

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Filip Rozsypal



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SENZOR NA BÁZI OPTOVLÁKNOVÉHO INTERFEROMETRU

SENSOR BASED ON A FIBER OPTIC INTERFEROMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Rozsypal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Čučka

BRNO 2019



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Filip Rozsypal

ID: 174390

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Senzor na bázi optovláknového interferometru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku optovláknového Michelsonova interferometru. Zaměřte se především na typ využívající coupler 3x3. Vytvořte simulaci v programu Matlab. Navrhněte a sestavte měřicí pracoviště Michelsonova interferometru. Pracoviště bude schopné měřit vibraci, která bude působit na optické vlákno ramene interferometru a lokalizovat vibraci s vysokou přesností.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] STEEL, W. H. Interferometry. 2nd ed., 1st paperback ed. New York: Cambridge University Press, 1983. ISBN 0521311624.

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Milan Čučka

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, 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

Diplomová práce se zabývá porovnáním couplerů 2x2 a 3x3. Dále je zde probrána problematika otovláknového Michelsonova interferometru a jeho využití jako senzoru. Tento senzor je schopný detekovat velmi kvalitně vibrace. Obsahem části práce jsou také simulace s využitím 3x3 coupleru, jako senzoru vibrací a lokalizace vibrace na optickém vláknu s použitím Michelsonova a Mach-Zehnderova interferometru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Coupler, coupler 3x3, Michelsonův interferometr, senzor, simulace MatLab, měření vibrací, porovnání couplerů 2x2 a 3x3, lokalizace vibrací.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with comparison of 2x2 and 3x3 couplers. There is also description of issue of the Michelson interferometer and its use as a sensor. This sensor is very good at detecting vibrations. Part of the work is description of simulation of Michelson interferometer with 3x3 coupler as vibration sensor and localization of vibration on optical fiber by Michelson and Mach-Zehnder interferometer.

KEYWORDS

Coupler, coupler 3x3, Michelson interferometer, sensor, MatLab simulation, measurement of vibrations, comparing 2x2 and 3x3 couplers, localization of vibration.

ROZSYPAL, Filip. *Senzor na bázi optovláknového interferometru*. Brno, Rok, 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Milan Čučka

PROHLÁŠENÍ

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

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Čučkovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také svým rodičům a všem, kteří mě ve studiu podporovali a pomáhali mi.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Senzory	12
1.1 Senzor na bázi Michelsonova interferometru	13
1.2 Senzor na bázi Mach-Zehnderova interferometru	14
2 Couplery	15
2.1 Coupler 2x2	15
2.2 Coupler 3x3	17
2.2.1 Technologie výroby	17
2.2.2 Výpočty pro coupler 3x3	19
2.2.3 Přesnosti couplerů 3x3	19
2.3 Porovnání couplerů 3x3 a 2x2	20
3 Zapojení a simulace pro měření vibrací	21
3.1 Simulace zapojení	22
3.2 Reálné zapojení	25
3.2.1 Měření pomocí osciloskopu	25
3.2.2 Měření pomocí Analog Discovery	26
3.3 Měření pomocí coupleru 2x2	27
4 GUI v MatLabu	29
4.1 GUI pro vyhodnocení výsledku	29
4.2 Zdrojový kód GUI	30
5 Měření vibrací	35
5.1 Výsledky měření pomocí AnalogDiscovery	36
5.2 Výsledky měření pomocí osciloskopu	41
6 Lokalizace vibrace	45
6.1 Výpočet umístění vibrace	45
6.2 Lokalizace pomocí osciloskopu	46
6.3 Lokalizace pomocí AnalogDiscovery	47
6.3.1 Lokalizace vibrace pomocí Michelsonova interferometru	47
6.3.2 Lokalizace vibrace pomocí Machova-Zehnderova interferometru	51
6.3.3 Lokalizace vibrace pomocí dualního Machova-Zehnderova in- terferometru	54
7 Závěr	58

Literatura	61
Seznam symbolů, veličin a zkratk	62
Seznam příloh	63
A Obsah přiloženého CD	64

Seznam obrázků

1.1	Michelsonův interferometr	14
1.2	Mach-Zehnderův interferometr	14
2.1	Coupler 3x3 ze dvou coulerů 2x2	17
2.2	Jádra coupler 3x3	18
3.1	Obecné zapojení pro měření vibrací	21
3.2	Subsystém zrcadel	22
3.3	Simulace Michelsonova interferometru s 3x3 couplerem	22
3.4	Subsystém coupleru	23
3.5	Zobrazení amplitudy a imaginární složky signálů	23
3.6	Zobrazení fáze signálů	24
3.7	Blokové schéma zapojení senzoru s využitím osciloskopu	25
3.8	Reálné zapojení senzoru s využitím osciloskopu	25
3.9	Blokové schéma zapojení senzoru s využitím Analog Discovery	26
3.10	Reálné zapojení senzoru s využitím Analog Discovery	27
3.11	Blokové schéma zapojení senzoru s využitím coupleru 2x2	28
4.1	Výběr .csv souboru	29
4.2	Okno programu pro zobrazování výsledků měření	30
4.3	Zobrazení hodnot grafu	30
5.1	Výstupní graf/signál zobrazený AnalogDiscovery - výstup cirkulátoru	35
5.2	Výstupní graf/signál zobrazený AnalogDiscovery - výstup ramena . . .	35
5.3	Výstupní graf/signál zobrazený osciloskopem	36
5.4	FFT graf pro ramena při 1 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD	36
5.5	FFT graf pro cirkulátor při 1 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD	37
5.6	FFT graf pro ramena při 100 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD	37
5.7	FFT graf pro cirkulátor při 100 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD	37
5.8	FFT graf pro ramena při 1000 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD	38
5.9	FFT graf pro cirkulátor při 1000 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD	38
5.10	FFT graf pro ramena při 10 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD	38
5.11	FFT graf pro cirkulátor při 10 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD	39
5.12	FFT graf pro ramena při 1000 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD	39
5.13	FFT graf pro cirkulátor při 1000 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD	39

5.14	FFT graf pro ramena při 10 Hz pomocí coupleru 2x2	40
5.15	FFT graf pro ramena při 1000 Hz pomocí coupleru 2x2	40
5.16	FFT grafy při 10 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí osciloskopu .	41
5.17	FFT grafy při 100 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí osciloskopu .	42
5.18	FFT grafy při 1000 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí osciloskopu	42
5.19	FFT grafy při 10 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí osciloskopu .	43
5.20	FFT grafy při 100 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí osciloskopu .	43
5.21	FFT grafy při 1000 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí osciloskopu	44
6.1	Příklad záznamu při lokalizaci vibrací	45
6.2	Princip hledání vibrace v záznamu	46
6.3	Výstup z osciloskopu při měření vibrací	47
6.4	Schéma zapojení Michelsonova interferometru pro lokalizaci vibrací .	48
6.5	Výstup z AD zapojení Michelsonova interferometru - 2 m	49
6.6	Výstup z AD zapojení Michelsonova interferometru - 106 m	49
6.7	Výstup z AD zapojení Michelsonova interferometru - 3 km	50
6.8	Schéma zapojení Machova-Zehnderova interferometru pro lokalizaci vibrací	51
6.9	Reálné zapojení Machova-Zehnderova interferometru pro lokalizaci vibrací	51
6.10	Výstup z AD zapojení Machova-Zehnderova interferometru - 2 m . . .	52
6.11	Výstup z AD zapojení Machova-Zehnderova interferometru - 106 m .	52
6.12	Výstup z AD zapojení Machova-Zehnderova interferometru - 3 km . .	53
6.13	Schéma zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru pro lokalizaci vibrací	54
6.14	Reálné zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru pro lo- kalizaci vibrací	55
6.15	Výstup z AD zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru - 2 m	56
6.16	Výstup z AD zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru - 106 m	56
6.17	Výstup z AD zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru - 3 km	57

Seznam tabulek

2.1	Tabulka přesností couplerů Go4fiber	16
2.2	Tabulka přesností couplerů OpLink	16
2.3	Tabulka přesností couplerů ThorLabs	16
2.4	Tabulka přesností 2x2 couplerů.	17
2.5	Tabulka přesností coupleru 3x3 od společnosti Phoenix Photonics . .	19
2.6	Tabulka přesností coupleru 3x3 od společnosti MicroLab	20
5.1	Naměřené hodnoty pomocí AnalogDiscovery	40
5.2	Naměřené hodnoty pomocí osciloskopu	44
6.1	Tabulka místa vibrací pro Michelsonův interferometr	50
6.2	Tabulka místa vibrací pro Machův-Zehnderův interferometr	53
6.3	Tabulka místa vibrací pro duální Machův-Zehnderův interferometr . .	57

Úvod

V první části semestrální práce je obecný popis optických senzorů. Jejich využití, výhody a také jejich nevýhody. Jsou zde uvedeny i konkrétní případy použití. V podkapitolách optických senzorů se práce věnuje rozboru senzoru, který je zapojen na bázi Michelsonova a Machova-Zehnderova interferometru. Princip těchto interferometrů je v kapitolách vždy vysvětlen.

Část semestrální práce se věnuje popisu a rozboru jednotlivých couplerů. Je zde popsán jak coupler 2x2, jeho výhody, nevýhody a parametry, kterými disponuje, tak i coupler 3x3. Oba tyto couplery mají v práci uvedený způsob výroby. Pro coupler 3x3 jsou v práci uvedeny i důležité výpočty a vzorce. Konec této kapitoly je věnován porovnání couplerů 2x2 a 3x3.

V další části práce jsou uvedena zapojení s využitím coupleru 3x3. Schématické zapojení a zapojení simulace v programu MatLab. Dále je tato část věnována samotnému měření vybraných zapojení. Jsou zde popsány výsledky měření, ukázky grafů z naměřených hodnot a tabulky sloužící pro porovnání přesností couplerů 2x2 a 3x3. Není zde opomenut ani GUI program vytvořený v prostředí MatLab, který slouží k zobrazování a vyhodnocování výsledků měření.

Poslední část se zabývá lokalizací vibrací, které ovlivňují světelný svazek šířící se v optickém vláknu. Jsou zde měřena tři zapojení interferometrů. Prvním z těchto zapojení je klasický optovláknový Michelsonův interferometr. Jako druhý a třetí byly zvoleny interferometry Mach-Zehnderovi, přičemž jeden byl duální. V této části práce jsou jak výstupy z měření, tak i přehledné tabulky s výsledky.

1 Senzory

V dnešní době je velké množství senzorů. Používají se zpravidla pro detekce různých stavů. Mohou to být různá čidla, která zaznamenávají pohyb, jako indukční smyčky ve vozovce, které se používají k detekci vozidel. Poměrně novým řešením je však senzor pomocí optického vlákna.

Tyto senzory, které jsou tvořeny optickými vlákny, potažmo kabely, jsou velmi citlivé a přesné. Teoreticky by mohly nahradit velkou část dosud používaných systémů. Jejich přesnost je dosažena díky tomu, že optické vlákno je velmi náchylné na jakékoliv otřesy a tlak. Tudíž i opravdu malý otřes je vlákno schopno zachytit a následně je možné tento otřes pozorovat na přijatém signále.

Například indukční smyčky, které se nyní běžně používají v dopravě, slouží pro počítání dopravy. Dokáží detekovat vozidlo a tím pádem je možné poměrně přesně stanovit, kolik vozidel projelo oblastí, kde byly tyto smyčky instalovány. Další využití této smyčky je u křižovatek, kde jsou schopny detekovat vozidla stojící v křižovatce. Při vhodném použití je možné pomocí těchto indukčních smyček také změřit rychlost vozidla. Všechny tyto možnosti však nabízí i optický senzor. Dokáže také detekovat vozidla a to velmi přesně. Navíc oproti indukční smyčce dokáže vyhodnocovat i tlak, který na něj působí. Toho se využívá například na dálnicích, kde je možné určit i váhu vozidla.

Optický senzor má obrovskou škálu použití. Dá se použít pro kontrolu perimetru, kde se optické vlákno zakope na hranice pozemku a pokud se k hranici někdo přiblíží, na deformaci signálu, který prochází optickým vláknem, je patrné, že dochází k narušení. A nejen to, lze z něj vyčíst i poměrně přesné místo, vzdálenost od hranice pozemku a popřípadě i váhu narušujícího objektu. Obrovský potenciál mají optické senzory na železničních tratích. V dnešní době je naprosto běžné vést podél železniční trati dálkové kabely pro diagnostiku. Dálkové kabely se skládají z metalických, ale i optických kabelů. Tudíž by se dalo využít stávajících kabelových cest a implementovat do nich optické vlákno, které by fungovalo jako senzor. Tento optický senzor by pak byl schopný detekovat projíždějící vlaky a nejen to, byl by schopný detekovat například i samotné nápravy, kola vlaku, ale i předměty na trati, například objekty, které by mohly zapříčinit vykolejení vlakové soupravy, lidí a zvířata, a předem upozornit blížící se vlak na potenciální riziko.

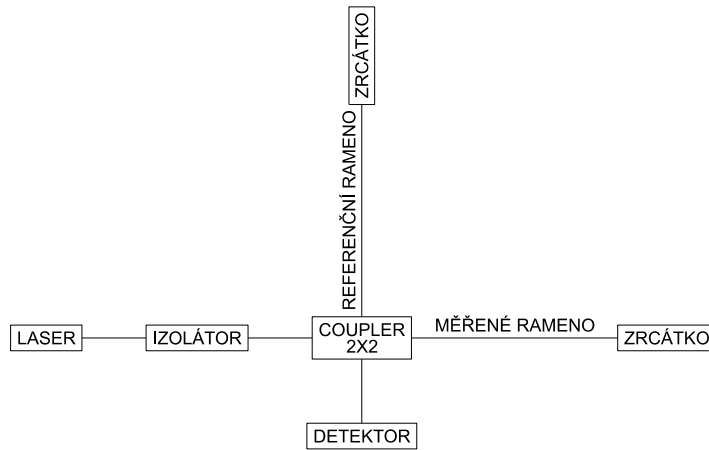
Optický senzor pracuje na bázi Michelsonova nebo Mach-Zehnderova interferometru. Interferometry jsou obecně velmi přesné měřicí přístroje. Dají se rozdělit do dvou skupin a to na fyzikální, ve kterých se světelný svazek šíří volným prostorem a prostupuje čočkami a popřípadě se odráží od zrcadel. A na optické, kde se světelný svazek šíří v optickém vláknem a rozděluje se pomocí optických couplerů. v obou případech je však potřeba využívat co nejkvalitnější součástky a kvalitní

zdroj koherentního záření, jako je laser.

Nevýhodou optických senzorů je však jejich poměrně velká cena. Aby správně fungovaly a vyhodnocovaly vše, co je po nich požadováno, je potřeba využít velmi kvalitních součástí. Nejdůležitějšími jsou zdroje vyzařující světelný signál. Tyto zdroje se musí vybírat podle délky ramen senzorů. Jednou z vlastností zdroje světelného záření je koherentní délka, která popisuje dosvit světelného vlnění. Proto je přijatelnější vybírat zdroje s vysokou koherentní délkou, čímž dosáhneme většího rozlišení na delší vzdálenosti. Čím kvalitnější budou tyto součásti požadovány, tím bude vyšší i jejich cena. Další značnou nevýhodou je samotná montáž, kdy je třeba využít kvalifikovaných pracovníků a s optickými vlákny zacházet velmi opatrně a jemně, aby nedošlo k jejich zničení nebo negativnímu ovlivnění jejich přenosových schopností.

1.1 Senzor na bázi Michelsonova interferometru

Michelsonův interferometr je jedním z nejvíce používaných interferometrů. Z tohoto důvodu je velmi často používán i pro senzory. Princip tohoto senzoru spočívá v šíření světelného svazku rameny interferometru a následného vyhodnocení interference světelných svazků. Tudíž světelný svazek se šíří od zdroje záření optickým vláknem, dokud nenarazí na optický coupler. Ten je schopný světelný svazek rozdělit, a umožnit tak, aby se část světelného svazku mohla šířit rameny interferometru. Rozdělený světelný svazek tedy putuje rameny interferometru až k Faradayovu rotačnímu zrcadlu, kde dojde k jeho odrazu a putuje zpět do optického couperu, kde byl rozdělen. Nyní však světelný svazek bude interferovat s ostatními odraženými částmi světelného svazku a kompletní interferenční světelný svazek putuje do optického detektoru, kde je převeden na elektrický signál a následně vyhodnocen [8].

