi_{noise}) = \\
&= \frac{1}{2} A_{in} A_{ref} [\cos(2 \cdot \omega_{ref} \cdot t + \varphi_{in}) + \cos(\varphi_{in})] \\
&\quad + \sum_{\omega_{noise}} A_{ref} A_{noise} \cos((\omega_{ref} + \omega_{noise}) \cdot t + \varphi_{noise}) \\
&\quad + \sum_{\omega_{noise}} A_{ref} A_{noise} \cos((\omega_{ref} - \omega_{noise}) \cdot t - \varphi_{noise}) \quad (4.6) \\
&= \frac{1}{2} A_{in} A_{ref} \cos(\varphi_{in}) \\
&\quad + \frac{1}{2} A_{in} A_{ref} \cos(2 \cdot \omega_{ref} \cdot t + \varphi_{in}) \\
&\quad + \sum_{\omega_{noise}} A_{ref} A_{noise} \cos((\omega_{ref} + \omega_{noise}) \cdot t + \varphi_{noise}) \\
&\quad + \sum_{\omega_{noise}} A_{ref} A_{noise} \cos((\omega_{ref} - \omega_{noise}) \cdot t - \varphi_{noise})
\end{aligned}$$

Na základě shodnosti frekvencí referenčního a měřeného signálu získáváme složku signálu vzniklého násobením signálů, která je statická a úměrná amplitudě referenčního signálu, amplitudě měřeného signálu a kosinu fázového posunu. Další složky nejsou statické, tyto složky odstraníme filtrem typu dolní propust. Fázový posun lze měnit tak, abychom získali maximální hodnotu, což odpovídá nulovému fázovému posunu. Hledání maxima je typické pro single-phase PSD detektory. Další možností, jak omezit závislost na kosinu fázovému posunu, je využít dva PSD detektory poté mluvíme dual-phase lock-in.

Fázový posun mezi referenčními signály jednoho a druhého detektoru nastavíme na 90°. Poté je výstup jednoho detektoru závislý na kosinu fázového posunu a druhý na sinu fázového posunu. Pokud výstup závislý na kosinu fázového posunu označíme jako X (4.7) a výstup závislý na sinu fázového posunu jako Y (4.8), získáme hodnotu měřeného signálu jako velikost vektoru M (4.9) skládajícího se ze složek X a Y. Tato hodnota není závislá na fázovém posunu a fázový posun lze určit pomocí funkce arkus tangens poměru Y ku X (4.10).

$$X = \frac{1}{2} A_{in} A_{ref} \cos(\varphi_{in}) \quad (4.7)$$

$$Y = \frac{1}{2} A_{in} A_{ref} \sin(\varphi_{in}) \quad (4.8)$$

$$M = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4.9)$$

$$\varphi_{in} = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (4.10)$$

Lock-in zpracování je možné provést pomocí analogových lock-in zesilovačů nebo digitálně. Digitální řešení se skládá ze zesíleného signálu přivedeného na A/D převodník, který signál vzorkuje v čase a kvantuje v amplitudě. Na vstupu se využívá anti-aliasingových filtrů, které brání vstupu signálům, jež mají vyšší frekvence než je polovina vzorkovací frekvence dle Shannon-Kotělnikova teorému. Digitální signál je vynásoben digitální reprezentací referenčního signálu. Analogové násobení signálů může způsobovat problémy jako například výstupní offset, omezená dynamika, či chyba zesílení.

# Kapitola 5 Sestavení aparatury

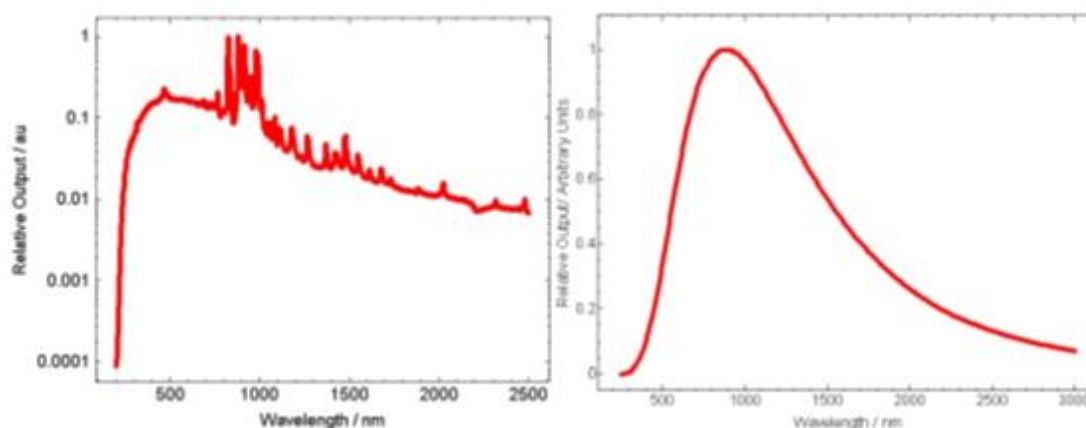
Aparatura pro měření kvantové účinnosti se skládá ze tří skupin komponentů. První skupina obsahuje přístroje, které zajišťují generování modulovaného svazku paprsků požadované vlnové délky. Využívá se dvou lamp jako světelných zdrojů. Paprsky jsou modulovány (choppovány) zvolenou frekvencí a přivedeny na vstupní štěrbinu monochromátoru. Druhá skupina komponent vede monochromatický svazek ke vzorkům. Do této skupiny patří kulová zrcadla, plochá zrcadla, dělič svazku a čočka. Třetí skupina zajišťuje detekci nízko-úrovňového signálu z referenčního a měřeného vzorku. Do této skupiny patří předzesilovač a lock-in zesilovač. Pro ovládání monochromátoru a vyhodnocování zesíleného signálu se využívá osobní počítač.

## 5.1 Přístroje

Pracoviště se z velké části skládá z přístrojů značky Bentham. Jedná se o přístroje: 2 zdroje konstantního proudu Bentham 605 pro lampy, xenonová lampa Bentham IL-75e, halogenová lampa Bentham IL-1, chopper Bentham, monochromátor Bentham TMc 300, Bentham Transformer 474, Bentham Pre-Amplifier 474, Bentham Lock-in amplifier 485 a modulu 417, který slouží k zobrazování hodnoty a komunikaci s počítačem.

### 5.1.1 Světelné zdroje

Zdrojem světelného záření pro pracoviště je dvojice lamp. Na Obr. 5.1 jsou znázorněna relativní spektra záření xenonové lampy (vlevo) a halogenové lampy (vpravo), rozdíl spekter, hlavně v ultrafialové části, je důvodem využívání právě této dvojice lamp. Xenonová lampa IL-75e se využívá jako zdroj světelného záření vyšší frekvence. Lampa IL-1 je halogenového typu a je vybrána při měření s nižší frekvencí monochromatického světla. Monochromátor si pomocí zrcadla vybírá mezi lampami dle požadované vlnové délky.



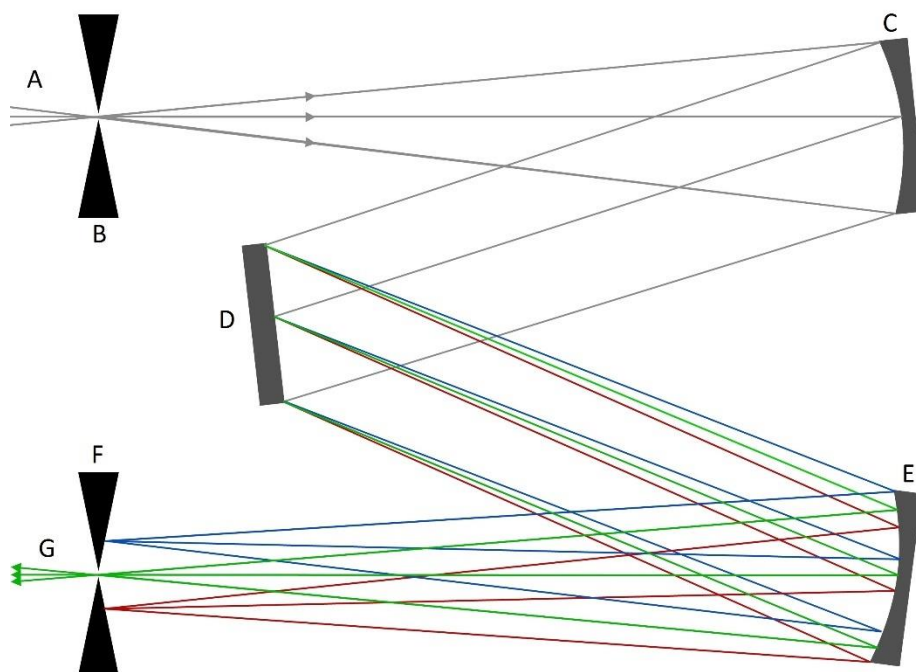
Obr. 5.1 - Relativní spektrum záření xenonové [7] (vlevo) a halogenové lampy [6] (vpravo)

### 5.1.2 Monochromátor Bentham TMc 300

Monochromátor je přístroj, kterému je na vstupní štěrbinu přivedeno elektromagnetické záření o širokém spektru a na výstupu je pouze úzká část spektra v okolí vybrané vlnové délky.

Princip činnosti je založen na ohybu vstupního záření na mřížce, která je tvořena velkým počtem vrypů, jež jsou vzdálené o mřížkový parametr. Tím vzniká fázové zpoždění. Vlivem velkého množství vrypů a tedy příspěvků o různém fázovém rozdílu tak dojde k potlačení (destruktivní interference) všech příspěvků kromě těch, u kterých je fázový rozdíl přesně  $m$ -tým násobkem vlnové délky (konstruktivní interference).

Na Obr. 5.2 je znázorněn princip monochromátoru. Štěrbínou B vstupuje svazek A do monochromátoru, ten je dutým zrcadlem C přeměněn na rovnoběžný a přiveden na otočnou věž s mřížkou – D. Tato věž je ovládána přesným krokovým motorem. Složky spektra jsou přivedeny na zrcadlo E, které je fokusuje. Na základě otočení věže je vybírána požadovaná vlnová délka svazku G na výstupní štěrbině F.



Obr. 5.2 - Princip monochromátoru

### 5.1.3 Lock-in amplifier Bentham 485

Na vstup lock-in zesilovače je přiveden AC signál, který je reakcí fotovoltaického článku na choppovaný světelný tok. Na výstupu zesilovače je proporčně modulovaný DC signál, který je připojen na AD převodník. Před zesilovač je možné zapojit Bentham Transformer 474 a Bentham Pre-Amplifier 474. Výstup je veden do bloku IP 1 Lock-in zesilovače. Dále je do bloku zesilovače, krom měřeného signálu, přiveden signál s referenční frekvencí.

Tento použitý lock-in zesilovač je jednofázový a bez automatického fázování, a tak je třeba fázový posun nastavit manuálně. Na vstup zesilovače se přivede silnější signál a spustí se manuální ovládání zesilovače pomocí tlačítka *RTL*. Několikrát se stiskne tlačítko  $90^\circ/180^\circ$ . Sleduje se sekvenční změna údajů zobrazovaných na kanálu A na jednotce 417. Střídá se údaj o vyšší kladné hodnotě, hodnotě blízké nule, vyšší záporné hodnotě a hodnotě blízké nule. Vybere se jeden z kvadrantů, kde je zobrazovaný údaj blízký nule a použije se otočný knoflík pro změnu fáze, fáze se nastaví tak, aby byl zobrazovaný údaj nejmenší – nejbližší nule. Fáze je nastavena po stisknutí tlačítka  $90^\circ$  pro přepnutí do kvadrantu s vysokou kladnou hodnotou.