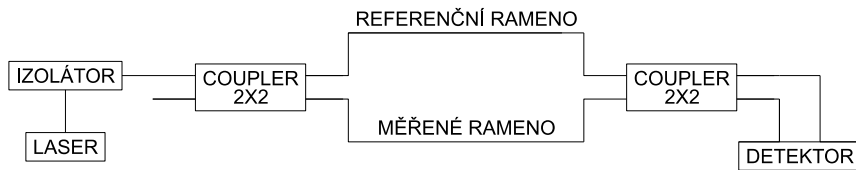


Obr. 1.1: Michelsonův interferometr

Je tedy nasnadě využít tento interferometr jako senzor a to tak, že jedno rameno zůstane jako referenční a pomocí zbylých ramen je možné detekovat různé stavy.

1.2 Senzor na bázi Mach-Zehnderova interferometru

Podobného principu využívá i senzor, který má jako základ Mach-Zehnderův interferometr. Rozdílem je zde odlišné šíření světelného svazku. Zatímco u Michelsonova interferometru dochází k odrazům od Faradayových rotačních zrcadel u Mach-Zehnderova interferometru k žádným odrazům nedochází. Světelný svazek je rozdělen pomocí optického coupleru a jeho část se šíří rameny. Na konci ramen je druhý optický coupler, ve kterém dojde k interferenci částí světelného svazku. Výsledný interferenční světelný svazek putuje do detektoru [9].



Obr. 1.2: Mach-Zehnderův interferometr

2 Couplery

Světelný svazek vedený optickým vláknem je občas potřeba rozdělit. Mimo různých optických switchů existují i tzv. couplery. Tyto součástky jsou schopny rozdělit světelný svazek do více optických vláken, avšak za cenu zmenšení amplitudy signálu.

2.1 Coupler 2x2

Coupler 2x2 (popřípadě 1x2) je jeden z nejběžněji používaných couplerů. Tvoří jej dvě optická vlákna, která jsou při vysokém tlaku navařena k sobě. Jádra optických vláken se skoro dotýkají a tím coupler získává své vlastnosti. Dle délky sváru se určuje dělicí poměr tohoto coupleru. Například 30/70, ale nejčastěji se jedná o 50/50. Z toho plyne, že signál rozdělí do dvou výstupních vláken ve stejném poměru. Níže bude text věnován převážně couplerům s dělicím poměrem 50/50.

Přesnost coupleru 2x2 je poměrně těžké přesně určit. Přesnost ovlivňuje hned několik faktorů. Ať už se jedná o fyzické poškození nebo o faktory, které se nedají ovlivnit. Optické vlákno je velmi citlivé na fyzické poškození. Může se jednat o mikrostopické prasklinky nebo miniaturní nečistoty, které dokáží negativně ovlivnit výslednou přesnost coupleru. Druhým faktorem jsou případy, kdy již není ovlivněno vlákno, ale spíše způsob měření. Rozdílné přesnosti dosahuje coupler při používání různých vlnových délek zdroje koherentního záření. Je nutné počítat s tím, že jinou přesnost bude mít coupler při použití vlnové délky 1310 nm a jinou při použití vlnové délky 1550 nm. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost, v této kategorii je samotný dělicí poměr. Coupler dosahuje jiné přesnosti, pokud například použijeme dělicí poměr 50/50, anebo pokud použijeme coupler s poměrem 10/90.

U coupleru typu 2x2, popřípadě 1x2, je možné využít dva druhy couplerů. První druh je tzv. jedno-oknový (Single Window). Tento coupler má již při výrobě definováno, se kterou vlnovou délkou může pracovat. Například tedy pokud je využíváno coupleru, který má definovanou vlnovou délku 1310 nm, lze měřit pouze na této vlnové délce. Pokud by bylo měřeno na jiné, například na 1550 nm, mohlo by dojít k nevratnému poškození coupleru. Druhý druh je tzv. dvou-oknový (Dual Window), kdy tento coupler umožňuje měřit na obou definovaných vlnových délkách. Tudiž umožňuje měření například jak na vlnové délce 1310 nm, tak i na 1550 nm, aniž by došlo k poškození. Ona výhoda je však vykoupena nižší přesností coupleru. Zatímco u jedno-oknových couplerů se přesnost prakticky neliší, a to ať už se měří na vlnové délce 1310 nm nebo na vlnové délce 1550 nm, tak u dvou-oknového coupleru je přesnost nižší s porovnáním jedno-oknového, viz tabulka 2.1.

Uvedené přesnosti jsou pro couplery 2x2 a 1x2, nabízených společnostmi Go4fiber. Zde jsou uvedeny jednotlivé přesnosti, ze kterých je vycházeno.

Tab. 2.1: Tabulka přesností couplerů Go4fiber [5]

-	jedno-oknový (SW)			dvou-oknový (DW)		
vlnová délka (nm)	1310 nebo 1550			1310 a 1550		
dělicí poměr (%)	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	19/90
maximální nadměrné ztráty (dB)	0,1					
maximální vstupní ztráty (dB)	3,4	5,6/1,8	10,8/0,65	3,5	5,9/1,9	5,9/1,9
maximální ztráty závislé na polarizaci PDL (dB)	0,08	0,1/0,08	0,1/0,05	0,1	0,1/0,08	0,1/0,05
minimální zpětná ztráta (dB)	50					
minimální směrovost 1x2 (dB)	50					
maximální směrovost 2x2 (dB)	65					

Další uvedené přesnosti jsou pro coupery nabízené firmou OpLink. Přesnosti jsou uvedeny v podobné tabulce 2.2, jako byla uvedena výše a to převážně pro přehlednost.

Tab. 2.2: Tabulka přesností couplerů OpLink [6]

-	jedno-oknový (SW)						dvou-oknový (DW)		
vlnová délka (nm)	1310			1550			1310 a 1550		
dělicí poměr (%)	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	19/90
WDL ₁ (dB)	≤ 0,40	≤0,25/≤0,50	≤0,16/≤0,60	≤ 0,22	≤0,16/≤0,20	≤0,13/≤0,26	≤ 1,2		
IL ₂ (dB)	2,60-3,50	≤1,82/4,6-5,9	≤0,65/9,00-11,3	2,70-3,30	≤1,82/4,9-5,8	≤0,65/9,20-11,2	2,40-3,90	≤1,95/4,50-6,50	≤0,65/9,20-12,2
PDL ₃ (dB)	≤ 0,10	≤0,08/≤0,13	≤0,06/≤0,15	≤ 0,10	≤0,08/≤0,12	≤0,06/≤0,14	≤ 0,20	≤0,15/≤0,15	≤0,10/≤0,15
minimální zpětná ztráta (dB)	55								
minimální směrovost(dB)	55								

- 1 Vstupní ztráty přesahující operační vlnovou délku ve 23°C.
- 2 Vstupní ztráty přesahující specifickou hranici vlnové délky.
- 3 Vstupní ztráty měnící se podle polarizačních stavů vstupu.

Poslední uvedený typ couplerů je od společnosti ThorLabs.

Tab. 2.3: Tabulka přesností couplerů ThorLabs [7]

-	jedno-oknový (SW)						dvou-oknový (DW)		
vlnová délka (nm)	1310			1550			1310 a 1550		
dělicí poměr (%)	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	19/90
WDL ₁ (dB)	≤ 0,15	≤0,15	≤0,15	≤ 0,15	≤0,15	≤0,15	0,2		
IL ₂ (dB)	≤3,6	≤1,6/≤6,8	≤0,7/≤11,4	≤3,6	≤1,6/≤6,8	≤0,7/≤11,4	3,8	-	12,7/0,8
PDL ₃ (dB)	≤ 0,2	≤0,2	≤0,2	≤ 0,15	≤0,15	≤0,15	≤ 0,15	-	≤0,15
minimální zpětná ztráta (dB)	60								
minimální směrovost(dB)	60								

Přesnost couplerů 2x2 je vytvořená průměrem hodnot uvedených výše. Jak již bylo popsáno přesnost se dá velmi těžce určit. Výsledné hodnoty pro couplery 2x2 jsou uvedeny v tab. 2.4.

Přesnost couplerů je závislá na dělicím poměru, používané vlnové délce, zda se jedná o SM (singlemode) nebo MM (multimode) a také na výrobci.

Tab. 2.4: Tabulka přesností 2x2 couplerů.

-	jedno-oknový (SW)						dvou-oknový (DW)		
	1310			1550			1310 a 1550		
vlnová délka (nm)									
dělicí poměr (%)	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	19/90
WDL ₁ (dB)	0,125						0,15		
IL ₂ (dB)	3,35	5,88/1,74	10,78/0,67	3,33	5,92/1,74	10,8/0,67	3,48	5,7/1,925	11,47/1,925
PDL ₃ (dB)	0,127	0,143/0,12	0,15/0,103	0,11	0,123/0,103	0,13/0,087	0,15	0,125/0,115	0,133/0,1
minimální zpětná ztráta (dB)	55								
minimální směrovost (dB)	55								

Při porovnání výsledků přesností couplerů 2x2 s dělicím poměrem 50/50 je patrné, že nejpřesnější je použití coupleru na vlnové délce 1550 nm. Rozdíly mezi jednotlivými couplery nejsou však nějak vyloženě rozdílné.

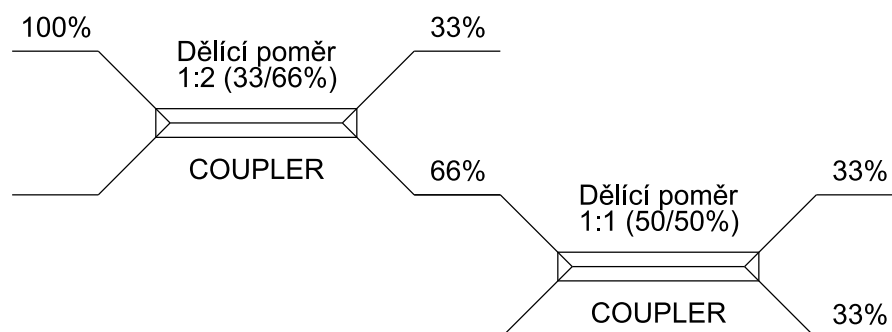
2.2 Coupler 3x3

Coupler 3x3 se od výše uvedeného coupleru 2x2 liší již na první pohled počtem vstupů. To však není jediné, coupler 3x3 má úplně jiný princip dělení signálu/světelného svazku. Je méně používaný než výše uvedený coupler 2x2. 3x3 couplery již nedělí signál na dva signály, ale na signály tři. Tudíž pokud vchází na vstup coupleru signál 100% coupler 3x3 tento signál rozdělí a výstupem budou tři signály o amplitudě 33% z amplitudy původního signálu. Tyto signály na výstupech budou vůči původnímu signálu také posunuty, konkrétně o $2/3 \pi$ [2].

2.2.1 Technologie výroby

Technologie výroby couplerů 3x3 je mnohem složitější než u couplerů 2x2. Existují dva nejvíce používané způsoby výroby těchto couplerů.

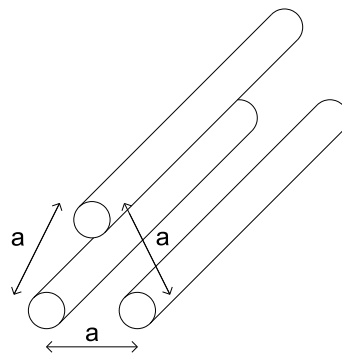
První je řešen tak, že se využije dvou couplerů 2x2. Tyto couplery musí mít nastavený dělicí poměr tak, aby byly schopny rozdělit 100 % amplitudy signálu na tři výstupy, každý s 33 % amplitudy původního signálu.



Obr. 2.1: Coupler 3x3 ze dvou coulerů 2x2

Jak lze vidět na obrázku 2.1, využijí se dva couplery 2x2 nebo 1x2. První coupler s dělicím poměrem 1:2 a druhý s dělicím poměrem 1:1. Signál ze 100% amplitudou je přiveden na vstup prvního coupleru s dělicím poměrem 1:2, zde se signál rozdělí v daném poměru a na prvním výstupu je dosaženo požadovaných 33% amplitudy. Na druhém výstupu je pak zbylých 66% amplitudy. Těchto 66% amplitudy původního signálu je přivedeno na vstup druhého z couplerů s dělicím poměrem 1:1 (50/50). Zde se signál rozdělí znovu a na obou výstupech je 33% původního vstupního signálu.

Druhá varianta výroby je o poznání složitější. Jedná se prakticky o stejnou technologii jako u couplerů 2x2 tudíž "spíkání" optických vláken tak, aby se jejich jádra co nejvíce přiblížila k sobě. Zde je však důležité udržet stejné vzdálenosti všech tří jader od sebe.



Obr. 2.2: Jádra coupler 3x3

2.2.2 Výpočty pro coupler 3x3

Matematické vyjádření pro intenzitu na výstupech couplerů 3x3, je následující:

$$y_n(t) = C_1 C_2 \cos[\Phi(t) - (n - 1) \frac{2\pi}{3}], \quad (2.1)$$

kde $n = 1, 2, 3$, C_1 a C_2 jsou intenzita a kontrast interferenčních kroužků a $\Phi(t)$ je optický rozdíl fáze mezi dvěma výstupy.

Fázový posun může být vyjádřen jako:

$$\Phi(t) = C_3 \cos(\omega t), \quad (2.2)$$

kde C_3 je rozdíl fáze a ω je úhlová frekvence signálu.

Jelikož fáze výstupní signály s coupleru 3x3 jsou naprosto symetrické, lze využít rovnici:

$$\cos x + \cos(x - \frac{2\pi}{3}) + \cos(x + \frac{2\pi}{3}) = 0. \quad (2.3)$$

2.2.3 Přesnosti couplerů 3x3

Coupler 3x3 od společnosti Phoenix Photonics má parametry dle níže uvedené tabulky 2.5.

Tab. 2.5: Tabulka přesností coupleru 3x3 od společnosti Phoenix Photonics. [1]

SPECIFIKACE:	Jednotky	3x3 monolitické couplery	
Vlnová délka	nm	1310 nebo 1550	
Šířka pásma	nm	±20	
Dělicí poměr	%	33/33/33	
Třída		P	A
Nadměrné ztráty	dB	0,10	0,15
PDL	dB	<0,10	<0,15
Směrovost	dB	>55	>50
Typ. vstupní ztráty	dB	4,9	5,0
Max. vstupní ztráty	dB	5,4	5,6
Jednotnost	dB	1,0	1,2
Monotónnost	dB	0,5/0,3/0,3	
Tepelná stabilita	dB/°C	0,003	
Operační teplota	°C	-40 až +85	
Skladující teplota	°C	-40 až +85	

Druhým uvedeným je coupler 3x3 od společnosti Microlab viz tab. 2.6.

Tab. 2.6: Tabulka přesností coupleru 3x3 od společnosti MicroLab [10]

Číslo modelu		Frekvenční rozsah	Izolace	Vstup	Spojování	Garantovaný	Výkon	Váha
7-16 DIN	N conn.	MHz	dB	VSWR	-	PIM	-	kg
CM-80D	CM-80N	698-800	>25	<1,20:1	5,0±1,3 dB	<-150dBc	100W avg 3kW peak	1.1
		800-2500	>25	<1,20:1	5,0±1,0 dB			
		2500-2700			5,0±1,3 dB			

U couplerů 2x2, které jsou běžnější, mají společnosti, které tyto couplery vyrábí, v datasheetech podrobné údaje. To pomáhá identifikovat a následně si vybrat coupler, který je nejideálnější pro řešení problému. To u couplerů 3x3 nelze říci. Každý výrobce ve svých datasheetech uvádí jiné a neúplné informace, tudíž velmi znesnadňuje výběr toho ideálního. Je to patrné i na výše uvedených dvou tabulkách pro coupler 3x3.

Z tohoto důvodu bude vycházeno pouze z couplerů a výrobců, u kterých je popis alespoň co nejpodrobnější jako u couplerů 2x2. Z důvodu porovnání těchto couplerů mezi sebou.

2.3 Porovnání couplerů 3x3 a 2x2

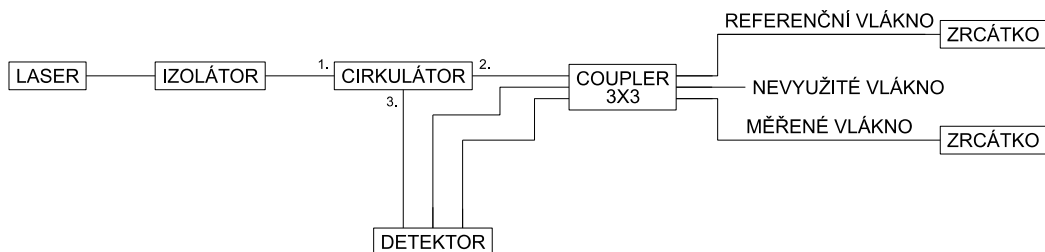
Obecně porovnat couplery 3x3 a 2x2 není vůbec snadná věc. Hlavním aspektem, který určuje samotnou přesnost couplerů jsou hlavně samotní výrobci a tudíž technologie, která je použita při výrobě.