## 5.2 Komponenty optické cesty

Optická cesta od štěrbinu monochromátoru po referenční a měřený vzorek je vedena vzduchem pomocí soustavy zrcadel. Rozbíhavý svazek vystupující ze štěrbinu monochromátoru s F# 4.1 je převeden na rovnoběžný svazek pomocí konvexního zrcadla. Rovnoběžný svazek je přiveden na ploché zrcadlo, kterým se upravuje jeho směr. Svazek je rozdělen pomocí děliče a malá část je přivedena na konvexní čočku, který svazek fokusuje na referenční vzorek. Většina svazku ale pokračuje na povrch konvexního zrcadla, které ho ostří na měřený vzorek. Zrcadla a čočky jsou umístěny na držácích a ty na optických stojanech a základnách, které byly vybrány s ohledem na možné budoucí změny konfigurace optické cesty. Následující komponenty byly v rámci práce vybrány.

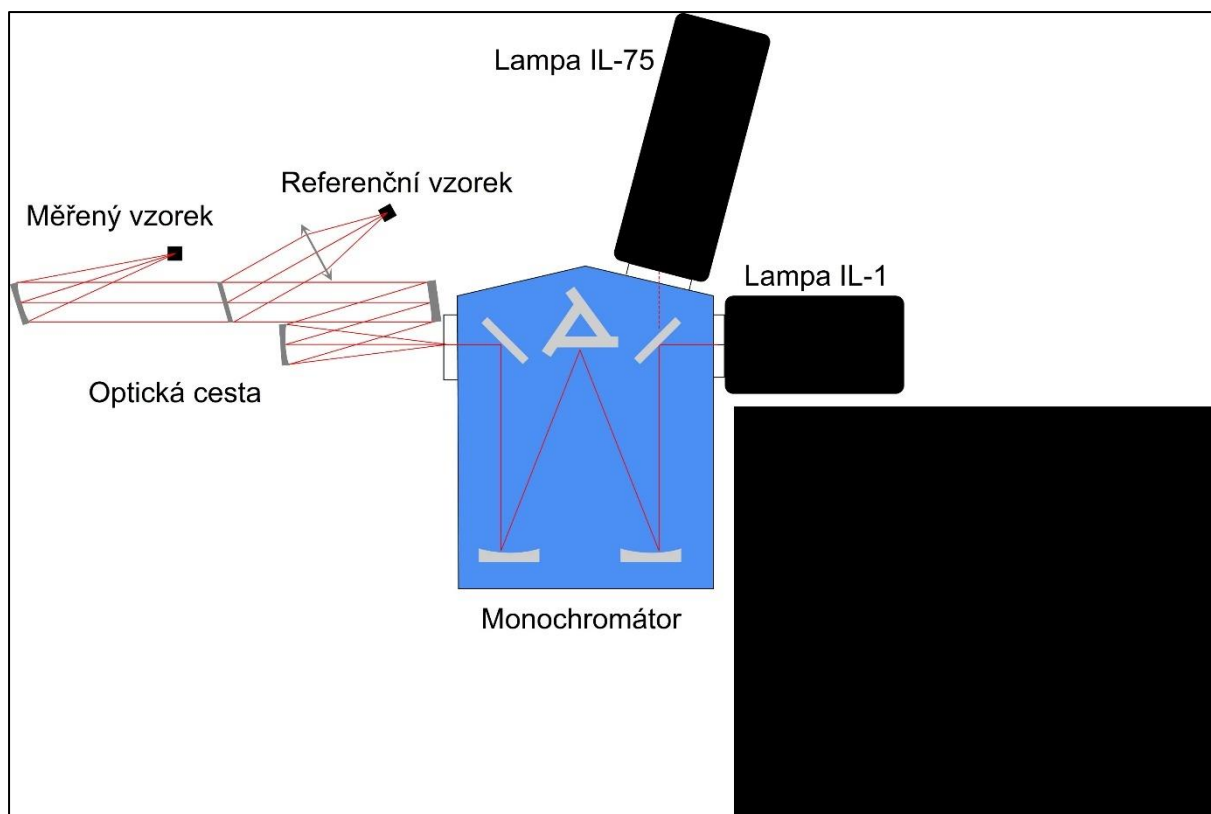
- Edmund Optics - rovinné zrcadlo, 50x50 mm, 1 ks
- Edmund Optics - duté zrcadlo, diametr 2", FL 8", 2 ks
- Edmund Optics - čočka, diametr 50mm, FL 100 mm, 1 ks
- Thorlabs - držák čočky, diametr 2", 1 ks
- Thorlabs - držák dutého zrcadla, diametr 2", 2 ks
- Thorlabs - držák rovinného zrcadla, 50x50 mm, 1 – 2 ks
- Thorlabs - Holder, výška 40 mm, 7 ks
- Thorlabs - Post Holder, výška 50 mm, 7 ks
- Thorlabs - Base, 7 ks

## 5.3 Sestavení aparatury

Návrh sestavení aparatury z jednotlivých komponentů je proveden s ohledem na dostupný prostor a možnou komfortní manipulaci s měřeným vzorkem. Přístroje mimo monochromátor a lampy jsou umístěny mimo prostor pracovní desky anti-vibračního stolu. Na pracovní desce je vyhrazen nutný prostor pro experiment, který nesouvisí přímo s touto aparaturou.

Komponenty aparatury jsou rozmístěny dle Obr. 5.3. Zdroje záření (halogenová a xenonová lampa) jsou připevněny k vstupním štěrbinám monochromátoru pomocí trubice s fokusační čočkou a se zářezem pro kolo chopperu. Výstupní štěrbinou monochromátoru je přivedeno záření na duté zrcadlo, které vytváří rovnoběžný svazek paprsků. Ten je díky vyosení dutého zrcadla přiveden na rovinné zrcadlo, které mění směr paprsků a přivádí je na dělič svazku. Dělič svazku část paprsků odráží na spojku, jež je koncentruje na referenční detektor. Neodražený paprsky prochází děličem svazku a dopadají na druhé duté zrcadlo, které je odráží a koncentruje na měřený vzorek.





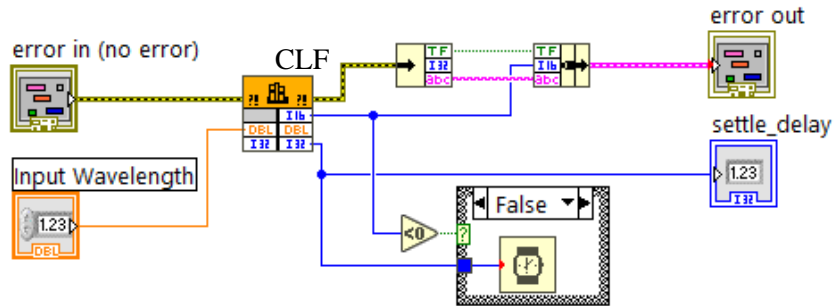
Obr. 5.3 - Rozmístění komponentů

## 5.4 Ovládání aparatury

Ovládání pomocí originálního softwaru firmy Bentham nebylo zcela funkční. Příjem signálu a nastavování jednotlivých vlnových délek monochromátoru se podařilo zprovoznit, ale spouštění skenu přes daný rozsah vlnových délek se nezdařilo. Problémy způsobovaly různě nakonfigurované systémové soubory. Proto bylo celé ovládání monochromátoru, příjmu signálu a zpracování naměřených hodnot naprogramováno v prostředí LabView. Jako základ pro programování a komunikaci programu s hardwarem byla využita DLL knihovna funkcí k monochromátoru.

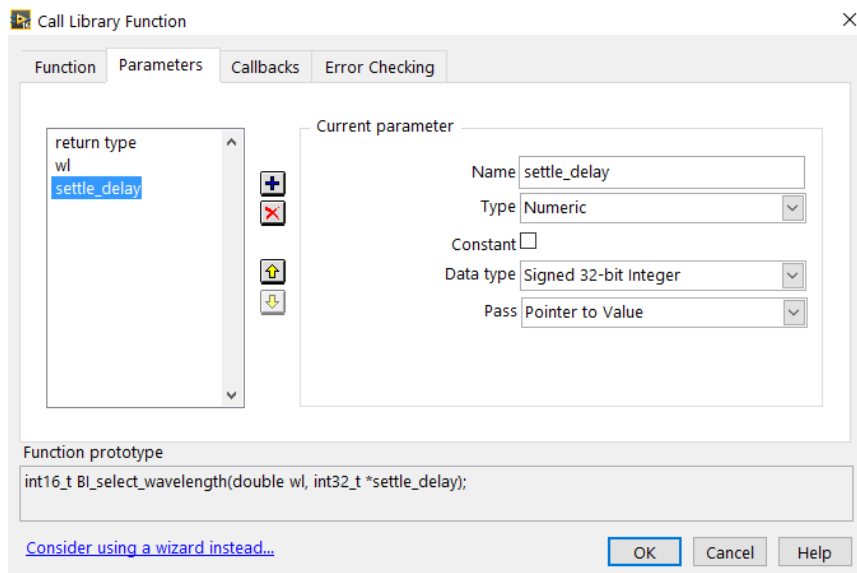
DLL knihovnu je možné v LabView implementovat pomocí funkce *Call Library Function*. Tato funkce načte knihovnu a vyvolá předdefinovanou funkci, která je uložena v knihovně. Nastavované parametry *Call Library Function* jsou název chtěné funkce, vstupní parametry a návratová hodnota. Důležité je správné nastavení datových typů jednotlivých parametrů. Nastavení proběhlo dle manuálu Bentham software development kit<sub>[10]</sub> (dále SDK).

Níže na Obr. 5.4 je jako příklad uvedeno blokové schéma důležité funkce *BI\_select\_wavelength*. Tato funkce na základě vstupního parametru, kterým je požadovaná vlnová délka, provede nastavení monochromátoru na požadovanou vlnovou délku. S touto akcí souvisí i nastavení filtrů a pozice SAM (swing away mirror – zrcadlo vybírající světelný zdroj).



Obr. 5.4 - BI\_select\_wavelength

Součástí funkce je vnořená funkce *Call Library Function* (označená CLF na obrázku Obr. 5.4). Nastavení *Call Library Function* probíhá pomocí dialogového okna na obrázku Obr. 5.5. CLF má jako vstupní parametr dle SDK (Obr. 5.6) požadovanou vlnovou délku a návratovou hodnotou je doporučená doba čekání (*settle\_delay*) před čtením měřených signálů. Tato doba respektuje čas potřebný k provedení změny vlnové délky. Pokud nenastane chyba, program čeká dle *settle\_delay*.



Obr. 5.5 - Call Library Function - BI\_select\_wavelength

## BI\_select\_wavelength

**Syntax** BI\_select\_wavelength( wavelength, delay )

**Description** Using the active group, this function performs the following operations:

- sends the monochromator to the specified wavelength,
- selects the filter for the specified wavelength,
- positions all SAMs according to the specified wavelength,
- sets all MVSSs according to the specified wavelength
- configures all amplifiers for the specified wavelength

and recommends a settle delay time before any readings are taken. It does not perform the delay itself.