Couplery 2x2 a 3x3 se zásadně neliší, jediným patrným rozdílem je větší útlum amplitudy u výsledného signálu, který je na výstupu coupleru 3x3. To je samozřejmě způsobeno dělicím poměrem, který není jako u coupleru 2x2 50/50, ale je 33/33/33.

Avšak můžeme předpokládat, že couplery 2x2 budou do jisté míry přesnější než couplery 3x3. Lze se tak domnívat na základě toho, že nejvíce chyb vzniká v samotném provařeném místě, tzn. dotyku dvou vláken. Z tohoto důvodu bude výhodnější coupler 2x2, u kterého lze předpokládat, že bude mít menší útlum než u coupleru 3x3.

3 Zapojení a simulace pro měření vibrací

Pro měření vibrací bylo vybráno zapojení s využitím coupleru 3x3.



Obr. 3.1: Obecné zapojení pro měření vibrací

Zapojení se skládá ze zdroje světelného záření, konkrétně laserové diody SLT5412, umístěné v chladícím mountu CLD 1015. Tento laser operuje na vlnové délce v rozmezí 1507-1515 nm a má možnost změny výstupního výkonu.

Dalším prvkem je izolátor, který je zde zapojen proto, kdyby došlo ke zpětnému odrazu. Odraz by mohl zničit zdroj. Tento izolátor je schopný, díky polarizačnímu filtru, odražený světelný svazek pohltit.

Hlavním úkolem cirkulátoru je poskytnutí přístupu k jednomu ze tří výstupů 3x3 coupleru a zamezení odražení světelného signálu zpět do laseru. Cirkulátor je optické zařízení s třemi porty (porty jsou označeny 1,2 a 3 na obr. 3.1), které propouští signál pouze z portu 1 na port 2 a z portu 2 na port 3. Světlo vstupující portem 1 vystoupí portem 2. Dále pokračuje systémem. Vracející se signál vstoupí opět na port 2 a vystoupí portem 3, přičemž cirkulátor neposkytuje žádnou možnost, aby světelný signál vystoupil portem 1 zpět do laseru.

Oba prvky zamezují zpětnému odrazu světelného svazku zpět do zdroje světla. Tudíž by stačilo použití pouze jednoho z nich. Tyto prvky byly do zapojení zahrnuty především kvůli lidské chybě, kdyby mohl být cirkulátor do systému umístěn nesprávně, a tím pádem by ohrozil zdroj.

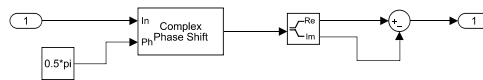
Coupler 3x3 je popsán výše, zde slouží k rozdělení signálu z cirkulátoru, který následně šíří do tří ramen. Jedno rameno je nevyužíváno. Je to z toho důvodu, že je v měření zbytečné. Jedno z ramen coupleru je pak zvoleno jako referenční, tudíž nesmí docházet k jeho ovlivnění. Druhé rameno je pak měřené a pomocí něj se budou zachytávat vibrace způsobené reproduktorem. Toto rameno je přichycené na membránu reproduktoru, tudíž lze pomocí něj měřit i frekvenci.

Na konci obou ramen jsou Faradayova rotační zrcadla. Stav polarizace světelného signálu se může šířením optickými vlákny měnit, proto jsou na konci obou ramen

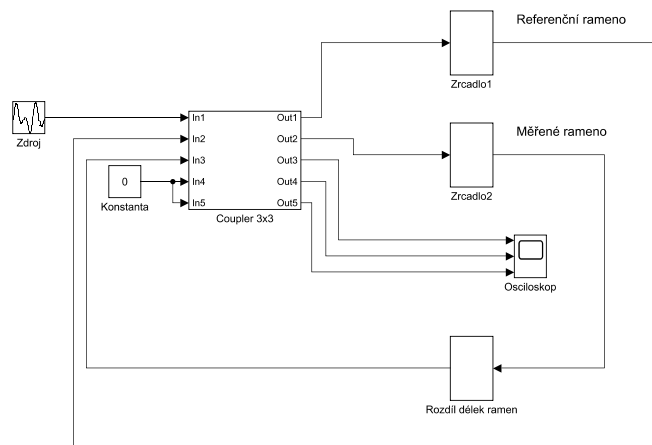
použita Faradayova rotační zrcadla. Tato zrcadla otáčí polarizaci o 90° , čímž může dojít k interferenci světelného svazku šířícího se systémem.

3.1 Simulace zapojení

Simulace zapojení je vytvořena pomocí programu MatLab. Tento program dokáže simulovat chování zapojení v ideálních podmínkách. Jedinou nevýhodou je, že není možné simulovat světelný svazek a optické zapojení. Proto je v simulaci nahrazeno zapojení pomocí elektromagnetických signálů.



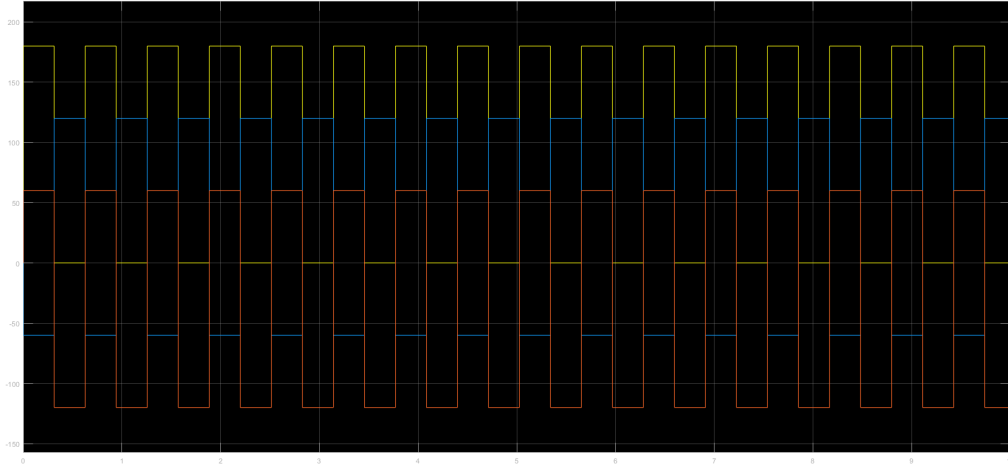
Obr. 3.2: Subsystem zrcadel



Obr. 3.3: Simulace Michelsonova interferometru s 3x3 couplerem

Simulace se skládá ze zdroje, který generuje sinusový signál o amplitudě 1 V s frekvencí 10 Hz a s fázovým posunem 0 rad. Tento signál je rozdělen pomocí coupleru 3x3 do dvou ramen s třetinovou amplitudou původního signálu, přičemž je coupler vytvořen tak, že zde nejsou vyobrazeny a ani simulovány nevyužité porty coupleru. Na obou ramenech jsou bloky simulující zrcadla, jež otáčí fázi signálu o 45° . Blok simulující rozdíl délek ramen je prozatím nevyužit, jelikož úkolem je sensor na bázi balancovaného interferometru, proto bude tento blok využit v pozdějších fázích práce. Signály obou ramen vstupují zpět do coupleru, kde dochází k interferenci a posunutí fáze obou signálů o 120° . Výsledné signály jsou poté zobrazeny pomocí osciloskopu.

Na obr. 3.5 jsou zobrazeny amplitudy a imaginární složky tří signálů z výstupních portů coupleru 3x3. Z obrázku lze pozorovat, že při generování sinusového signálu, který zde simuluje světelný svazek, s amplitudou 1 V ze zdroje, jsou amplitudy těchto tří signálů třetinové. Takže dělicí poměr coupleru je v simulaci opravdu 33% a souhlasí s teorií.



Obr. 3.6: Zobrazení fáze signálů

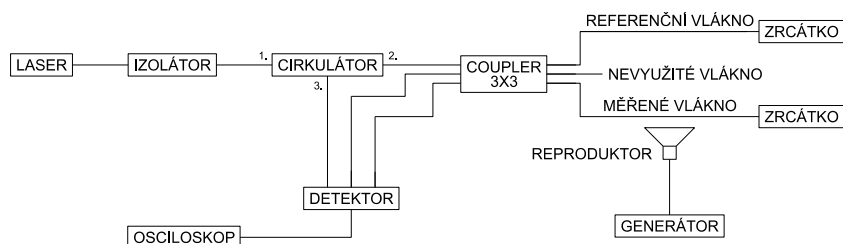
Obr. 3.6 zobrazuje fáze tří výstupních signálů z coupleru ve stupních, přičemž opět lze sledovat souhlasné fázové posuny s teorií.

3.2 Reálné zapojení

3.2.1 Měření pomocí osciloskopu

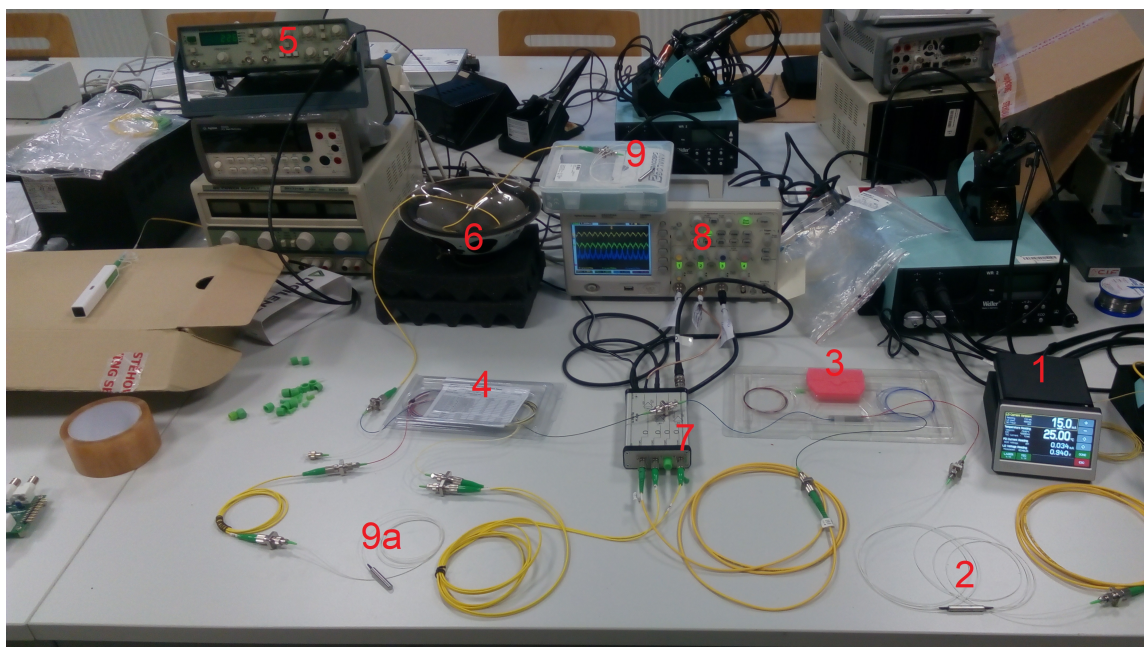
Reálné zapojení je realizováno dvěma způsoby. Rozdíl v zapojeních je v použitém přístroji na vyhodnocování výsledků.

První zapojení využívá k vyhodnocení signálu osciloskop. Toto zapojení má velkou výhodu v tom, že je možné sledovat na displeji osciloskopu všechny výstupy ze systému.



Obr. 3.7: Blokové schéma zapojení senzoru s využitím osciloskopu

Na obrázku 3.7 je zobrazené blokové schéma zapojení senzoru vibrací, kde jsou výsledné signály vyhodnocovány osciloskopem. Zde je možné pozorovat, jak se mění amplitudy výstupních signálů.



Obr. 3.8: Reálné zapojení senzoru s využitím osciloskopu

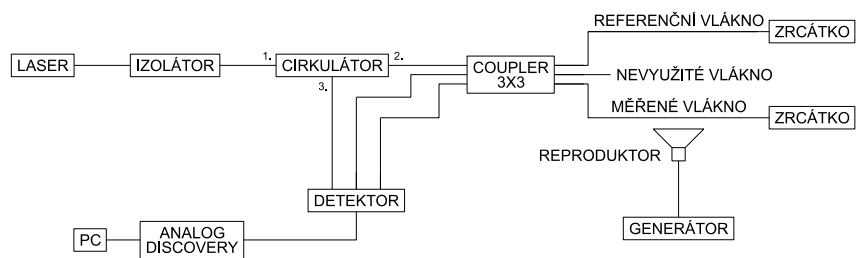
Na obrázku 3.8 je reálné zapojení s využitím osciloskopu na vyhodnocení výsledků. Uvedená čísla popisují jednotlivé součástky zapojení.

- 1 Světelný zdroj (laserová dioda) dioda SLT5412 v chlazením mountu CLD 1015.
- 2 Izolátor.
- 3 Cirkulátor.
- 4 Coupler 3x3.
- 5 Generátor.
- 6 Reproduktor.
- 7 Detektor.
- 8 Osciloskop.
- 9, 9a Faradayova rotační zrcátka.

Nevýhodou zapojení, používajícího osciloskop, je přesnost a prakticky nemožnost zastavení rychle se měnícího signálu. Na výstupu osciloskopu jsme získali maximálně 600 vzorků, zatímco u AnalogDiscovery jsme získali až 8000 vzorků.

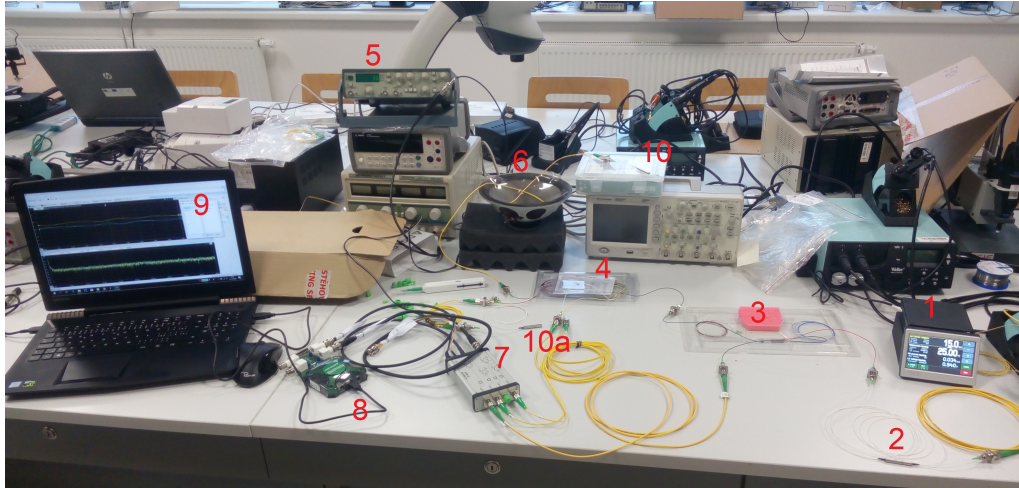
3.2.2 Měření pomocí Analog Discovery

Při druhém zapojení je využít prvek tzv. Analog Discovery. Tento prvek je schopný po nainstalování určitého programu do PC zobrazovat výsledky. Instalační soubor není velký a je volně ke stažení na stránkách výrobce. Výhodou je možnost nahrání delšího úseku měřeného signálu a následné procházení a vyhodnocování.



Obr. 3.9: Blokové schéma zapojení senzoru s využitím Analog Discovery

Obrázek 3.9 zobrazuje blokové schéma zapojení senzoru vibrací, kde jsou výsledné signály vyhodnocovány pomocí AnalogDiscovery a počítačem.



Obr. 3.10: Reálné zapojení senzoru s využitím Analog Discovery

Na obrázku 3.10 je možné vidět reálné zapojení s využitím prvku Analog Discovery použitého na vyhodnocení výsledků. Níže uvedená čísla popisují jednotlivé součástky nacházející se v zapojení.

- 1 Světelný zdroj (laserová dioda) dioda SLT5412 v chlazením mountu CLD 1015.
- 2 Izolátor.
- 3 Cirkulátor.
- 4 Coupler 3x3.
- 5 Generátor frekvence.
- 6 Reproduktor.
- 7 Detektor.
- 8 AnalogDiscovery.
- 9 Počítač (PC).
- 10, 10a Faradayova rotační zrcátka.