**Return value** The return value indicates the result of the call:

BI\_OK - success  
BI\_error - failure

**Parameters** wavelength - wavelength to go to (nm)  
delay - recommended delay (ms) before taking readings

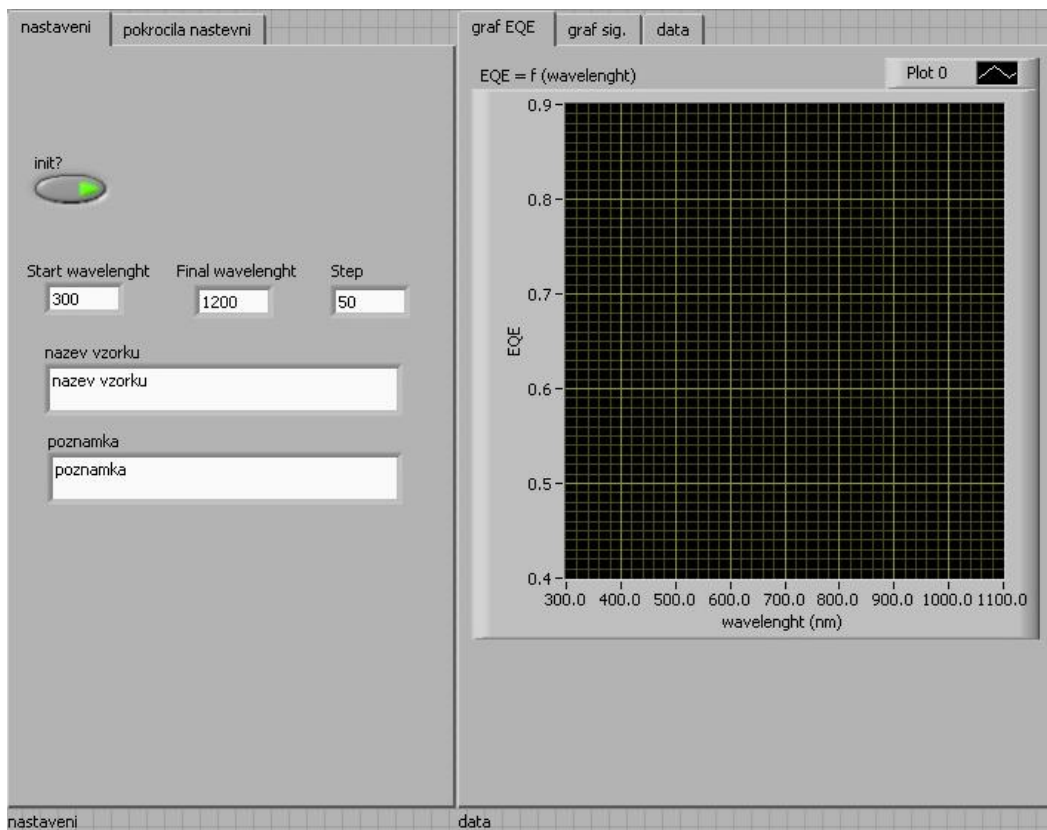
**C** int far pascal BI\_select\_wavelength( double wavelength,  
long far \*delay );

**Pascal** function BI\_select\_wavelength( wavelength : double;  
var delay : longint ) : integer;

**Visual Basic** Function BI\_select\_wavelength( ByVal wavelength As Double,  
delay As Long ) As Integer

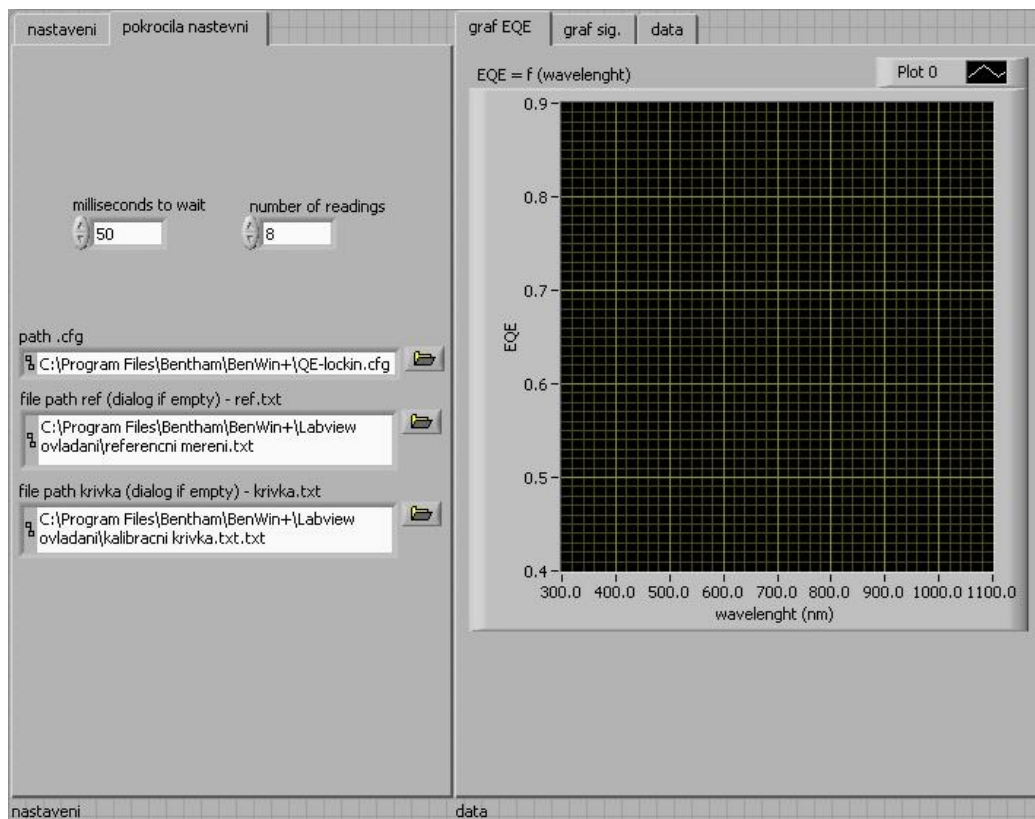
*Obr. 5.6 - SDK - BI\_select\_wavelength<sub>{10}</sub>*

Na Obr. 5.7 je hlavní panel, který slouží k základní obsluze programu pro měření externí kvantové účinnosti. Uživatel zde má možnost nastavení počáteční vlnové délky, konečné vlnové délky a kroku, se kterým sken probíhá. Dále se zde nacházejí políčka pro pojmenování měřeného vzorku a vložení poznámky, název a poznámka je uložena do souboru s naměřenými hodnotami.



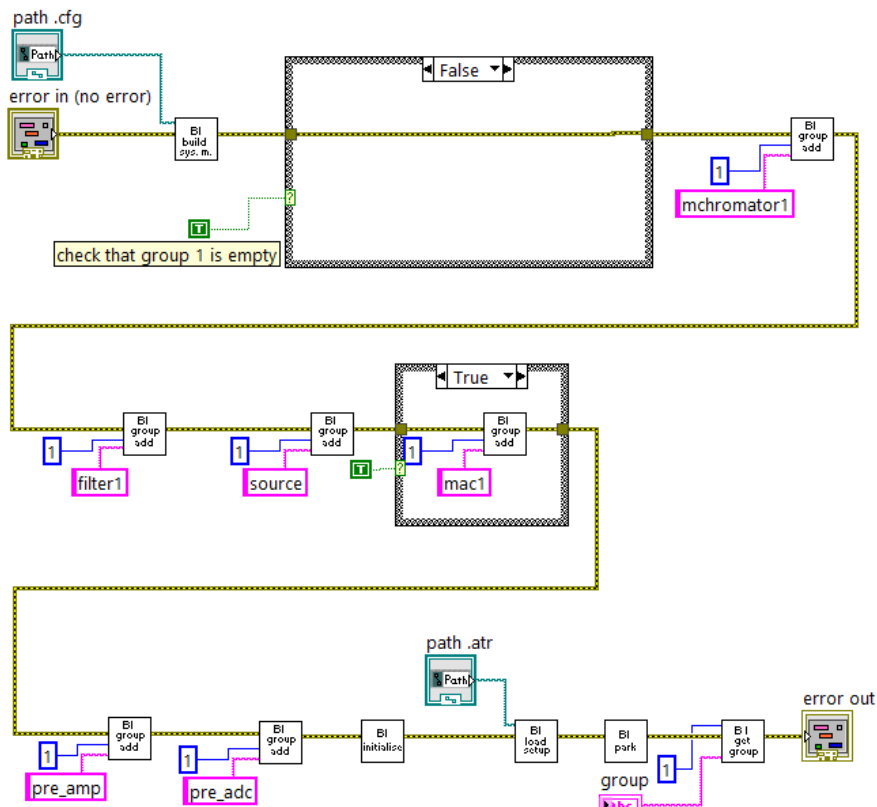
Obr. 5.7 - Hlavní panel

V záložce *pokročilá nastavení* (Obr. 5.8) je možné změnit čas čekání před načtením každé hodnoty a počet čtení hodnoty při jedné vlnové délce. Dále je možné nastavit cestu ke konfiguračnímu souboru, souboru s referenčním měřením a souboru, který obsahuje kalibrační křivku kalibrovaného detektoru. V pravé kartě jsou záložky *graf EQE*, *graf sig.* a *data*. Lze tedy vybrat zobrazení grafu externí kvantové účinnosti, grafu naměřeného signálu a výpisu naměřených dat v tabulce.



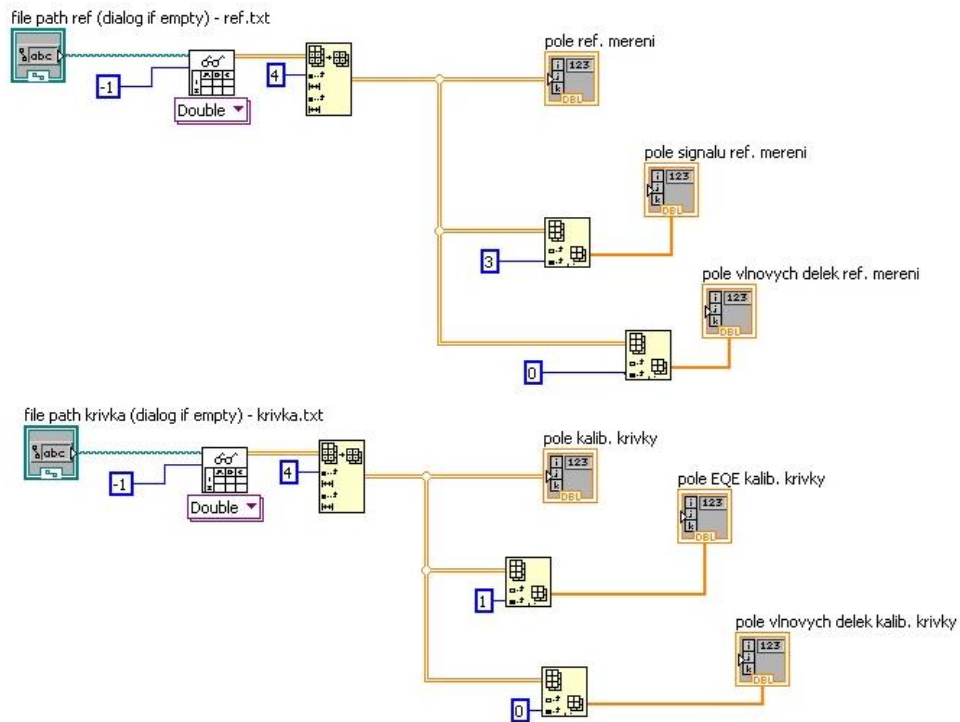
Obr. 5.8 - Hlavní panel - pokročilá nastavení

Hlavní panel v blokové podobě je přiložen (Příloha 1), ze kterého je vidět posloupnost akcí prováděných při spuštění měření. Pokud se jedná o první měření po spuštění programu, proběhne inicializace. Inicializace je spuštění a navázání komunikace programu s hardwarem, provede postupné volání funkcí dle schématu na Obr. 5.9.

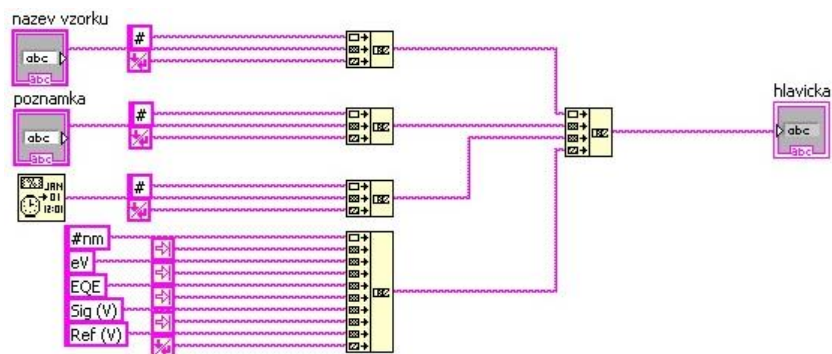


Obr. 5.9 - Inicializace systému

Paralelně probíhá načtení referenčních dat ze souborů „ref.txt” a „krivka.txt” (Obr. 5.10). Vytváří se nový soubor pro uchování naměřených hodnot, ve kterém je zapsána hlavička měření (Obr. 5.11). Do cyklu vstupují nastavené parametry měření a cyklus běží, dokud se aktuální vlnová délka nerovná konečné. Opakovaně jsou volané funkce pro hledání referenční hodnoty (Obr. 5.12) pro aktuální vlnovou délku, nastavení vlnové délky a čtení signálu, přepočet vlnové délky v nanometrech na energii v elektronvoltech, vytvoření pole s daty pro aktuální vlnovou délku a přidání tohoto pole do pole s daty z celého měření.



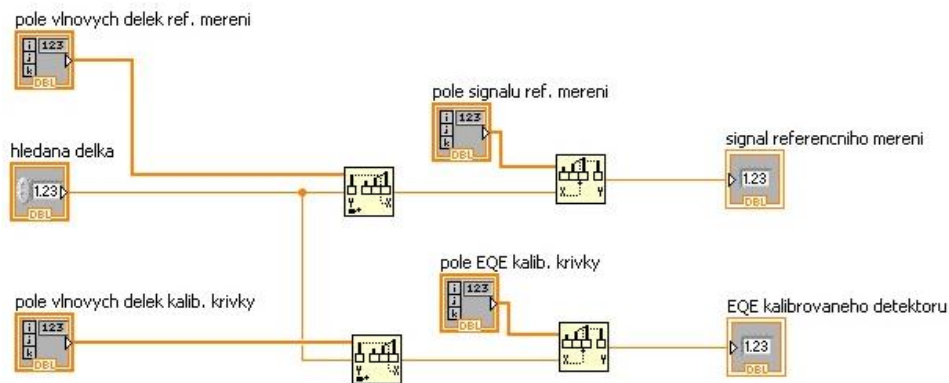
Obr. 5.10 - Načtení referenčních dat ze souborů



Obr. 5.11 - Příprava hlavičky souboru s naměřenými hodnotami

Příklad hlavička souboru s naměřenými daty:

```
#název vzorku
#poznámka
#17/04/2017 14:25:26
#nm    eV    EQE    Sig (V) Ref (V)
300    4.133  0.565  0.021  1
```

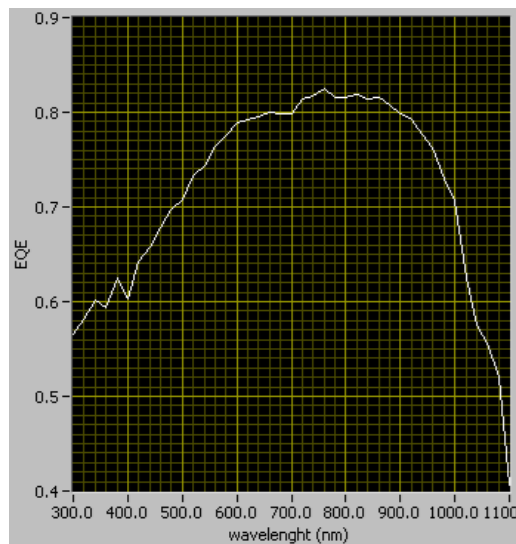


Obr. 5.12 - Hledání hodnot v referenčních datech

Kvantová účinnost vzorků se v programu vypočítává pomocí rovnice (5.1) na základě dat z referenčního měření s kalibrovaným detektorem. Signál, který byl naměřen kalibrovaným detektorem  $S_{ref}$ , je uložen v souboru „ref.txt“. Soubor „ref.txt“ obsahuje křivka externí kvantové účinnosti kalibrovaného detektoru  $EQE_{kalib}$ .

$$EQE_{vzorek} = \frac{S_{vzorek}}{S_{ref}} * EQE_{kalib} \quad (5.1)$$

Na je Obr. 5.13 vidět naměřený průběh  $EQE$  v závislosti na vlnové délce a na obrázku 20 je průběh naměřeného signálu v závislosti na vlnové délce. Měření proběhlo v rozsahu vlnových délek 300 až 1100 nanometrů s krokem 20 nanometrů. Křivka kvantové účinnosti má přibližně předpokládaný tvar. Plynulost křivky může být zlepšena zvolením menšího kroku, zmenšením kroku kalibrační křivky či vyšším počtem čtení.



Obr. 5.13 - Průběh EQE



# Kapitola 6 Implementace digitálního lock-in analyzátoru

Implementace digitálního lock-in analyzátoru byla provedena na aparatuře Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky. V rámci práce byl využit komerční softwarový lock-in analyzátor a A/D převodník signálu jako náhrada části předchozí aparatury, která se skládala ze 3 nezávislých analogových lock-in zesilovačů a předzesilovačů. Na této aparatuře bylo provedeno měření ze 3 detektorů, které signály odpovídaly referenci, absorpci a transmisi.

## 6.1 Popis aparatury

### 6.1.1 A/D převodník

Pro převod analogového signálu na digitální signál, který se dále analyzuje pomocí softwaru, byla využita 4 kanálová převodníková karta od firmy National Instruments PXIe-4464. Tato karta je vložena do PXIe-1073 chassis. Pro komunikaci PXIe-1073 s počítačem se využívá PCI Express x1 karty, která je zasunuta do základní desky počítače.

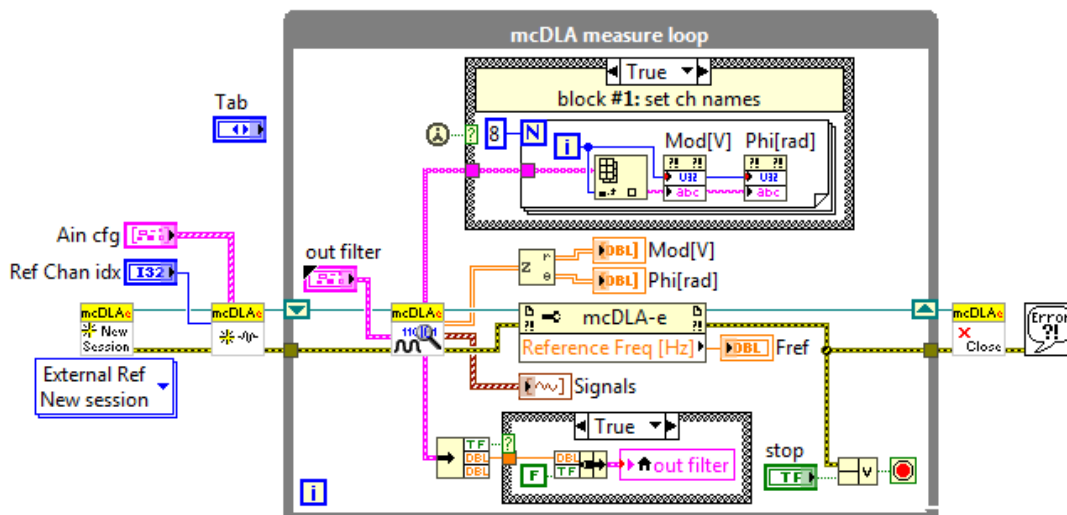
Převodníková karta umožňuje převod signálu současně ze 4 kanálů, u kterých lze programově a nezávisle na sobě nastavit 6 různých vstupních rozsahů. Možné nastavitelné rozsahy karty jsou vypsány Tab. 1. Výsledek převodu je s 24bitovým rozlišením, což odpovídá 16 777 216 hladin. Karta disponuje anti-aliasingovým filtrem, který se automaticky upravuje dle nastavené vzorkovací frekvence v rozsahu 0,1 až 204,8 tisíc vzorků za sekundu.

Gain [dB]	$U_{pk}$ [V]
30	$\pm 0,316$
20	$\pm 1$
10	$\pm 3,16$
0	$\pm 10$
-10	$\pm 31,6$
-20	$\pm 42,4$

Tab. 1 - Rozsahy a zesílení PXIe-4464

### 6.1.2 Digitální lock-in analyzátor

Lock-in analýzu signálu zajišťuje komerční software Multiple-channel Digital Lock-in Analyzer 6,1 (dále mcDLA) od společnosti sci-consulting. Software mcDLA umožňuje současnou lock-in analýzu až 32 kanálů. Skládá se ze 4 základních bloků: *mcDLA Create Session*, *mcDLA Initialize*, *mcDLA Analyze* a *mcDLA Close Session*. Posloupnost těchto bloků je ukázána na obrázku Obr. 6.1 se základním příkladem jejich použití při měření.