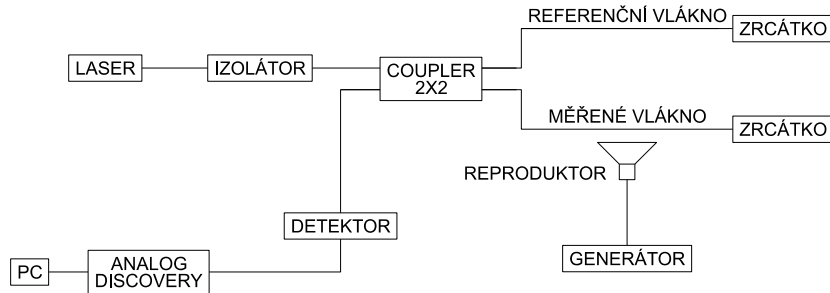
Značnou nevýhodou použití Analog Discovery k vyhodnocování výsledků je to, že pomocí AnalogDiscovery jsme schopni zobrazovat pouze dva kanály. Při tomto měření je nutné zaznamenávat nejprve dva kanály, například ramena, která vystupují přímo z coupleru 3x3 a následně zapojit rameno, které je výstupem z cirkulátoru. Tyto výsledky je pak vhodné, kvůli porovnání spojit v jiném programu, který dokáže vykreslit jejich grafy z naměřených hodnot. Může se jednat například o matematický program MatLab.

3.3 Měření pomocí coupleru 2x2

Posledním zapojení pro měření vibrací je zapojení senzoru jako Michelsonova interferometru s využitím coupleru 2x2. Jedná se tedy o naprosto běžné zapojení. Toto

měření je prováděno z důvodu ověření vlastností coupleru 2x2 a následné možnosti porovnání s couplerem 3x3.

Měření je prováděno za pomoci vyhodnocovacího zařízení Analog Discovery. Jedná se o přesnější zařízení než je osciloskop a navíc dokáže uchovávat záznam delšího měření. Zde je potřeba vyhodnocovat pouze dva kanály, takže je pro toto měření vyhovující.



Obr. 3.11: Blokové schéma zapojení senzoru s využitím coupleru 2x2

Na obrázku 3.11 je zobrazeno blokové schéma zapojení pro měření vibrací pomocí Michelsonova interferometru s využitím coupleru 2x2. Jsou zde patrná dvě ramena interferometru, z nichž jedno je ramenem referenčním, tudíž takovým, u kterého nedochází k ovlivnění, a druhého ramena, jež je ramenem měřeným. Toto rameno snímá vibrace způsobené reproduktorem a umožňuje je tak zobrazovat na počítači.

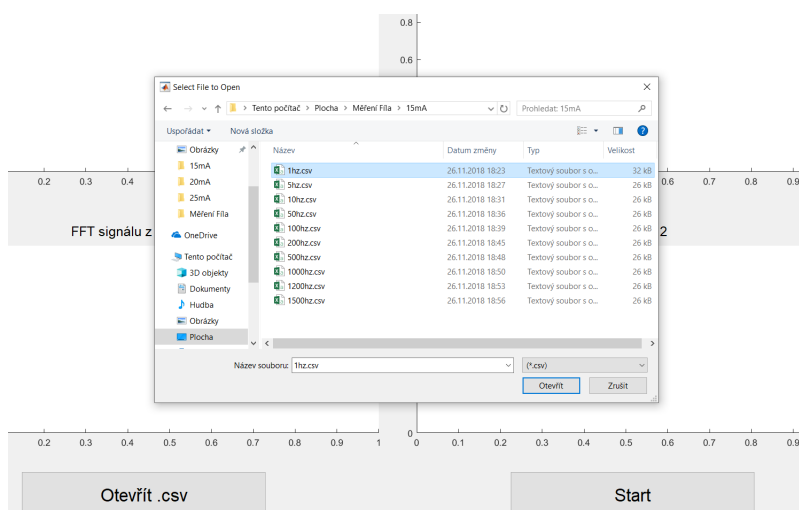
4 GUI v MatLabu

Vyhodnocování výsledků je poměrně složitou věcí. Především proto, že jen velmi omezené množství programů je schopné správně interpretovat výsledky z výstupu osciloskopu nebo AnalogDiscovery. Nejznámější program, který tuto operaci dokáže, je MatLab.

Je možné do něj nahrát změřené hodnoty ve formátu .csv, a to jak v maticové formě, tak i ve formě vektorové. Dále je potřeba vytvořit script, který z hodnot udělá požadované grafy. To je však pro běžného uživatele velmi náročné.

4.1 GUI pro vyhodnocení výsledku

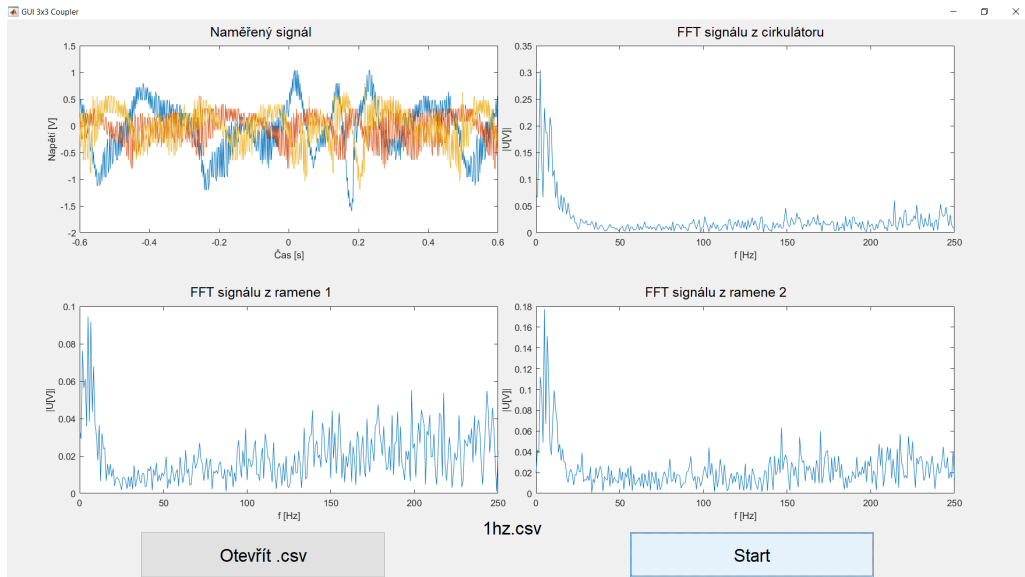
Program, který je v rámci této práce vytvořen, je uživatelsky příjemný a jeho obsluha je velmi snadná. Je vytvořen pomocí programu MatLab, ale tak, aby uživatel nemusel složitě psát kód nebo přemýšlet nad tím, jaké zobrazení si vybrat.



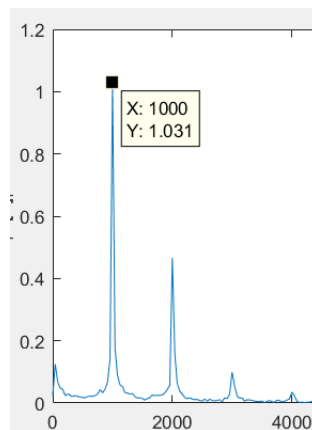
Obr. 4.1: Výběr .csv souboru

V programu je nutné vybrat data, se kterými se bude pracovat. Po stisku tlačítka "Otevřít .csv" je možné vybrat data. Data musí být ve formátu .csv. To většinou není problém, neboť .csv je běžný formát, který se dá exportovat z většiny osciloskopů. Formát .csv je možný získat i z AnalogDiscovery. Jakmile jsou data vybrána, stačí stisknout tlačítko "Start" a program zobrazí požadované grafy.

Najetím kurzoru myši a následným kliknutím levým tlačítkem myši na libovolný zobrazený graf, je možné zjistit hodnoty tohoto grafu v místě kliku myši.



Obr. 4.2: Okno programu pro zobrazování výsledků měření



Obr. 4.3: Zobrazení hodnot grafu

4.2 Zdrojový kód GUI

Zdrojový kód programu vytvořeného pomocí programu MatLab se skládá ze série vzorců a řádků načítajících hodnoty. Hodnoty v .csv jsou načteny do matice, ze které jsou vytvářeny sloupcové vektory, které jsou následně ukládány do určitých proměnných, se kterými se dále pracuje.

GUI program se dá rozdělit do několika částí. Index 1 - 27 se automaticky generuje při vytvoření GUI v MatLabu. Část s indexem 28 - 58 reprezentuje načtení souboru s naměřenými hodnotami pomocí stisknutí tlačítka. Dalších 59 - konec je samotné počítání a zobrazování výsledných grafů.

Výpis 4.1: Zdrojový kód GUI v MatLabu.

```

1
2 function varargout = untitled(varargin)
3
4 gui_Singleton = 1;
5 gui_State = struct('gui_Name',           mfilename, ...
6                   'gui_Singleton',     gui_Singleton, ...
7                   'gui_OpeningFcn',    @untitled_OpeningFcn
8                   , ...
9                   'gui_OutputFcn',     @untitled_OutputFcn,
10                  ...
11                  'gui_LayoutFcn',     [] , ...
12                  'gui_Callback',      []);
13 if nargin && ischar(varargin{1})
14     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
15 end
16
17 if nargin
18     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
19     varargin{:});
20 else
21     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
22 end
23
24 function untitled_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
25     varargin)
26 handles.output = hObject;
27 guidata(hObject, handles);
28
29 function varargout = untitled_OutputFcn(hObject,
30     eventdata, handles)
31 varargout{1} = handles.output;
32
33 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles
34     )
35 [FileName, PathName] = uigetfile('*.csv');
36 completePath = strcat (PathName, FileName);
37 namer = csvread(completePath,2,0)
38 set(handles.text6, 'String', FileName);

```

```

33 time = namer(:,1);
34 values = namer(:,2);
35
36 [row,coll] = size(namer);
37 if (coll > 2)
38 values2 = namer(:,3)
39 handles.values2 = values2;
40 end
41
42 if (coll > 3)
43 values3 = namer(:,4)
44 handles.values3 = values3;
45 end
46
47 L = length(values);
48 period = time(2)-time(1);
49 Fs = 1/period;
50 handles.L=L;
51 handles.coll = coll;
52 handles.row = row;
53 handles.time = time;
54 handles.values = values;
55 handles.namer = namer;
56 handles.Fs = Fs;
57 guidata(hObject,handles);
58
59 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles
    )
60 coll = handles.coll;
61 time = handles.time;
62 values = handles.values;
63 if (coll > 2)
64 values2 = handles.values2;
65 end
66 if (coll > 3)
67 values3 = handles.values3;
68 end
69 Fs = handles.Fs;
70 L=handles.L;

```

```

71 ffted = fft(values);
72 P2 = abs(ffted/L);
73 P1 = P2(1:L/2+1);
74 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
75 f = Fs*(0:(L/2))/L;
76
77 axes(handles.axes1);
78 datacursormode on;
79 plot(time, values);
80 hold on
81 plot(time, values2);
82 hold on
83 plot(time, values3);
84 hold off
85 title('Vstupní data');
86 xlabel('Čas [s]');
87 ylabel('Napětí [V]');
88
89 axes(handles.axes2);
90 plot(f, P1)
91 title('Single-Sided Amplitude Spectrum')
92 xlabel('f [Hz]')
93 ylabel('|U[V]|')

```

```

94 if (coll > 2)
95   ffted = fft(values2);
96   P2 = abs(ffted/L);
97   P1 = P2(1:L/2+1);
98   P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
99   f = Fs*(0:(L/2))/L;
100  axes(handles.axes3);
101  plot(f,P1)
102  title('Single-Sided Amplitude Spectrum')
103  xlabel('f [Hz]')
104  ylabel('|U[V]|')
105  end
106
107  if (coll > 3)
108    ffted = fft(values3);
109    P2 = abs(ffted/L);
110    P1 = P2(1:L/2+1);
111    P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
112    f = Fs*(0:(L/2))/L;
113    axes(handles.axes4);
114    plot(f,P1)
115    title('Single-Sided Amplitude Spectrum')
116    xlabel('f [Hz]')
117    ylabel('|U[V]|')
118  end

```

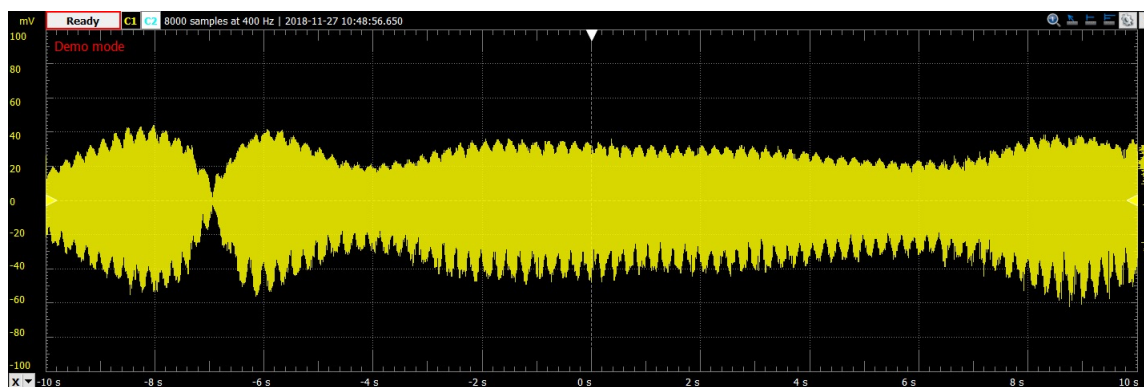
5 Měření vibrací

Cílem měření mělo být co nejpřesněji změřit frekvenci generovanou reproduktorem, který ovlivňoval jedno z ramen interferometru.

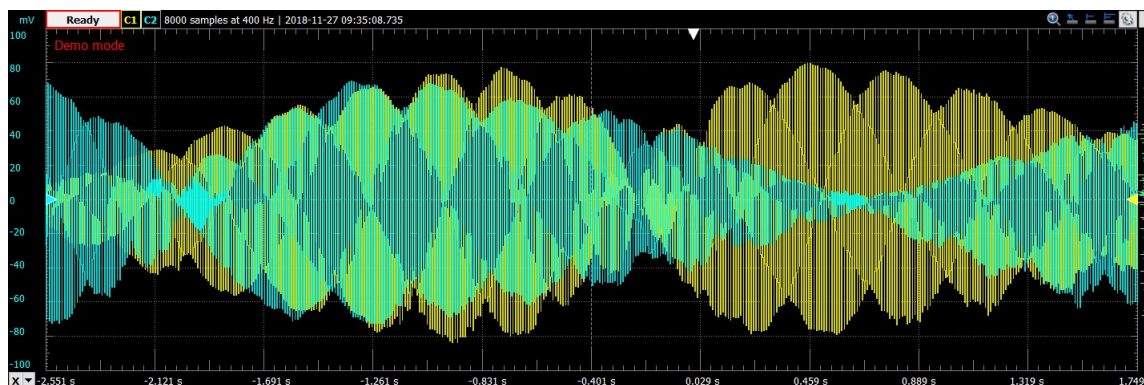
Samotné měření bylo rozděleno do tří částí. První část měření byla vyhodnocována osciloskopem, druhá pomocí AnalogDiscovery a třetí část byla vyhodnocována jak osciloskopem tak pomocí AnalogDiscovery. Rozdíl ve třetí části měření byl ten, že nebyl použit coupler typu 3x3, ale coupler typu 2x2.

Postupně byly proměřeny frekvence 1, 10, 100, 500, 1000, 1500 Hz, přičemž zvolená délka ramen byla 2 m. Naměřená data byla uložena ve formátu .csv pro další analýzu. Dále byl upravován vyzařovací výkon laseru. Měření probíhalo při vstupním proudu 15 mA a 25 mA.