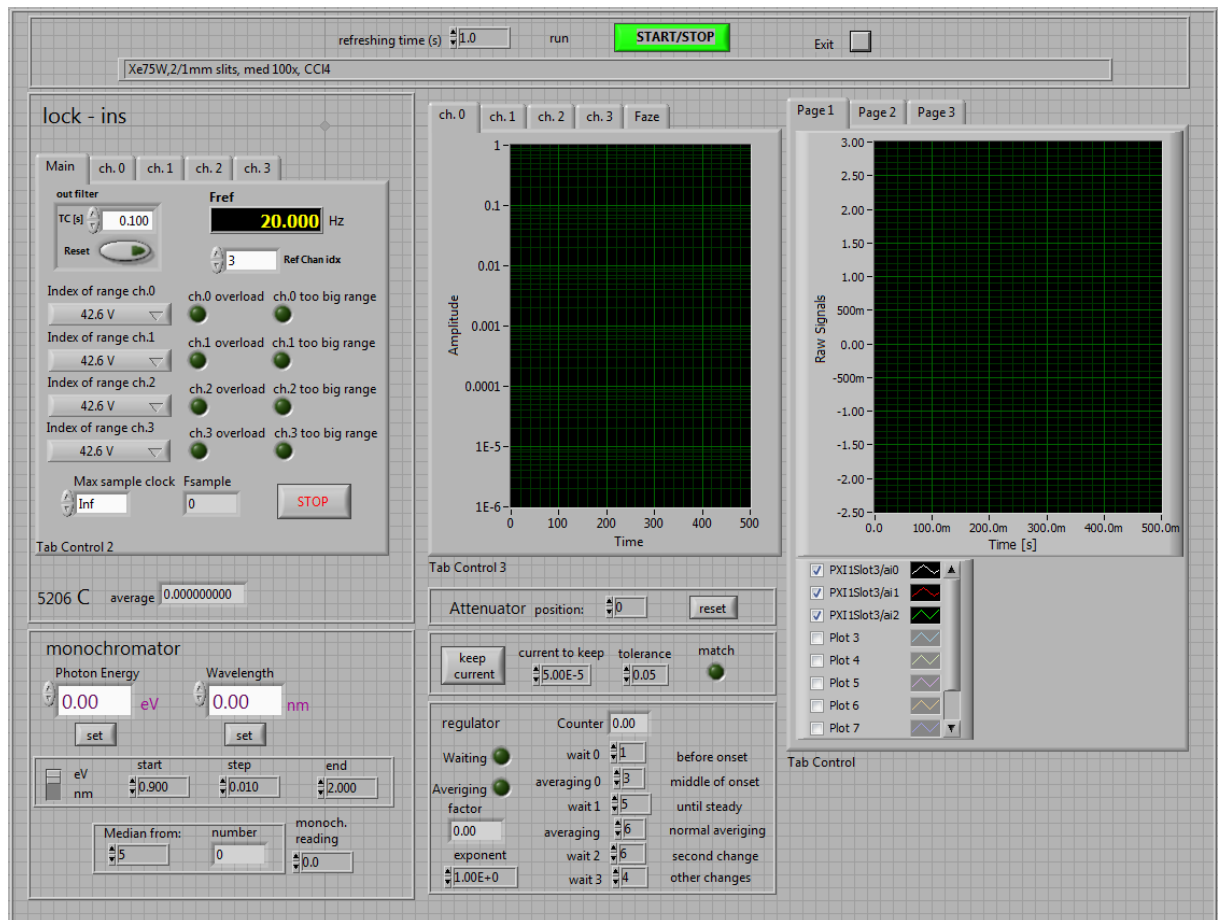
Obr. 6.1 - mcDLA

Z obrázku je patrné, že do druhého bloku *mcDLA Initialize* vstupuje informace *Ain cfg*, která obsahuje nastavení analogových kanálů A/D převodníku, zvolené názvy a fyzické adresy kanálů. Dále vstupuje informace o indexu kanálu s referenční frekvencí pro lock-in analýzu. Následuje měřící smyčka programu, která běží, dokud měření není uživatelem ukončeno. Smyčka obsahuje blok *mcDLA Analyze*, jež má za výstup dvě pole naměřených hodnot v daném cyklu: *Mod[V]* a *Phi[rad]*. První jmenované obsahuje hodnoty amplitud všech kanálů odpovídajících rovnici (4.9), druhé pole zas informace o fázových posunech dle (4.10). Pomocí funkce *Property node* lze z *mcDLA session* získat informaci o naměřené referenční frekvenci. Naměřené hodnoty jsou zobrazovány v grafu. Smyčka probíhá, dokud není zmáčknuté tlačítko *stop* nebo nedojde k chybě. Následuje *mcDLA Close Session*. Tento blok ukončuje relaci a čistí data spojená s během relace.

## 6.2 Popis programu

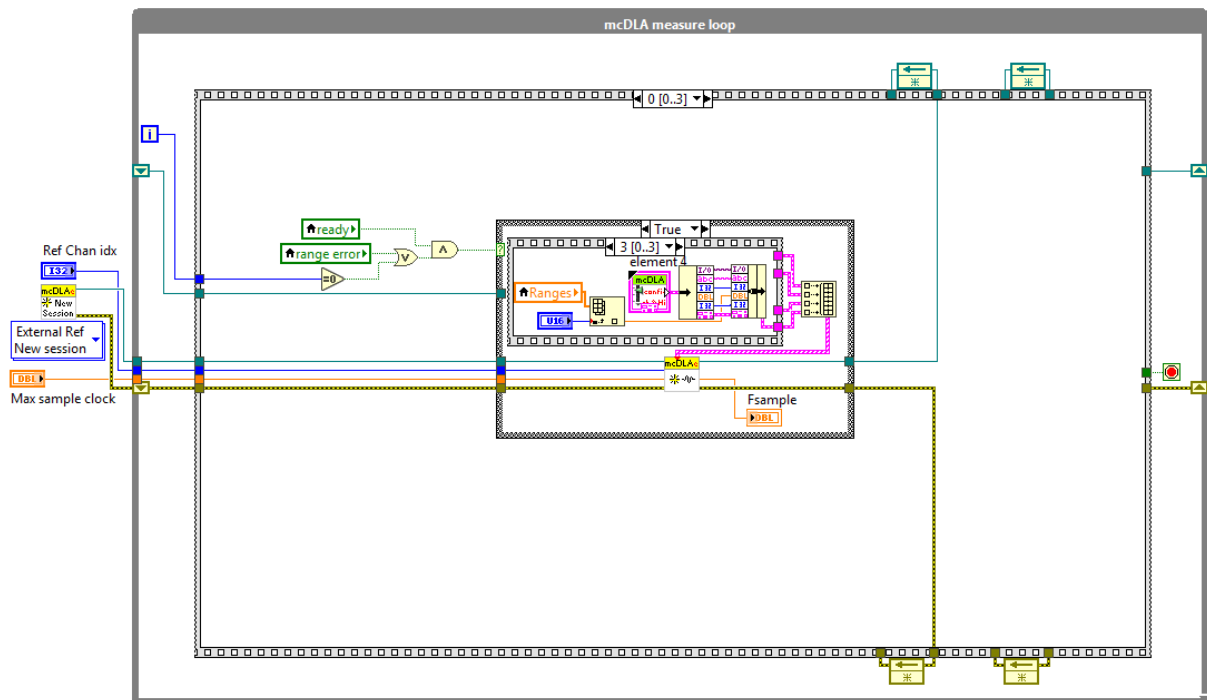
Digitální lock-in analyzátor byl implementován do programu, který využíval 3 samostatné analogové lock-in zesilovače. Dále program obsluhuje monochromátor, filtrová kola a šedé filtry. Komunikace s analogovými lock-in zesilovači byla nahrazena měřící smyčkou mcDLA doplněnou a upravenou o automatickou kontrolu využití a změny rozsahu A/D převodníku.

Hlavní panel programu ukazuje Obr. 6.2. V levé části panelu se nachází obsluha rozsahů převodníku, nastavení časové konstanty a index kanálu referenčního signálu. Dále pak indikátor detekované frekvence referenčního signálu a indikátory využití rozsahu. Na dalších kartách se nastavují fyzické adresy kanálů a názvy kanálů. V pravé části se nachází dva panely s grafy, levá skupina grafů zobrazuje signál při spuštění měření tlačítkem *START/STOP* a pravá skupina grafy, které zobrazují data přímo z mcDLA. Pokud je spuštěné měření, program nastavuje vlnové délky z daného rozsahu, kontroluje rozsah všech kanálů. Je-li dokončené nastavení vlnové délky a rozsahy jsou v pořádku, aplikuje na naměřená data medián a ten zapisuje a zobrazuje.



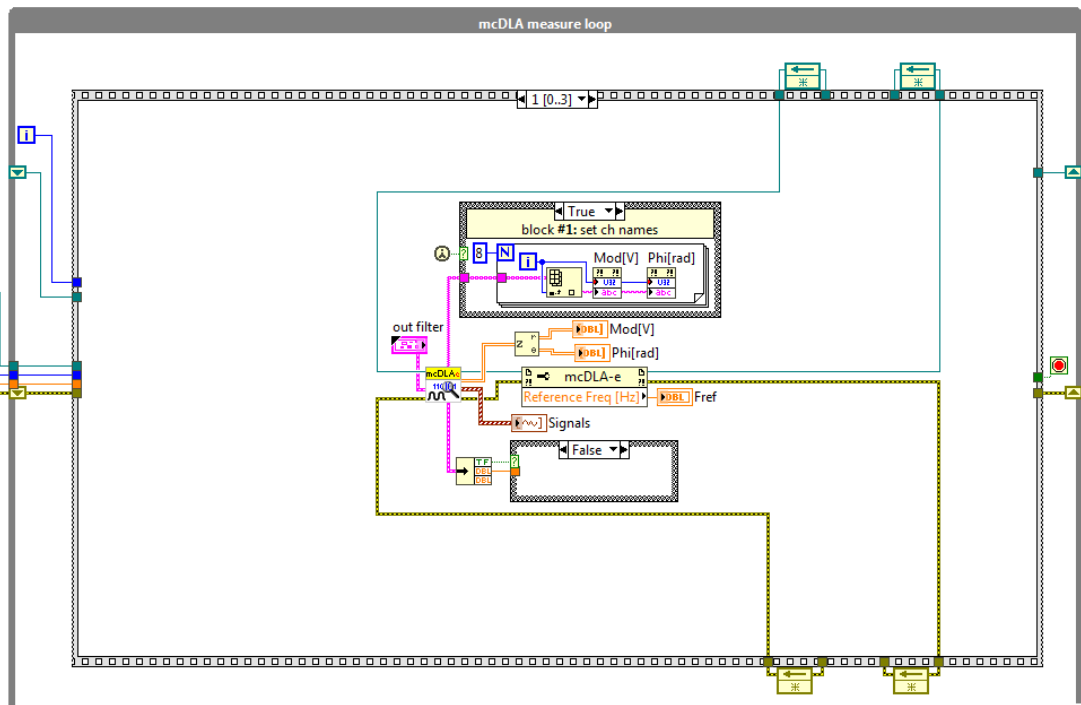
Obr. 6.2 - Hlavní panel

Program se skládá ze dvou paralelně běžících sekvenčních částí. V první části běží sekvenčně mcDLA s kontrolou rozsahu převodníku. První část sekvence (Obr. 6.3) provádí inicializaci mcDLA, která proběhne, pokud se jedná o první volání sekvence nebo pokud došlo k chybě rozsahu.