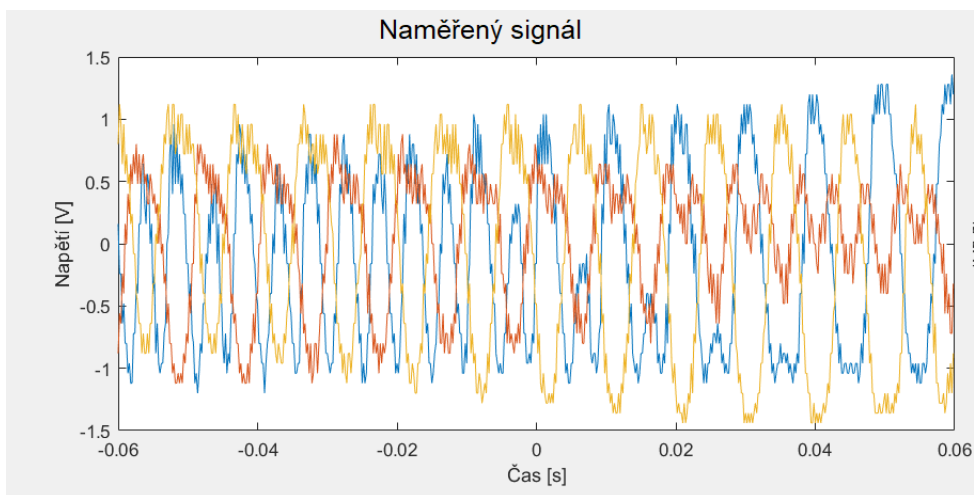
Získané výsledky měření jsou zaznamenávány do spojnicových grafů. Ukázka těchto grafů je na obrázcích. Pro získání hodnoty frekvence signálu, na základě kterého se určuje přesnost soustavy, je nutné převést graf pomocí FFT. Po tomto úkonu je možné frekvence správně odečíst.



Obr. 5.1: Výstupní graf/signál zobrazený AnalogDiscovery - výstup cirkulátoru



Obr. 5.2: Výstupní graf/signál zobrazený AnalogDiscovery - výstup ramen

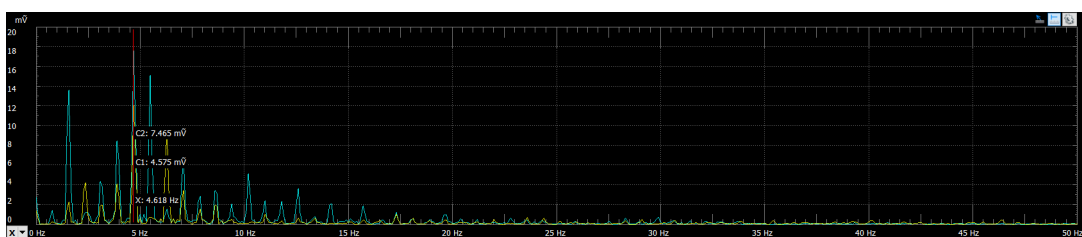


Obr. 5.3: Výstupní graf/signál zobrazený osciloskopem

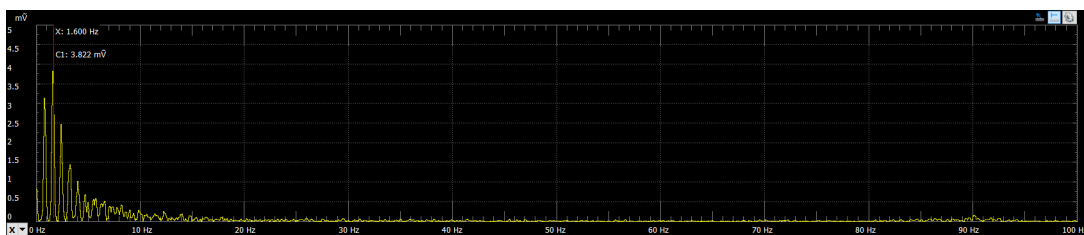
5.1 Výsledky měření pomocí AnalogDiscovery

Naměřené výsledky pomocí AnalogDiscovery byly vyhodnocovány přímo podpůrným programem WaveForms. Jedná se o velmi pohodlnou metodu, neboť program je schopný naměřený signál rovnou převést do formy signálu upraveného FFT. Následně je z tohoto signálu možné pomocí kurzorů odečíst požadované hodnoty. Jedno měření se vždy u couleru 3x3 skládá ze dvou výsledných grafů. Jeden graf pro výstupy z ramen interferometru (referenční a měřené) a druhý pro výstup z cirkulátoru.

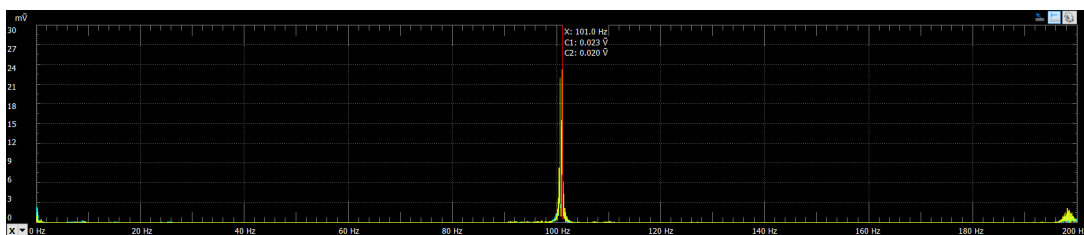
Ukázka naměřeného grafu při vstupním proudu 15 mA a zobrazení pomocí AnalogDiscovery je na obrázcích 5.4 a 5.5 pro 1 Hz, na 5.6 a 5.7 pro 100 Hz a na obrázcích 5.8 a 5.9 pro 1000 Hz.



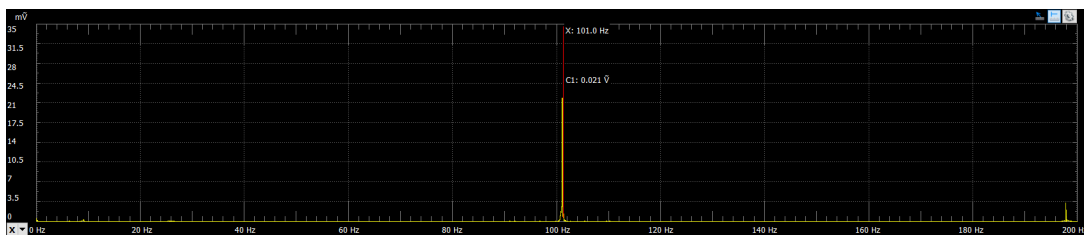
Obr. 5.4: FFT graf pro ramena při 1 Hz a vstupním proudu 15 mA pomocí AD



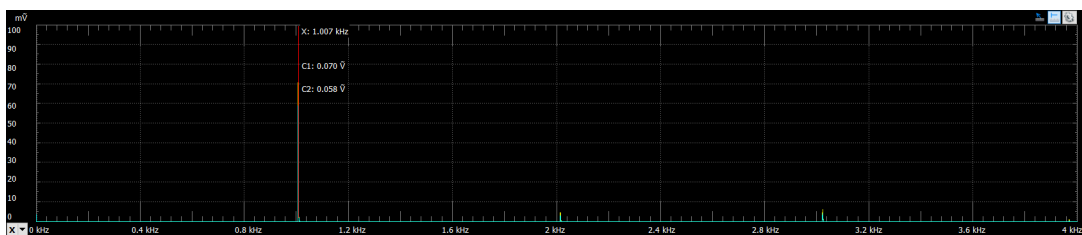
Obr. 5.5: FFT graf pro cirkulátor při 1 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD



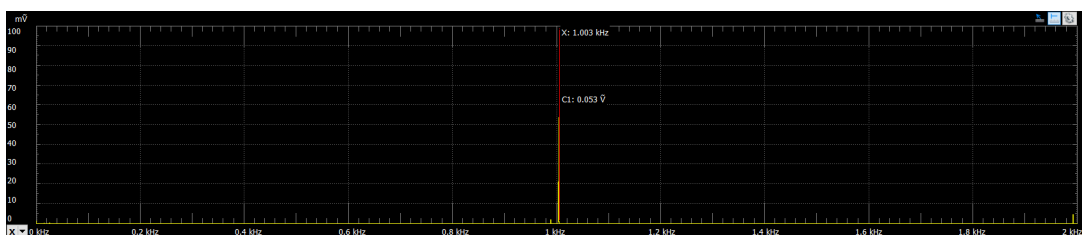
Obr. 5.6: FFT graf pro ramena při 100 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD



Obr. 5.7: FFT graf pro cirkulátor při 100 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD

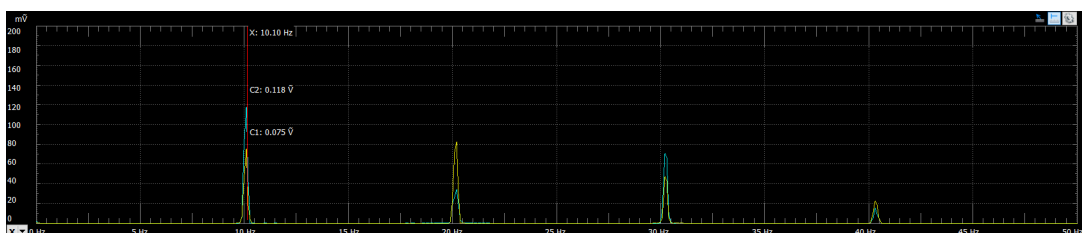


Obr. 5.8: FFT graf pro ramena při 1000 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD

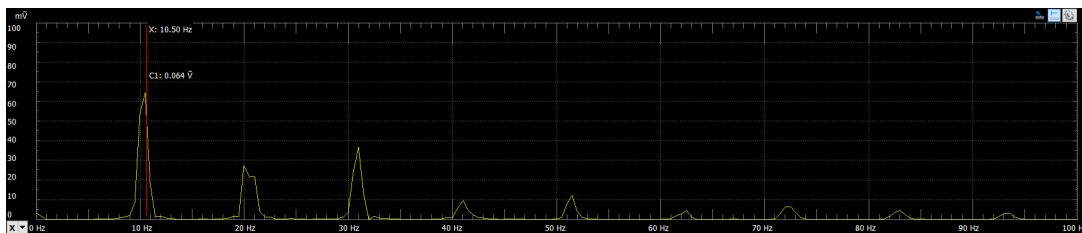


Obr. 5.9: FFT graf pro cirkulátor při 1000 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí AD

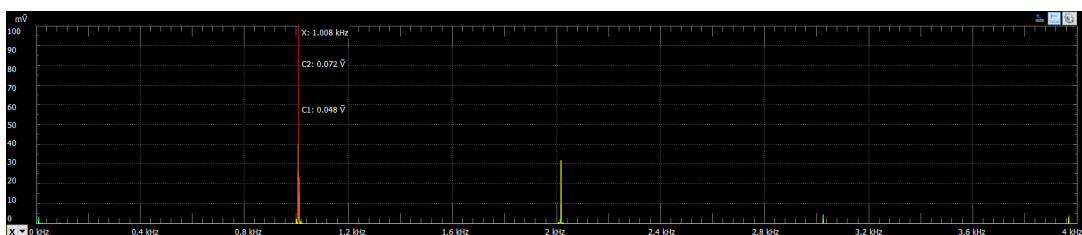
Podobné měření bylo provedeno i pro hodnotu vstupního proudu 25 mA. Ukázka výsledků měření je na obrázcích 5.10, 5.11, 5.12 a 5.13



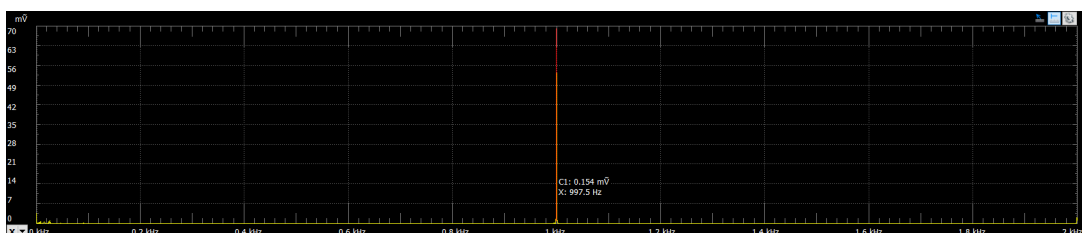
Obr. 5.10: FFT graf pro ramena při 10 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD



Obr. 5.11: FFT graf pro cirkulátor při 10 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD



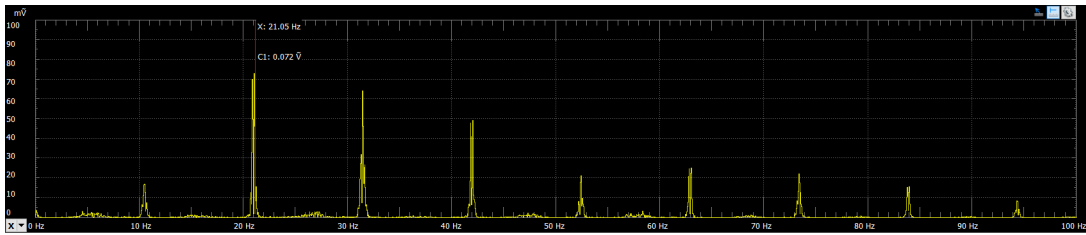
Obr. 5.12: FFT graf pro ramena při 1000 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD



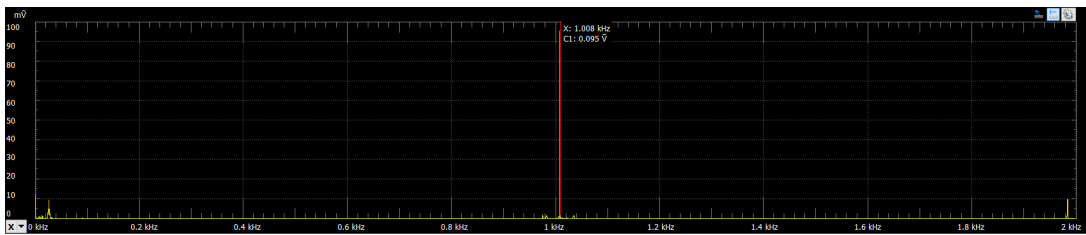
Obr. 5.13: FFT graf pro cirkulátor při 1000 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí AD

V dalším měření byl vyměněn v zapojení coupler 3x3 za coupler 2x2. Toto měření bylo provedeno z důvodu porovnání výsledků měření z pohledu přesnosti. U měření s couplerem 2x2 jsou již hodnoty po FFT zobrazeny do jednoho grafu.

Výsledky tohoto měření jsou ukázány na obrázcích 5.14 a 5.15.



Obr. 5.14: FFT graf pro ramena při 10 Hz pomocí coupleru 2x2



Obr. 5.15: FFT graf pro ramena při 1000 Hz pomocí coupleru 2x2

Z hodnot získaných z výsledných grafu byla vytvořena tabulka hodnot sloužící pro porovnání výsledků 5.1.

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty pomocí AnalogDiscovery

Nastavovaná frekvence [Hz]	Změřená frekvence [Hz]				
	15mA		25 mA		2x2
	C	R	C	R	
1	1,6	4,618	2	2	3,05
10	20,48	9,855	10,5	10,1	21,05
100	101	101	104,8	102,4	107,1
500	503,1	501,6	499,3	502,4	506,5
1000	1003	1007	997,5	1008	1008

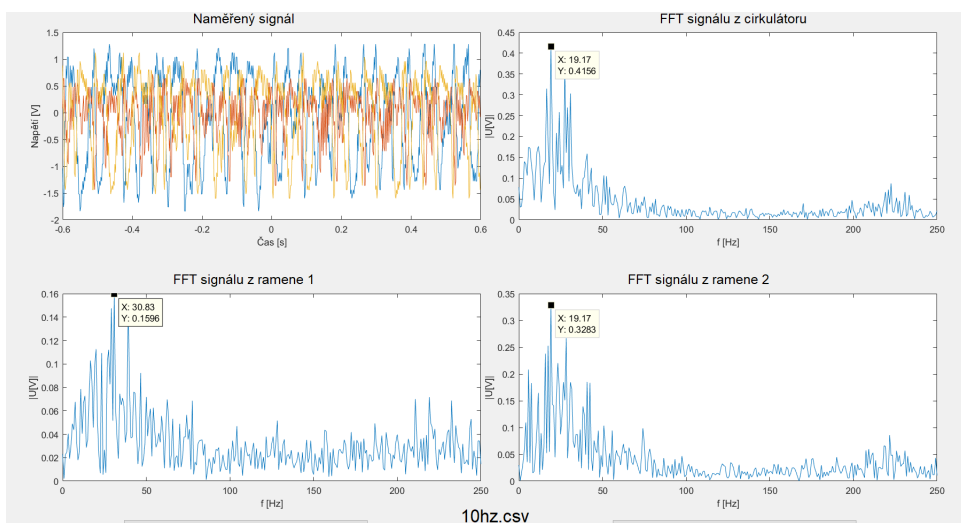
Tabulka naměřených hodnot obsahuje v prvním sloupci nastavované hodnoty frekvence na generátoru, které následně přenášel reproduktor na optické vlákno. V dalších sloupcích jsou obsaženy hodnoty odečtené z grafu po FFT pro výstup z cirkulátoru a obou ramen. Dále je z tabulky patrné, že druhý a třetí sloupec jsou hodnoty pro vstupní proud 15 mA, a čtvrtý a pátý sloupec pro 25 mA. V posledním sloupci jsou hodnoty naměřené s couplerem 2x2.