Obr. 6.3 - mcDLA - Inicializace

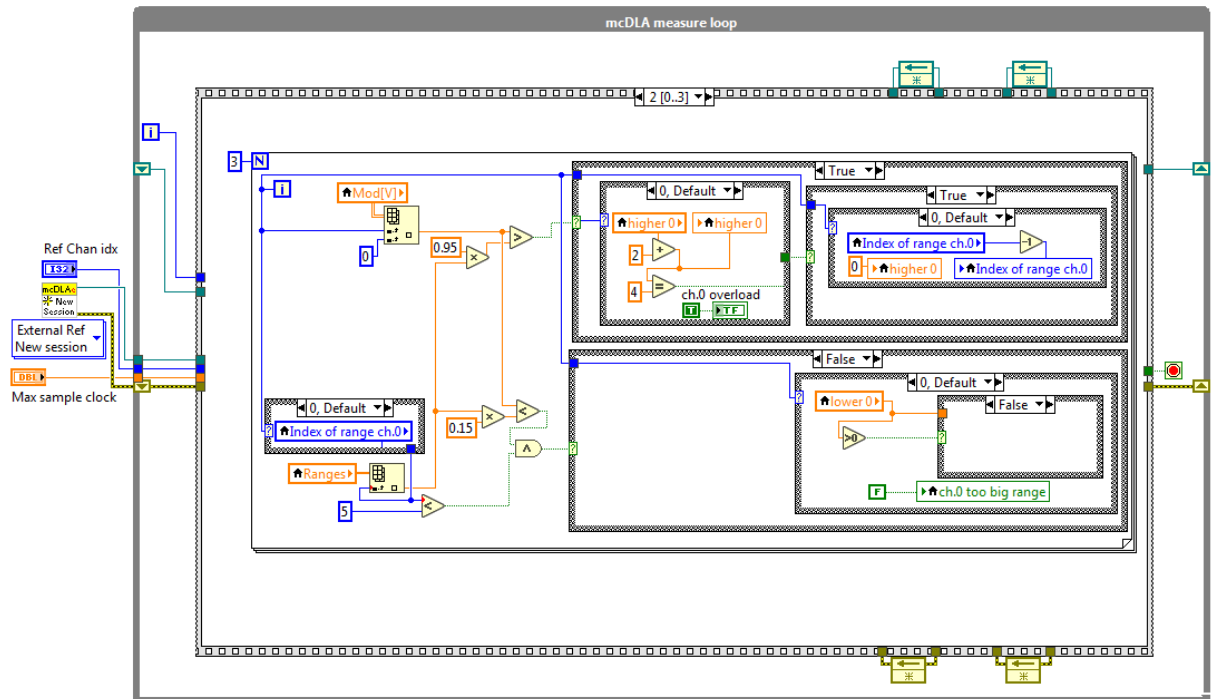
Druhá část sekvence (Obr. 6.4) přistupuje ke kanálům A/D převodníku. Dále provádí analýzu signálu a naměřená data ukládá do polí *Mod[V]* a *Phi[rad]*. Zobrazuje informaci o detekované frekvenci a průběh naměřených dat v grafické podobě.



Obr. 6.4 - mcDLA - Analýza

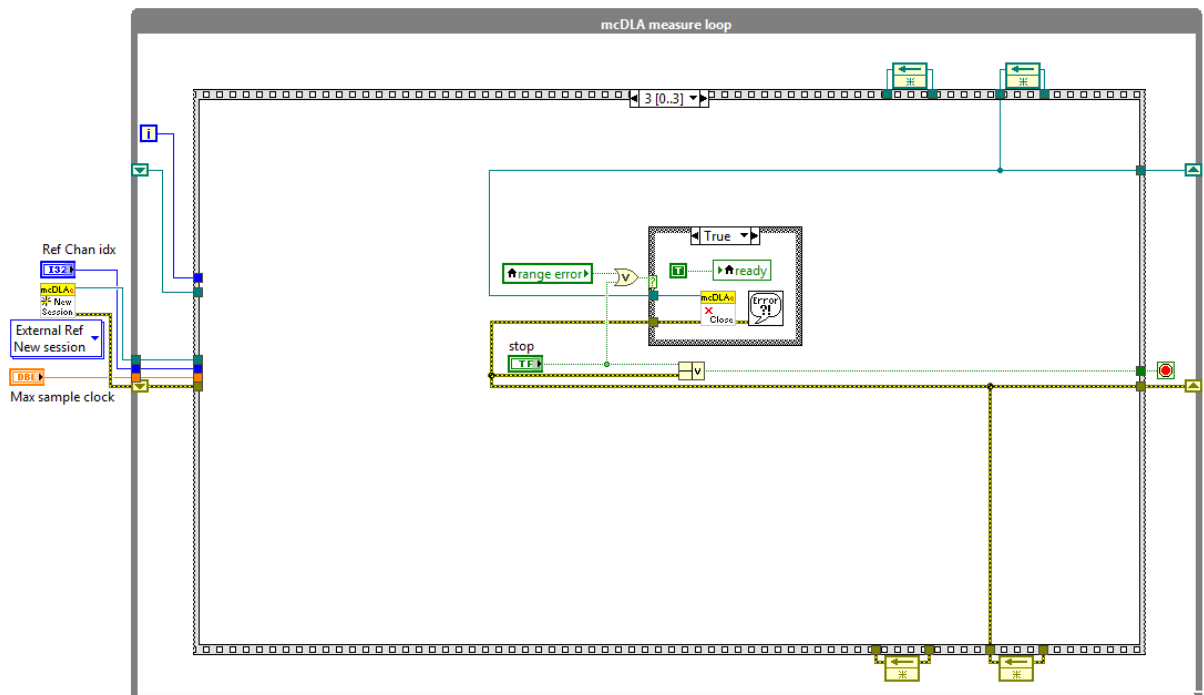
Třetí část sekvence (Obr. 6.5) kontroluje využití rozsahů převodníku. Naměřená data se porovnávají s nastaveným rozsahem daného kanálu. Při překročení rozsahu dochází k inkrementaci proměnné, která zaznamenává počet překročení rozsahu, naopak při nepřekročení rozsahu je

hodnota proměnné snižována. Nastane-li opakované překročení rozsahu dochází k vytvoření požadavku na změnu rozsahu.



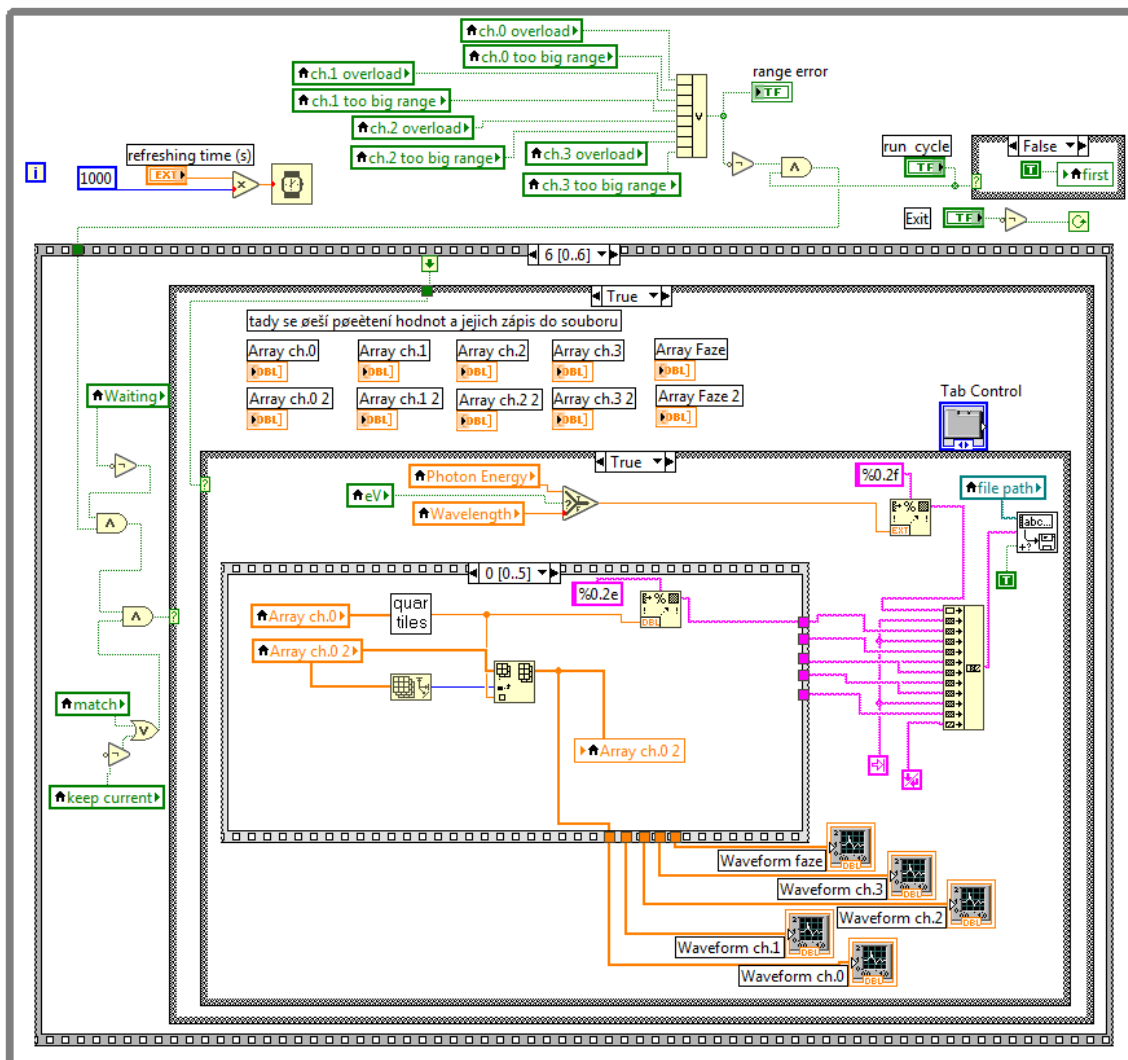
Obr. 6.5 - mcDLA - kontrola rozsahu

Při požadavku na změnu rozsahu nebo na zastavení běhu smyčky mcDLA proběhne ukončení relace. Ukončení relace se realizuje v poslední části sekce (Obr. 6.6).



Obr. 6.6 - mcDLA – ukončení

Paralelně běžící sekvence, zajišťuje komunikaci a obsluhu monochromátoru, filtrů a zpracování dat mcDLA. Data z mcDLA, která nebyla ovlivněna chybou rozsahu, se opakovaně načítají a určuje se z nich medián (Obr. 6.7). Takto zpracovaná data se zobrazují a ukládají do textového souboru.