5.2 Výsledky měření pomocí osciloskopu

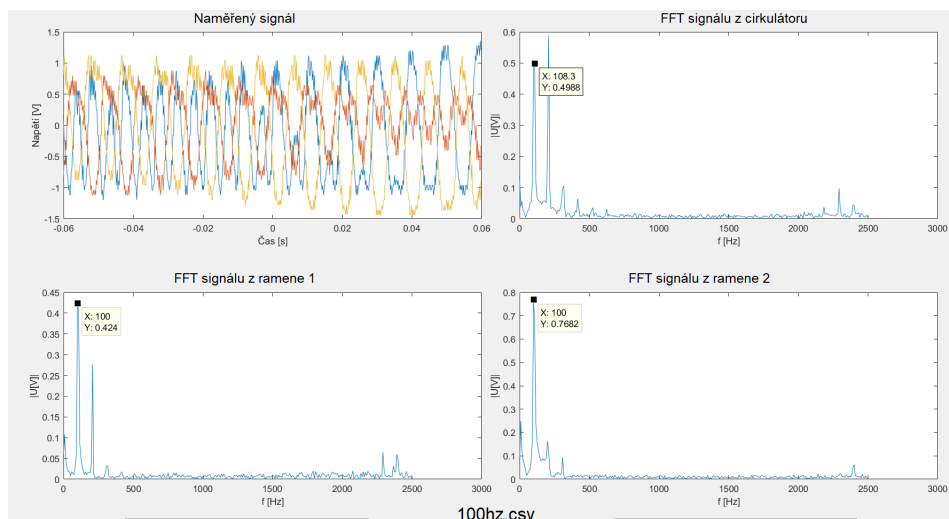
Při měření pomocí AnalogDiscovery byly vždy pro každé měření dva výstupní grafy. To bylo způsobené tím, že AnalogDiscovery má pouze dva kanály. Osciloskop má až čtyři kanály, z tohoto důvodu je možné na osciloskopu pozorovat všechny tři výstupy. Výsledný zaznamenaný graf je pak definovaný třemi složkami. První z referenčního ramene, druhou z měřeného a třetí, která reprezentuje výstup z cirkulátoru. Graf uložený ve formátu .csv je možný zobrazit například v Excelu, avšak ideálnějším řešením je nahrát hodnoty do programu MatLab a zde si nechat vykreslit graf, ze kterého je hodnoty možné odečítat. Před samotným odečítáním hodnot z grafu je však nutné převést graf pomocí FFT. V prostředí MatLab je tak nutné ještě před zobrazením hodnoty touto transformací převést.

Celý tento proces je velmi zdoluhavý, především když je více měření, jako v tomto případě, a proto bylo přikročeno k tomu, že se vytvoří GUI program, který práci velmi usnadní. Pomocí tohoto programu je možné získávat hodnoty z grafu velmi snadně a pohodlně.

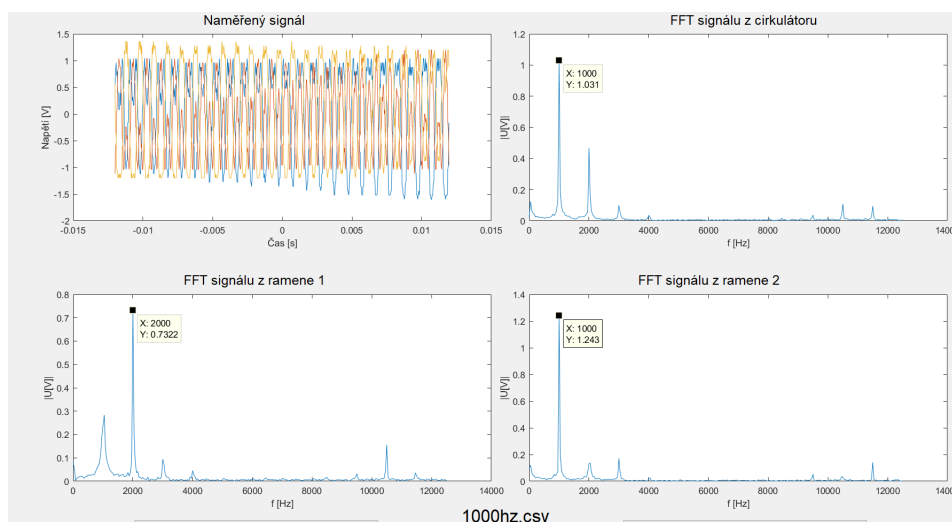
Ukázka výstupů z programu pro měření při vstupním proudu 15 mA je zobrazena na obrázcích 5.16, 5.17 a 5.18.



Obr. 5.16: FFT grafy při 10 Hz a vstupním proudu 15 mA pomocí osciloskopu

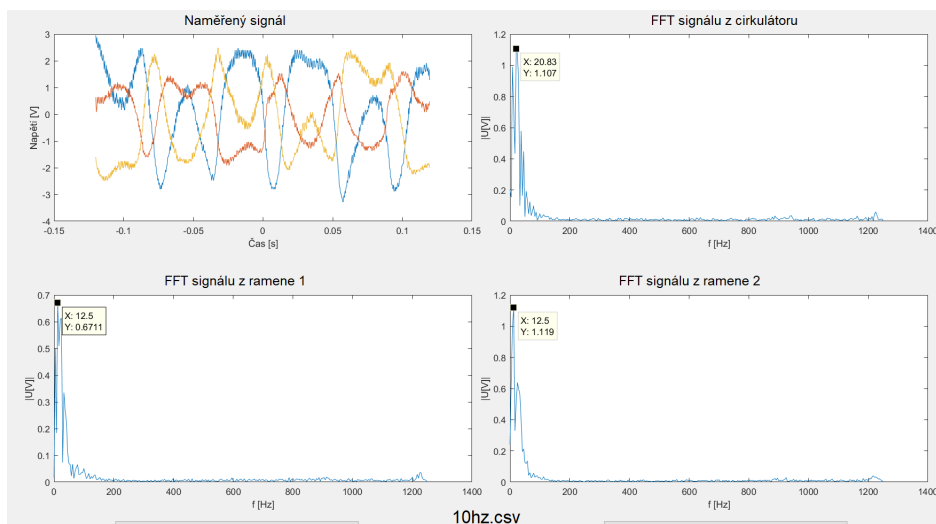


Obr. 5.17: FFT grafy při 100 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí osciloskopu

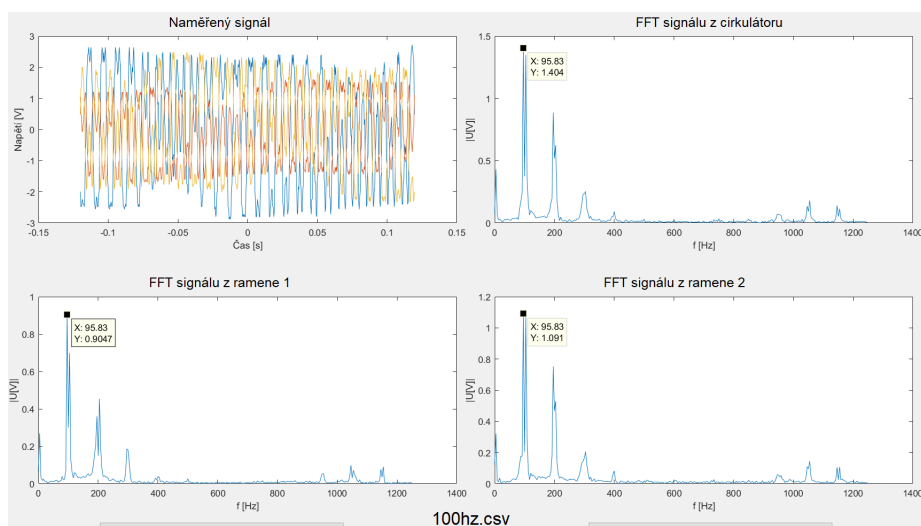


Obr. 5.18: FFT grafy při 1000 Hz a vstupním proudem 15 mA pomocí osciloskopu

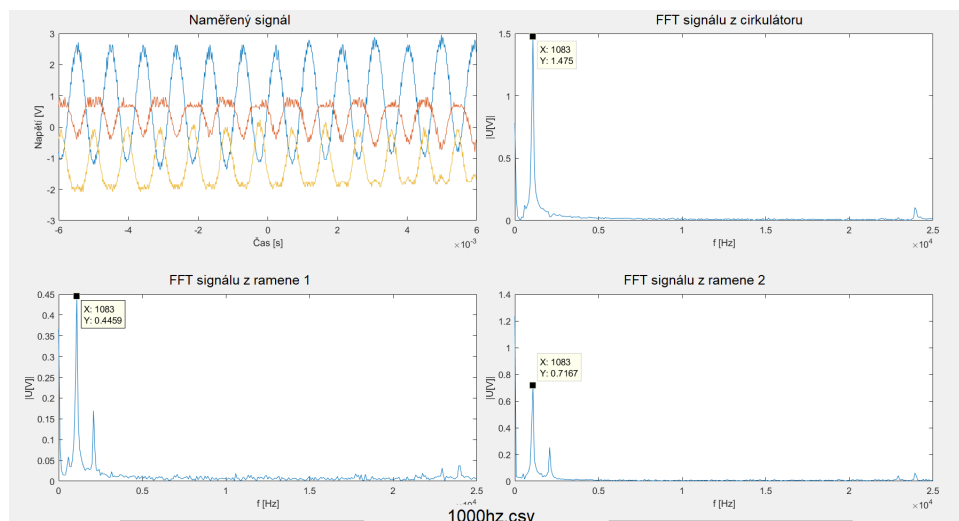
Obdobně měření při vstupním proudem 25 mA. Výstupy z tohoto měření jsou ukázány na obrázcích 5.19, 5.20 a 5.21.



Obr. 5.19: FFT grafy při 10 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí osciloskopu



Obr. 5.20: FFT grafy při 100 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí osciloskopu



Obr. 5.21: FFT grafy při 1000 Hz a vstupním proudem 25 mA pomocí osciloskopu

Ze získaných hodnot po provedení FFT byla sestavena tabulka 5.2, která udává přesnost měření.

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty pomocí osciloskopu

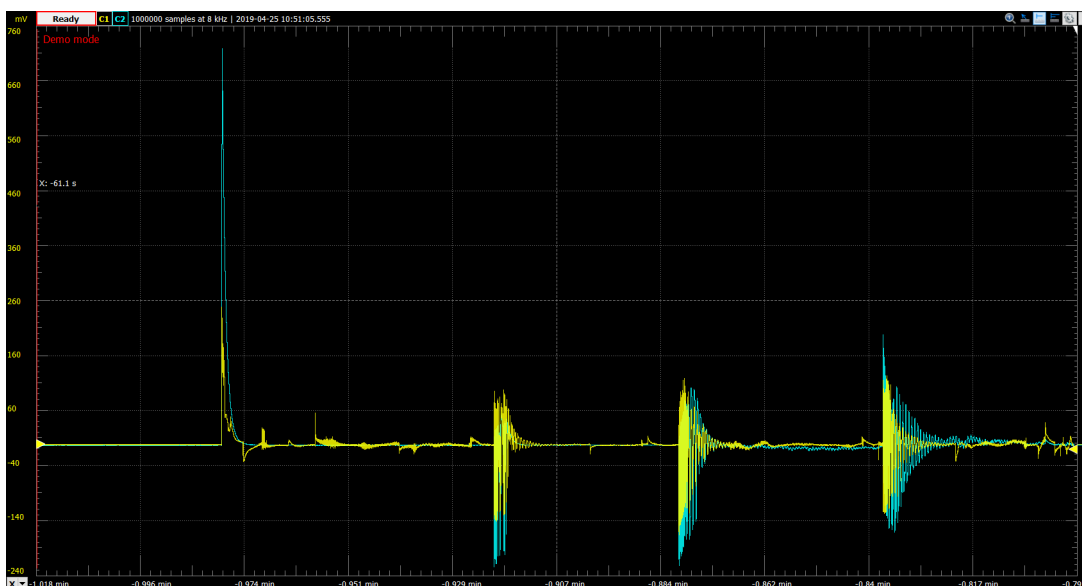
Nastavovaná frekvence [Hz]	Změřená frekvence [Hz]							2x2
	15mA			25 mA				
	C	R1	R2	C	R1	R2		
1	2,5	5	5	5,833	5	4,167	5	
10	19,17	30,83	19,17	20,83	12,5	12,5	18,33	
100	208,3	100	100	95,83	95,83	95,83	83,33	
500	500	1017	500	500	500	-	500	
1000	1000	2000	1000	1083	1083	1083	1000	

6 Lokalizace vibrace

Nejběžnějším způsobem jak lokalizovat závadu, potažmo vibraci, je jednovláknová metoda. Tato metoda je velmi podobná metodě OTDR. Jednovláknová metoda však není obsahem tohoto měření. Zde bylo pro lokalizaci vibrace zvoleno využití Michelsonova a Machova-Zehnderova interferometru. Hlavním úkolem bylo ověřit, zda-li je možné pomocí těchto interferometrů lokalizovat závadu a s jakou přesností.

6.1 Výpočet umístění vibrace

Pro určení přesného místa vibrace je nutné tyto místa vypočítat. Byla zvolena metoda, kdy je měřený průběh po určitou dobu zaznamenáván. Zaznamenaný průběh lze vidět na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Příklad záznamu při lokalizaci vibrací

Na obrázku první peak značí zapnutí laserové diody (start zdroje). Další tři záchvěvy značí, kdy bylo do vlákna udeřeno, a tím pádem vznikla vibrace.

Záznam značí celkovou dobu měření, nikoliv jeden průchod světelného svazku. Tyto průchody je potřeba určit výpočtem. Ze záznamu je nutné určit v jakém čase vznikl peak při zapnutí laseru a čas, kdy vznikly vibrace. Využije se vzorec 6.1, ze kterého získáme časový úsek mezi startem laseru a vibracemi.

$$\delta_i = t_{START} - t_i, \quad (6.1)$$

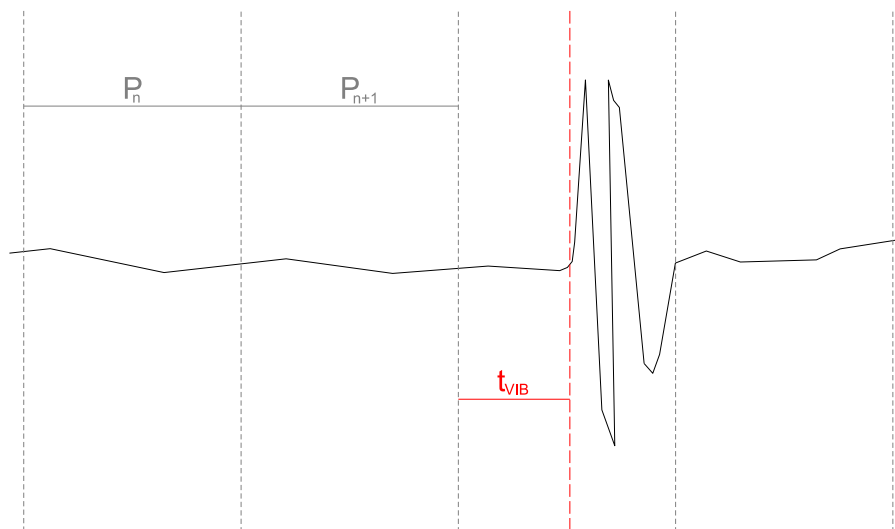
kde t_{START} značí čas startu laserové diody, t_i je čas, ve kterém vznikla vibrace, a index i značí pořadí vibrace.

Dalším krokem je vypočítání, jak dlouho trvá světelnému svazku projít systémem. K tomuto slouží následující vzorec:

$$t_d = \frac{d}{\frac{c}{n}}, \quad (6.2)$$

kde d značí délku použitého optického vlákna, c je rychlost světla a n je index lomu světla v jádru optického vlákna.

Nyní je známo za jaký čas projde světelný svazek systémem. Pomocí tohoto času lze určit počet průchodů světelného svazku než vznikla hledaná vibrace. Důležitý je pouze průchod, ve kterém se vibrace nachází. Viz obrázek 6.2.



Obr. 6.2: Princip hledání vibrace v záznamu

Po určení t_{VIB} jsme schopni pomocí vzorce 6.3 určit, v jaké délce se vibrace nacházela.

$$d_{VIB} = \frac{c}{n} * t_{VIB}, \quad (6.3)$$

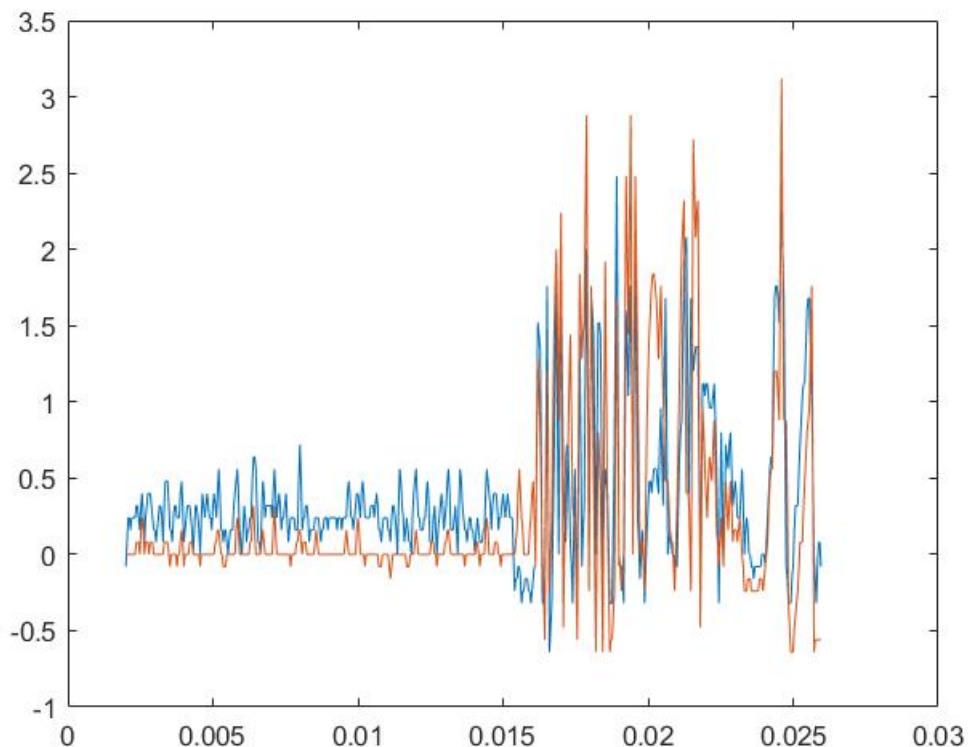
kde d_{VIB} je vzdálenost místa vibrace. Vibraci je možné určit ze dvou stran. Na obrázku 6.2 je vibrace určena z levé strany, avšak vibrace se dá určit i z pravé strany (zpětně) nebo z obou.

6.2 Lokalizace pomocí osciloskopu

V prvním měření byl využit pro zobrazování výsledků osciloskop. Postupně bylo měněno zapojení interferometrů. Pro lokalizaci vibrace byla vybrána tři zapojení. Prvním z těchto zapojení byl klasický Michelsonův interferometr, další zapojení

byla na bázi Machova-Zehnderova interferometru. Nejdřív klasický a následně bylo využito Machova-Zehnderova dvoucestného interferometru.

Pomocí osciloskopu není možné tento typ měření realizovat. Výstup z osciloskopu je na obrázku 6.3.



Obr. 6.3: Výstup z osciloskopu při měření vibrací

Na grafu je vidět závislost napětí na čase pro zachycené vibrace z obou ramen. Vibrace jsou zde velmi těžko čitelné a proto s tímto typem měření není dále pokračováno.

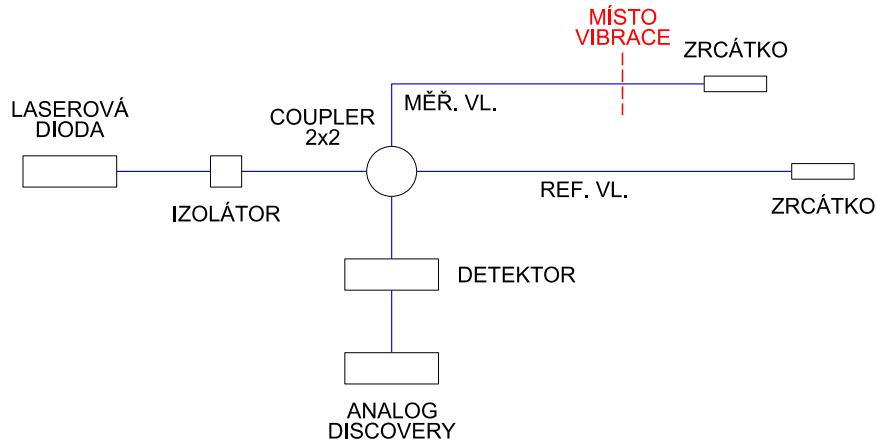
6.3 Lokalizace pomocí AnalogDiscovery

Prokazatelnější výsledky byly pořízeny pomocí měřicího zařízení Analog Discovery. Bylo opět využito tří zapojení interferometrů. Klasického Michelsonova a Machova-Zehnderova interferometru a dvoucestného Machova-Zehnderova interferometru.

6.3.1 Lokalizace vibrace pomocí Michelsonova interferometru

Prvním zapojením byl Michelsonův interferometr. U tohoto zapojení vzniká nežádoucí jev, který je velmi výrazný hlavně u menších vzdáleností měřeného optického

vlákna. Světelný svazek se světlovodem pohybuje rychlostí světla, která je ovlivněna indexem lomu optického vlákna. Rychlost šíření je tak velká, že pokud do vlákna uhodíme, stihne ovlivněný světelný svazek urazit cestu k zrcátku a zpět a ještě bude ovlivněn tlakem, který je vyvíjen v místě úhozu. To negativně ovlivňuje přesné určení této polohy.

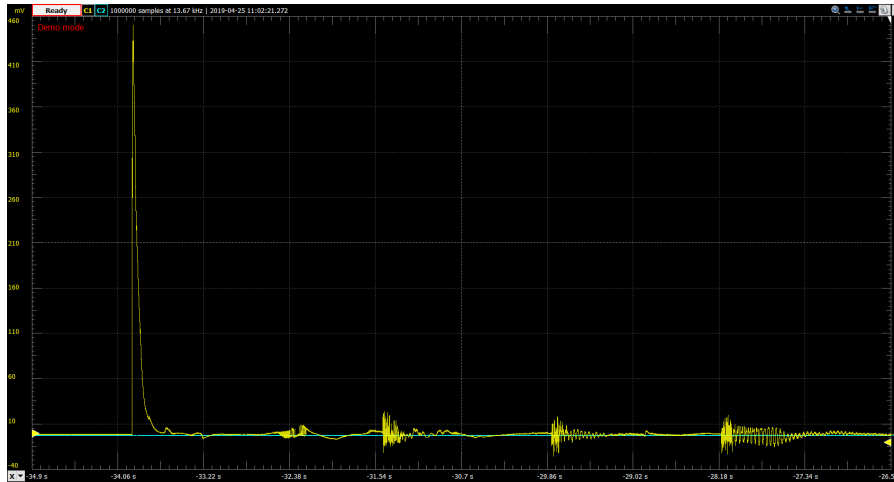


Obr. 6.4: Schéma zapojení Michelsonova interferometru pro lokalizaci vibrací

Reálné zapojení bylo realizováno z laserové diody přes izolátor do coupleru a následné rozdělení optické trasy do dvou ramen ukončených Faradayovými zrcátky. Výstup z coupleru je pak veden přes detektor, což je fotodioda se zesilovačem, a následné ukončení ve vyhodnocovacím přístroji AnalogDiscovery.

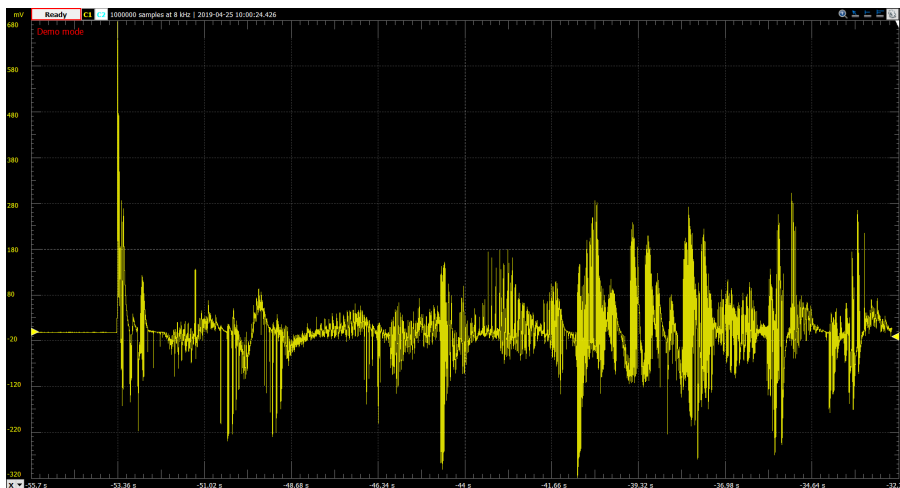
Samotná měření (lokalizace) vibrace byla realizována na třech různých délkách optických vláken. Různá vlákna byla vybrána z důvodu odlišné doby průchodu světelného svazku systémem. Byly zvoleny délky vláken 2 m, 106 m a zhruba 3 km.

Na obrázku 6.5 je výstup z AnalogDiscovery při lokalizaci tří vibrací na vlákně dlouhém 2 m. Vibrace vznikala ve vzdálenosti 1,5 m od coupleru.



Obr. 6.5: Výstup z AD zapojení Michelsonova interferometru - 2 m

Obrázek 6.6 ukazuje výstup při lokalizaci pro délku vláken 106 m, kde vibrace vznikaly ve vzdálenosti 105,5 m od coupleru.



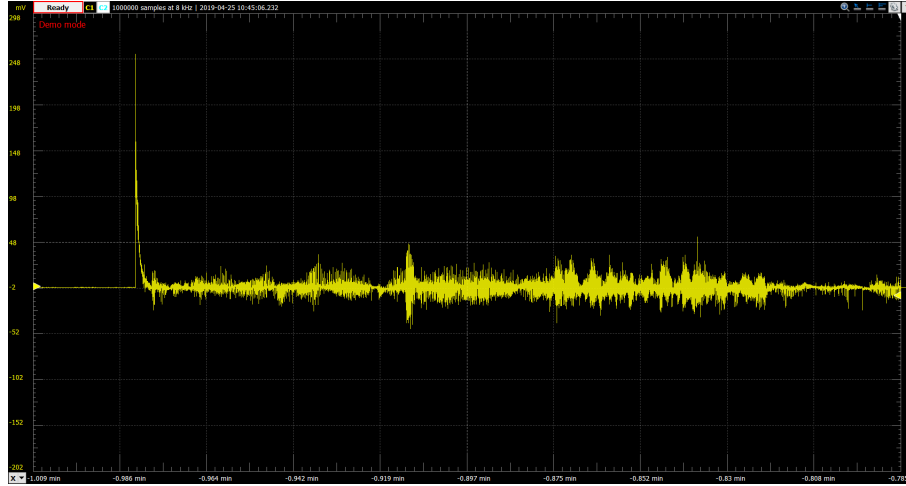
Obr. 6.6: Výstup z AD zapojení Michelsonova interferometru - 106 m

Posledním měřením s tímto typem zapojení byla délka vláken zhruba 3 km. Vibrace vznikaly na konci optického vlákna zhruba 0,5 m před zrcátkem. Výsledek je na obrázku 6.7.

První peak na grafech je způsobený startem laserové diody, další tři záchvěvy jsou lokalizované vibrace.

Po výpočtu místa vibrací je získána tabulka 6.1.

Příklad ručního výpočtu první naměřené vibrace při dvou metrech je znázorněn níže. Z naměřeného grafu vyčteme časovou hodnotu peaku při startu laseru a následně i hodnotu první vibrace. Ze získaných hodnot následně vypočítáme rozdíl a dostaneme δ_1 , ze které se vypočítá počet průchodů systémem n .



Obr. 6.7: Výstup z AD zapojení Michelsonova interferometru - 3 km

Tab. 6.1: Tabulka místa vibrací pro Michelsonův interferometr

Typ zapojení	Michelsonův interferometr					
	2m		106m		3km	
Strana	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
1. Vibrace	1,6752	0,3248	79,6712	26,3289	2716,2162	283,7838
2. Vibrace	1,8536	0,1464	95,8939	10,1061	1459,4595	1540,5405
3. Vibrace	1,7828	0,2172	90,0887	15,9113	2391,8919	608,1081

$$\delta_1 = t_{START} - t_1 = 33,92069233 - 31,46974038 = 2,45095195 \text{ s.} \quad (6.4)$$

Jeden průchod se vypočítá jako:

$$Pr = \frac{d}{r} = \frac{d}{\frac{c}{n}} = \frac{2}{\frac{3 \cdot 10^8}{1,48}} = 9,866667^{-9} \text{ s.} \quad (6.5)$$

Pro 2,45095195 s vychází počet průchodů na číslo $n = 248407283$. V tomto průchodu se nachází vibrace. Časová hodnota začátku tohoto průchodu je dána:

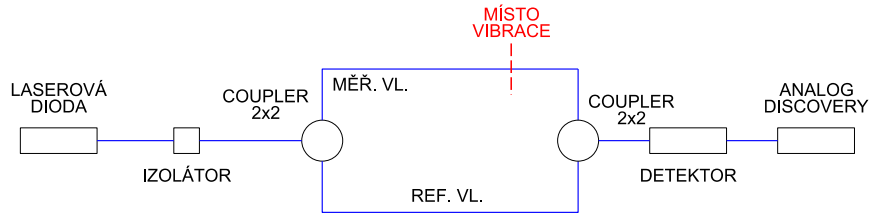
$$P_{248407283} = Pr * n = 9,866667^{-9} * 248407283 = 2,45095194173576 \text{ s,} \quad (6.6)$$

z tohoto času je možné vypočítat t_{VIB} , kterou získáme jako rozdíl δ_1 a hodnoty $P_{248407283}$. Následně se pomocí vzorce 6.7 vypočítá přesná poloha vibrace.

$$d_{VIB} = \frac{c}{n} * (P_{248407283} - \delta_1) = \frac{3 * 10^8}{1,48} * (2,45095194173576 - 2,45095195) = 1,6751839555 \text{ m.} \quad (6.7)$$

6.3.2 Lokalizace vibrace pomocí Machova-Zehnderova interferometru

Následující zapojení využívá k lokalizaci vibrace zapojení klasického optického Machova-Zehnderova interferometru. Zde by měla být značně vyšší přesnost při lokalizaci, než byla u Michelsonova interferometru. Na rozdíl od Michelsonova interferometru zde nedochází k odrazu světelného svazku od zrcátek. Světelný svazek prochází systémem přímo do druhého coupleru.



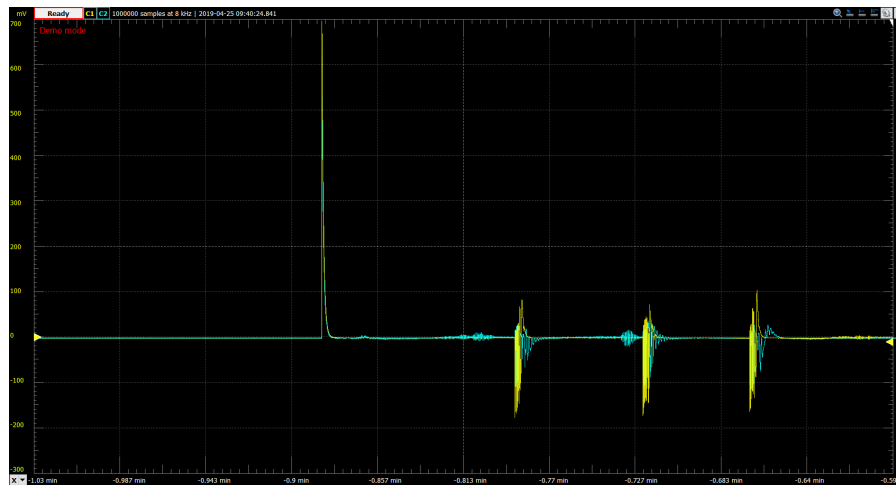
Obr. 6.8: Schéma zapojení Machova-Zehnderova interferometru pro lokalizaci vibrací

Reálné zapojení Machova-Zehnderova interferometru je na obrázku 6.9. Z něj je patrné jak interferometr funguje. Světelný svazek se šíří přes izolátor do couleru 2x2, kde je následně rozdělen do dvou ramen. Druhý vstup/výstup coupleru je nezapojený. Světelný svazek šířící se v ramenou interferometru dorazí až k druhému coupleru, kde bude interferovat světelný svazek z obou ramen. Výsledný svazek je detekovaný na detektoru a následně zobrazen pomocí AnalogDiscovery.