Obr. 6.7 - Zázpis a zobrazení naměřených dat

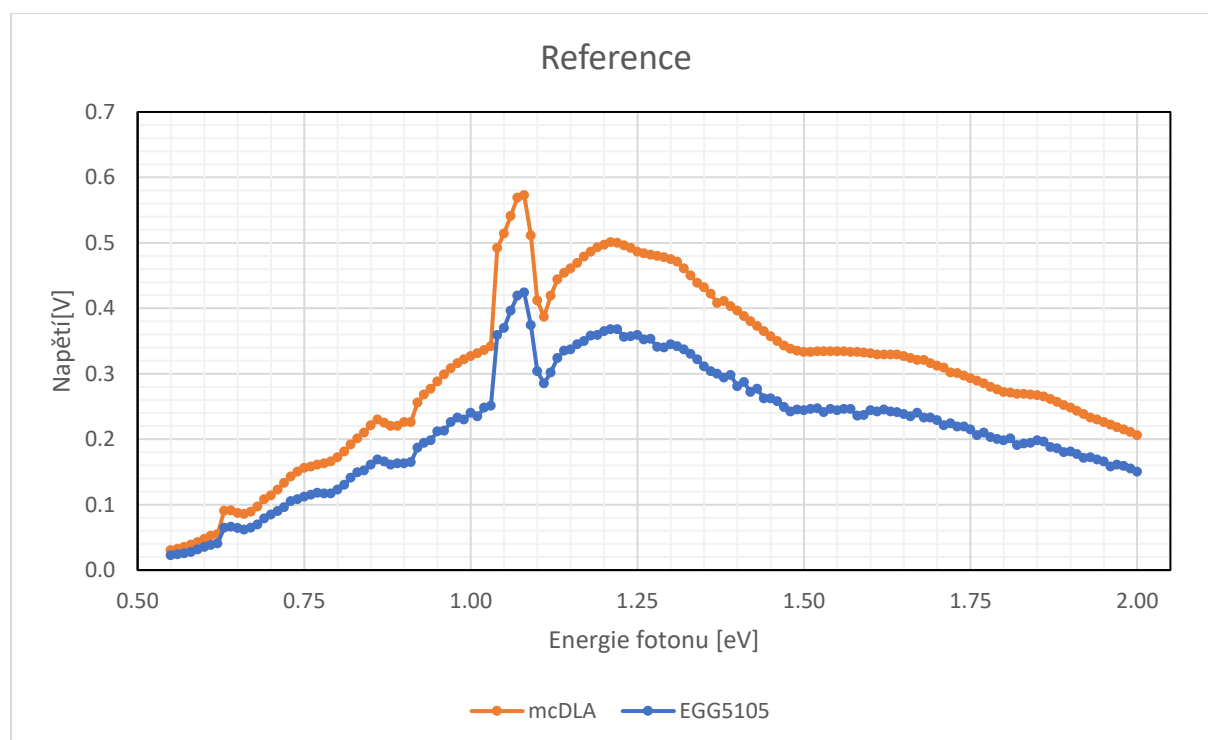
### 6.3 Porovnání analogového a digitálního lock-in analyzátoru

Na aparatuře s implementovaným A/D převodníkem s digitálním lock-in analyzátoem bylo provedeno měření 210 nm tlusté vrstvy amorfního křemíku na skle. Vzorek byl opatřen rovnoběžnými kontakty s mezerou 1 mm. Na vzorek bylo přivedeno předpětí 20 V. Měření bylo provedeno pro energie fotonu v intervalu 0,55 eV (2254 nm) po 2 eV (620 nm). Zaznamenáván byl signál z referenčního detektoru, signál úměrný fotoproudu procházejícího vzorkem a transmissi. Stejný vzorek byl poté proměřen i s využitím předcházejících analogových lock-in zesilovačů. Signál úměrný fotoproudu byl při druhém měření přivedený na analogový lock-in zesilovač EG&G 5206. U obou lock-in analyzátořů byla nastavena časová konstanta 1 sekunda a proud nakrátko vzorku byl v obou případech zesílen poměrem 20 mA/V. Počet opakování čtení pro určení

mediánu byl nastaven na pět. Průběh referenčního signálu a signálu úměrného transmissi byl při měření s analogovými lock-in zesilovači detekován přístrojem EG&G 5105.

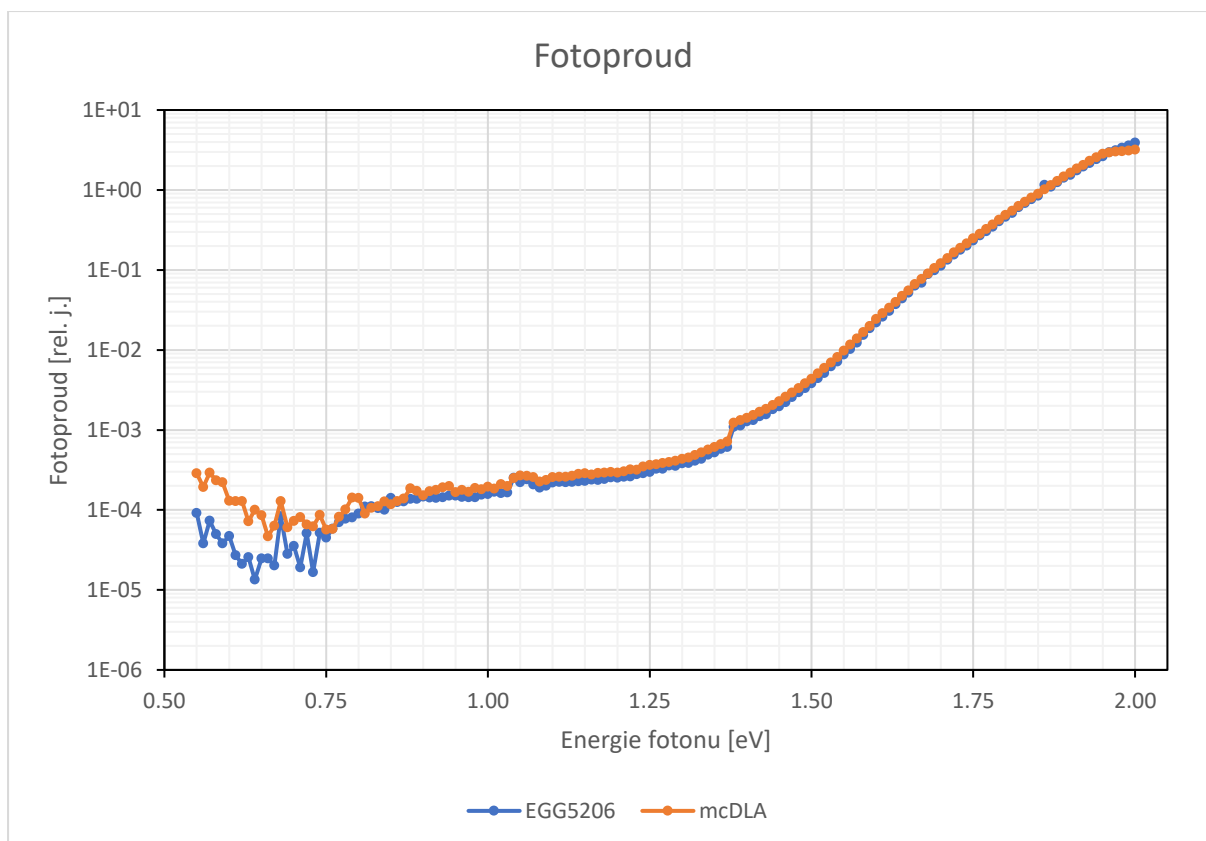
Naměřená data byla graficky zpracována. Naměřený signál byl normován signálem referenčního detektoru na bázi PbS, jehož odezva je téměř nezávislá na vlnové délce. Tím byl minimalizován vliv proměnné intenzity záření dopadajícího na měřený vzorek. Pro přesné měření je potřeba kalibrace kalibračním detektorem umístěným na pozici vzorku.

Naměřené průběhy popisují následující grafy. Průběh naměřeného napětí na referenčním detektoru popisuje Obr. 6.8. Z grafu je patrné, že maximální intenzita záření (kromě anomálních skoků) byla v oblasti 1,2 eV (1030 nm). Na obě strany intenzita značně klesá, zejména s klesající energií fotonu (rostoucí vlnovou délkou). Dále je vidět, že A/D převodník dává celkově mírně vyšší signál než lock-in analyzátor.



Obr. 6.8 - Reference

Průběhy fotoproudu jsou zobrazeny na Obr. 6.9. Za určitých podmínek je fotoproud úměrný optické absorpci vrstvy. Optická absorpce narůstá o mnoho řádů v oblasti překročení energie zakázaného pásu polovodiče, který se pro amorfni křemík pohybuje v oblasti kolem 1,7 eV. Z grafu je patrná hranice šumu měření, která se nachází přibližně v 0,8 eV (1550 nm). Pro nižší energie (delší vlnové délky) už měříme signál, který neodpovídá předpokládanému tvaru křivky a není plynulý. Signál dokonce roste, což je způsobené tak nízkým měřeným signálem, že lock-in zesilovač začíná zesilovat okolní šum blízké frekvence. Aplikované zesílení proudu na krátko bylo  $20 \text{ mA}\cdot\text{V}^{-1}$ .

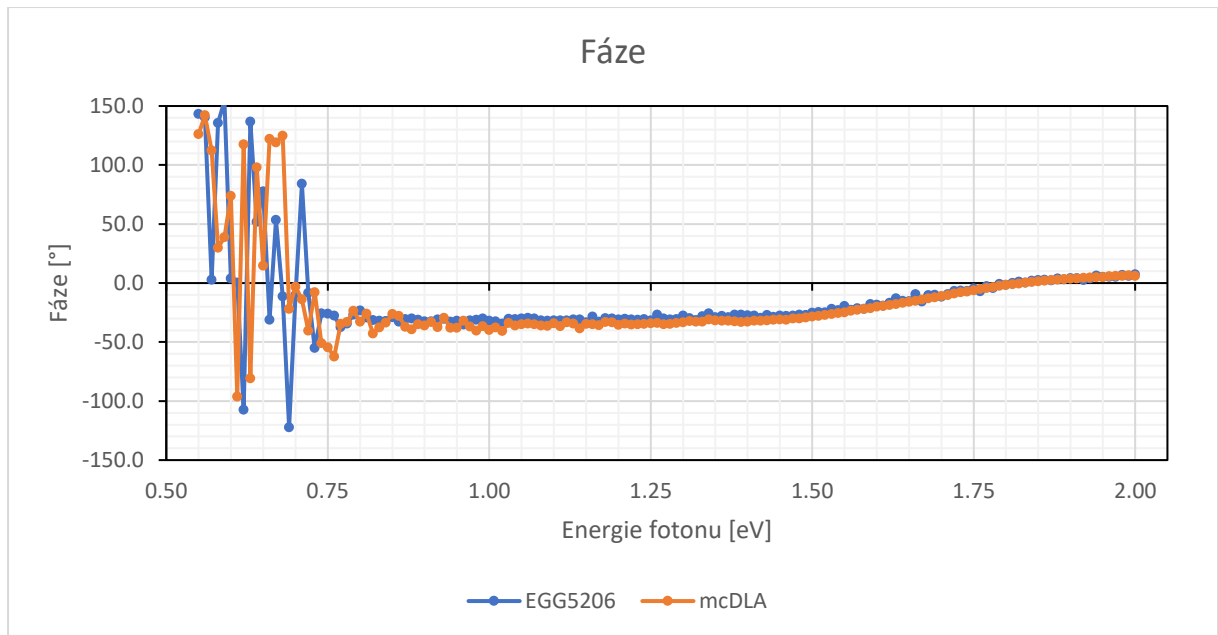


Obr. 6.9 - Fotoproud

Průběh naměřený analogovým lock-in zesilovačem není příliš odlišný od dat získaných z mcDLA. Rozdílnost se nachází až v oblasti nízké energie fotonu (0,55 až 0,8 eV). V této oblasti jsou oba průběhy nepřesné. Odstup maximálního naměřeného signálu od šumu odpovídá 90 dB.

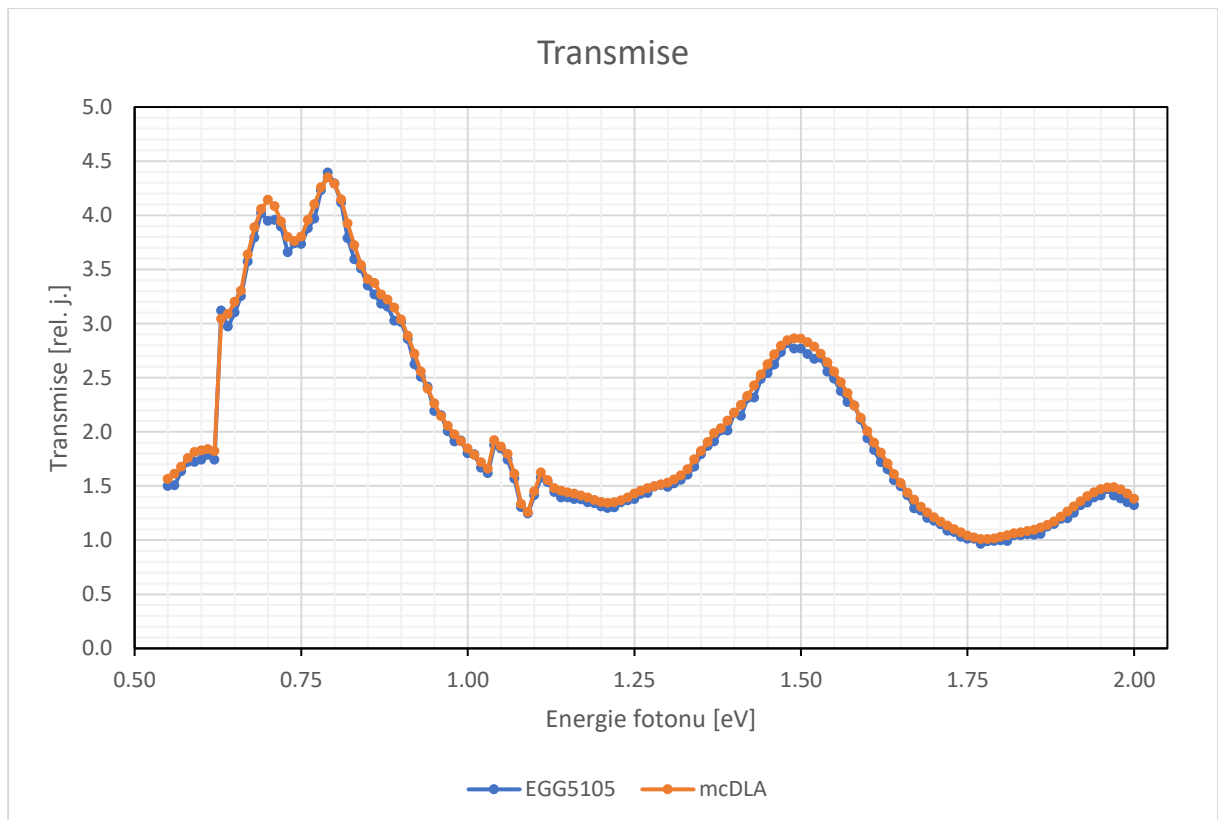
Stejný jev pozorován na Obr. 6.10, kde se nachází závislost detekovaného fázového posunu signálu s referenční frekvencí a signálu vzorku. Fázový posun se skokově mění a nabývá velkých hodnot, což vypovídá o chybě měření. Chyby fáze je pozorovány u obou přístrojů ve stejné oblasti. Na základě tohoto měření je možné konstatovat, že pomocí mcDLA lze plně nahradit předcházející analogový lock-in zesilovač EGG 5206.





Obr. 6.10 - Fáze

Průběh transmise v závislosti na energii fotonu ukazuje Obr. 6.11. Z grafu je patrný výskyt interferenčních maxim v oblasti 0,75 a 1,5 eV (1653 a 827 nm). Směrem k vyšším energiím transmise klesá vlivem mezipásové absorpce polovodiče. Naměřené průběhy oběma přístroji jsou téměř totožné. Pro přesnější a absolutní měření transmise by bylo opět potřeba provést dodatečné kalibrační měření.



Obr. 6.11 - Transmise

## Kapitola 7 Závěr

Tato bakalářská práce zabývající se optimalizací optického spektrometru pomocí softwarového lock-in analyzátoru je členěna do šesti kapitol, které jsou shrnuty v následujícím odstavci. Po prvních čtyřech teoretických kapitolách následuje praktická část obsahující 2 kapitoly.

V první kapitole jsou představeny cíle práce, kterými jsou: sestavit aparaturu pro měření externí kvantové účinnosti, umožnit měření na této aparatuře pomocí softwaru, dále pak nahradit analogový lock-in zesilovač A/D převodníkem s digitálním lock-in analyzátozem a porovnat vlastnosti naměřeného signálů. Druhá kapitola je věnována optickým prvkům, které jsou spojené se stavbou aparatury pro měření externí kvantové účinnosti vzorků fotovoltaických článků. Realizace stavby této aparatury proběhla na Katedře elektrotechnologie Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Aparatura je sestavena ze zdrojů záření, monochromátoru, soustavy zrcadel a děliče svazku. Pro detekci signálu se zde využívá jednofázového analogového lock-in zesilovače, který lze pro zlepšení funkce nahradit A/D převodníkem a digitálním lock-in analyzátozem popsaným v kapitole šesté. Třetí kapitola popisuje zdroje šumu, se kterými je možné se setkat při měření signálu v laboratoři a čím jsou způsobené. Následuje kapitola věnována odvození principu lock-in analýzy signálu.

Pátá kapitola popisuje použité komponenty měřící aparatury a jejich uspořádání. Předposlední kapitola poté představuje multikanálový digitální lock-in zesilovač. Ukazuje příklad jeho použití při měření a implementaci do upraveného programu pro měření a obsluhu aparatury v laboratoři optických materiálů Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR. S využitím komerčního digitálního lock-in analyzátoru mcDLA a A/D převodníkové karty PXIe-4464 od firmy National Instruments bylo provedeno proměření vzorku fotovoltaického článku a-Si layer 129\_t3a.

Průběhy naměřených hodnot signálu úměrného proudu nakrátko fotovoltaického článku byly porovnány s průběhy zaznamenanými dříve využívaným analogovým lock-in zesilovačem EG&G 5206. Signál úměrný transmisi článku a napětí na referenčním detektoru byl porovnán s analogovým lock-in zesilovačem EG&G 5105. Na základě porovnání signálů lze konstatovat, že pomocí A/D převodníku s digitálním lock-in analyzátozem lze dostatečně kvalitně a komfortně nahradit drahé analogové lock-in zesilovače. Naprogramovanou měřící smyčku obsluhující převodník a využívající mcDLA lze aplikovat i na aparaturu měření kvantové účinnosti.

V bakalářské práci lze dále pokračovat právě implementací zmíněného A/D převodníku s digitálním lock-in analyzátozem pro měření kvantové účinnosti.

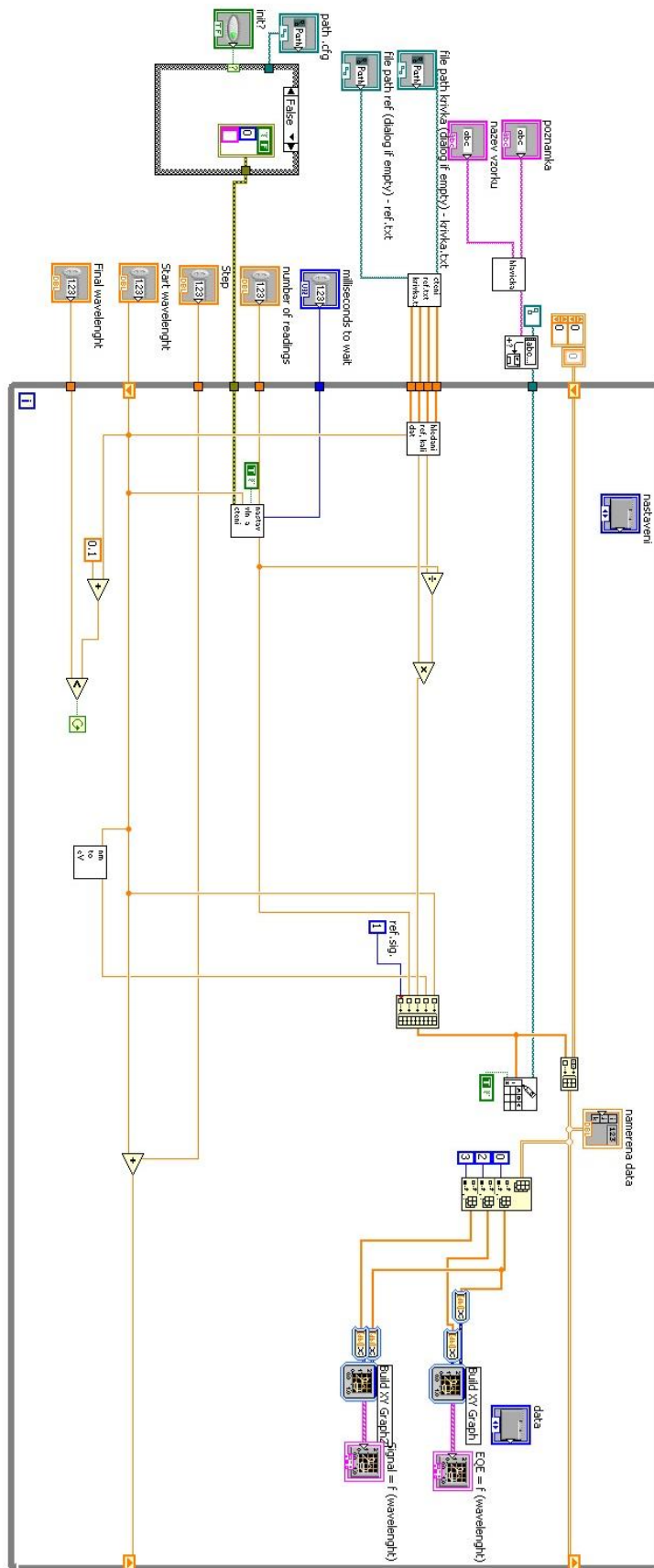
# Zdroje

- [1] Manuály komponent National Instruments [online]. [cit. 2016-05-15] Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376165b.pdf>
- [2] ABOUT LIAs Princip lock-in analýzy signálu [online]. [cit. 2016-05-15] Dostupné z: <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>
- [3] Článek: P. Kromer, R. Robinett, R. Bengtson, C. Hays, *PC-Based Digital Lock-In Detection of Small Signals in the Presence of Noise*
- [4] Kniha: A. Platil, P. Ripka, *Senzory a převodníky*, Vydavatelství ČVUT v Praze 2004
- [5] Článek: FRIJNTS, Tim, Sven KÜHNAPFEL, Sven RING, et al. Analysis of photo-current potentials and losses in thin film crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* [online]. 2015 [cit. 2017-01-24].
- [6] BENTHAM [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.bentham.co.uk/il1.htm>
- [7] BENTHAM [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.bentham.co.uk/il75e.htm>
- [8] HORIBA SCIENTIFIC [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.horiba.com/scientific/products/optics-tutorial/throughput-etendue>
- [9] Kniha: MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 978-80-246-2246-0.
- [10] BENTHAM [online]. [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: <http://support.bentham.co.uk/support/solutions/articles/5000615653-sdk-manual>

# Seznam příloh

Příloha 1 - Hlavní panel v blokové podobě .....	45
---	----

# Přílohy



Příloha 1 - Hlavní panel v blokové podobě