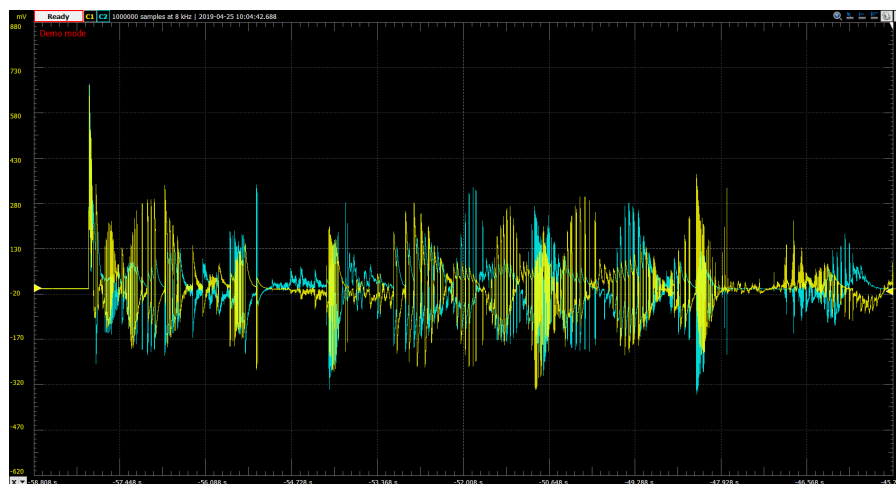
Obr. 6.9: Reálné zapojení Machova-Zehnderova interferometru pro lokalizaci vibrací

Obdobně jako u Michelsonova interferometru byly zvoleny různé délky optických vláken. Výsledek lokalizace vibrací na vláknech o délce 2 m je na obrázku 6.10. U tohoto měření byla chyba opět ve vzdálenosti 1,5 m od prvního coupleru.



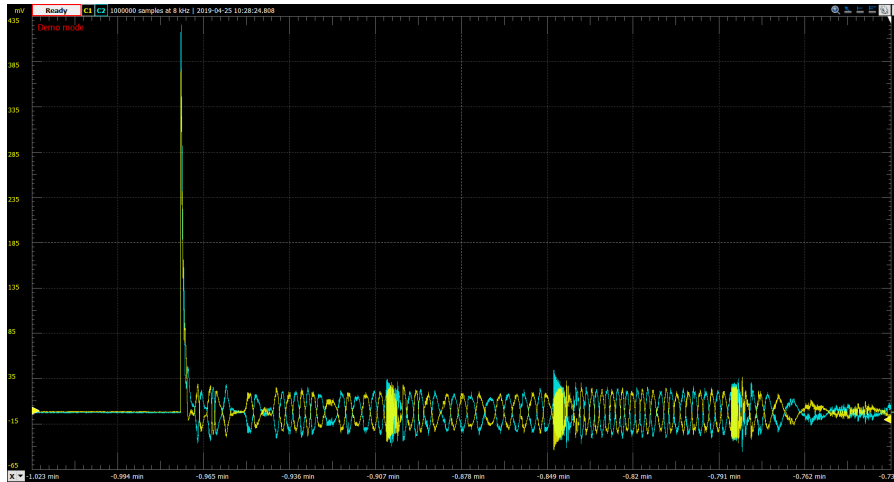
Obr. 6.10: Výstup z AD zapojení Machova-Zehnderova interferometru - 2 m

Měření a lokalizace vibrace na vláknech dlouhém 106 m je na obrázku 6.11. Vibrace vznikala na vzdálenosti 105,5 m od prvního coupleru.



Obr. 6.11: Výstup z AD zapojení Machova-Zehnderova interferometru - 106 m

Délka vláken zhruba 3 km byla zvolena jako poslední pro tento typ měření. Výstup z tohoto měření je zobrazen na obrázku 6.12.



Obr. 6.12: Výstup z AD zapojení Machova-Zehnderova interferometru - 3 km

První peak na grafech je způsobený startem laserové diody, další tři záchvěvy jsou lokalizované vibrace.

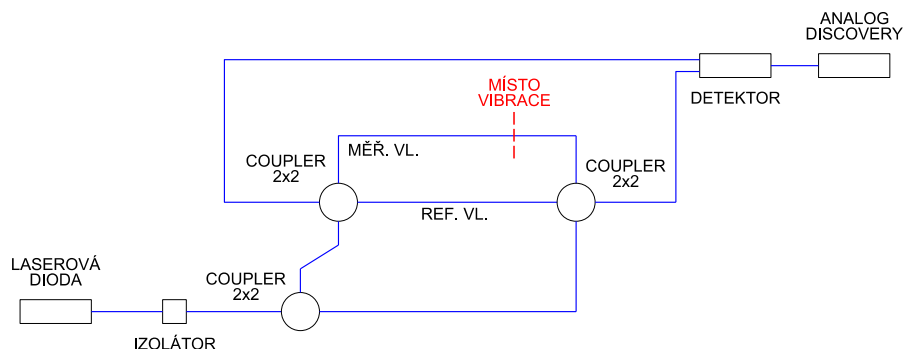
Obdobně jako u Michelsonova interferometru je potřeba vypočítat vzdálenost vibrace pro její lokalizaci. Získané hodnoty výskytu vibrace jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tab. 6.2: Tabulka místa vibrací pro Machův-Zehnderův interferometr

Typ zapojení	Mach-Zehnderův interferometr					
	2m		106m		3km	
Délka	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
1. Vibrace	1,7077	0,2923	84,2112	21,7888	2554,0541	445,9459
2. Vibrace	1,4127	0,5873	103,3142	2,6858	2918,9189	81,0811
3. Vibrace	1,0232	0,9768	81,9620	24,0380	2513,5135	486,4865

6.3.3 Lokalizace vibrace pomocí dualního Machova-Zehnderova interferometru

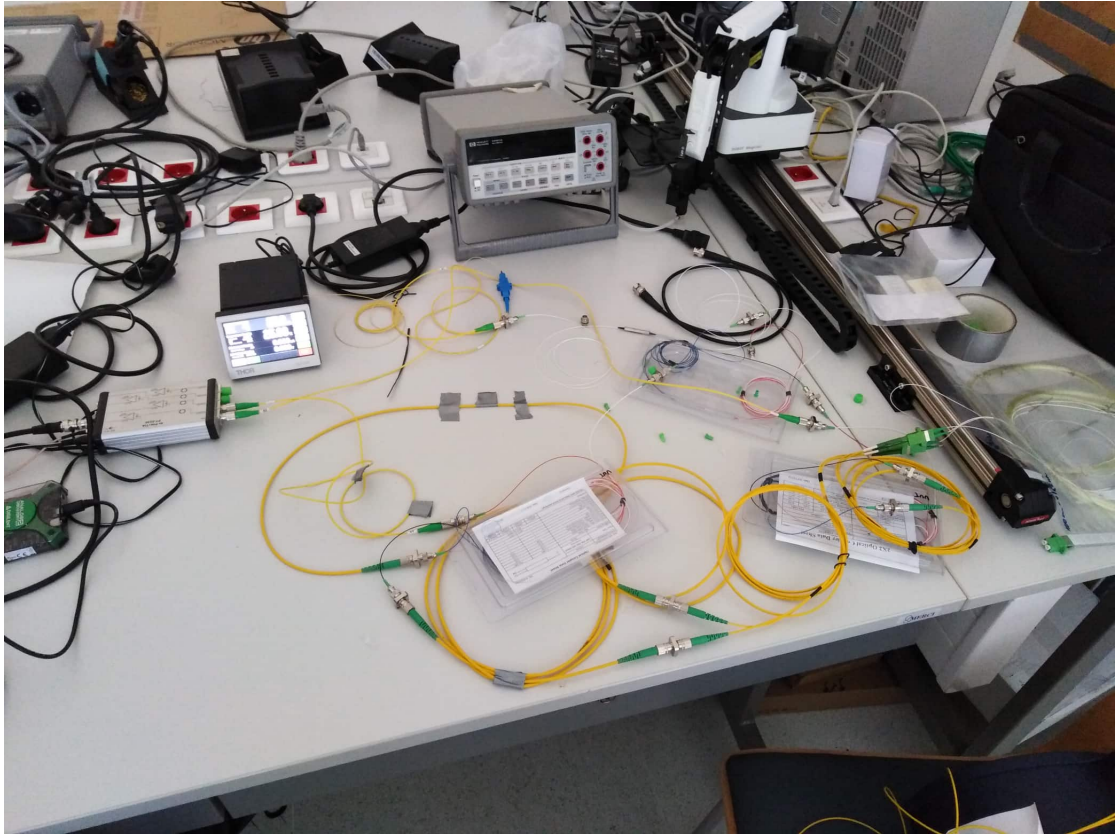
Trochu odlišnou metodou lokalizace vibrací je využití dualního nebo také dvoucestného Machova-Zehnderova interferometru. Tento typ interferometru se ve své podstatě skládá ze dvou klasických optických Mach-Zehnderových interferometrů, zapojených proti sobě. Díky tomu je získána vibrace, která byla lokalizovaná z obou směrů.



Obr. 6.13: Schéma zapojení dualního Machova-Zehnderova interferometru pro lokalizaci vibrací

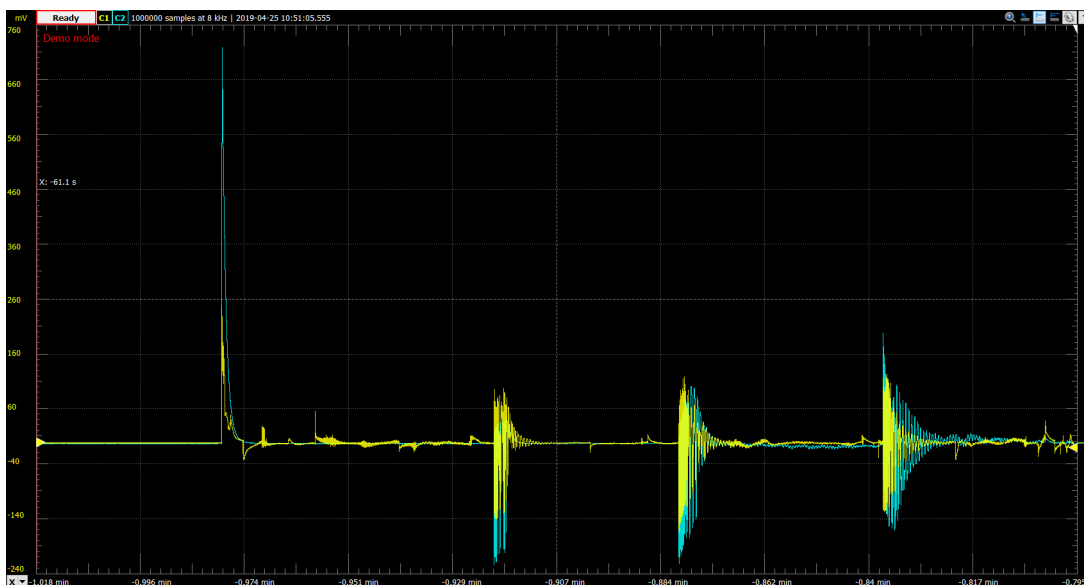
Princip činnosti tohoto interferometru je následující. Světelný svazek vyslaný laserovou diodou projde přes izolátor a následně je rozdělen pomocí coupleru 2x2 do dvou ramen. Pomocí těchto dvou ramen je světelný svazek přiveden na vstupy couplerů. Výstupy těchto couplerů tvoří společná ramena. Světelný svazek se rameny šíří v obou směrech, dokud nedorazí k protějším couplerům, kde je následně přiveden na detektor a vyhodnocen. Výsledkem jsou dva signály, na kterých jsou detekovány vibrace.

Reálné zapojení je na obrázku 6.14. Na něm lze vidět složení interferometru, laserovou diodu, izolátor, tři couplery 2x2 a detektor s Analog Discovery pro vyhodnocení výsledků.

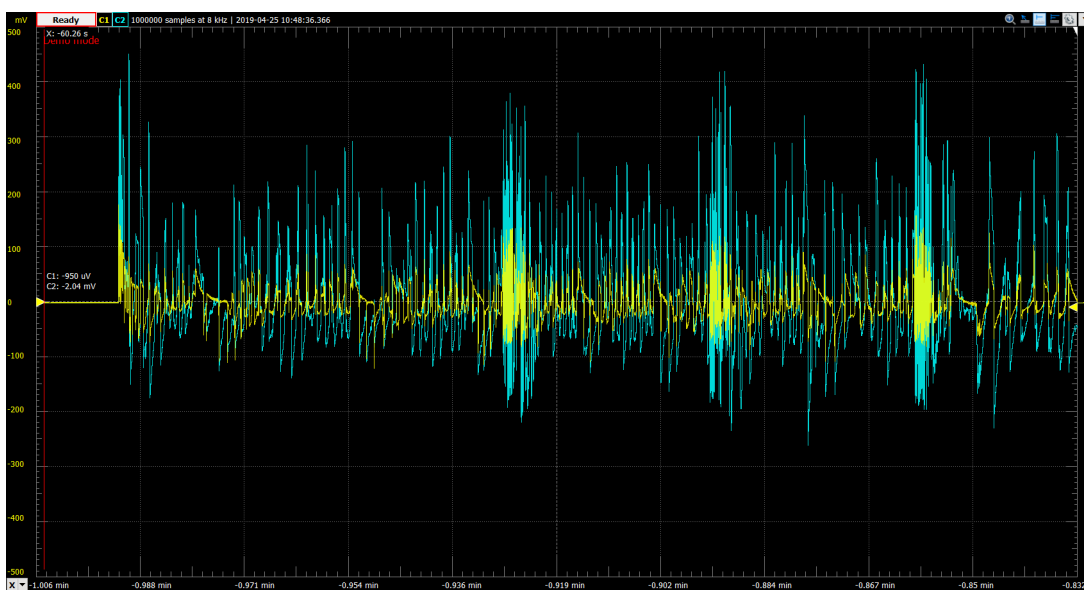


Obr. 6.14: Reálné zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru pro lokalizaci vibrací

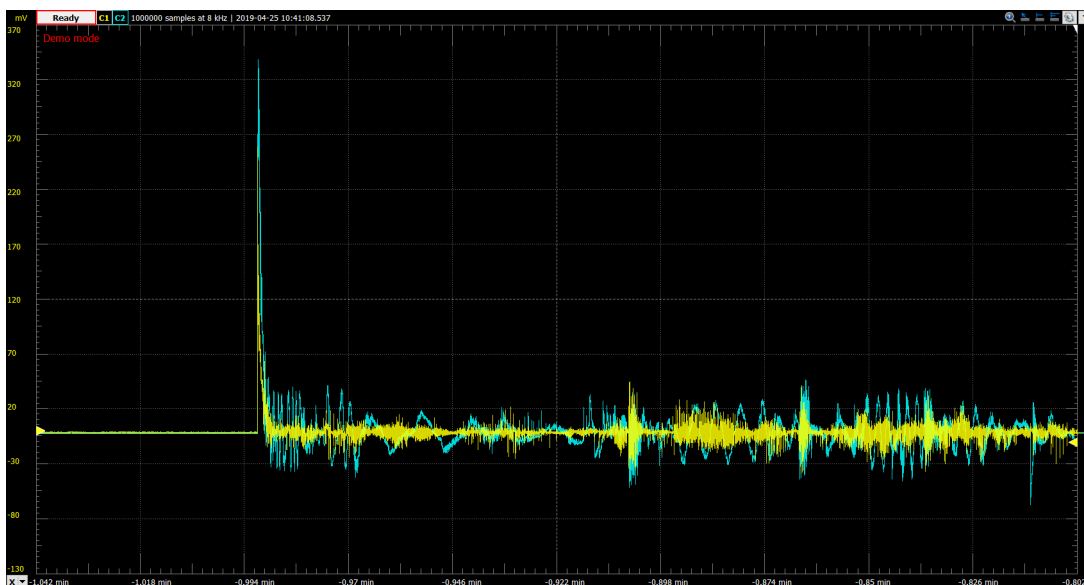
Výstupy z tohoto typu zapojení jsou zobrazeny na obrázcích 6.15 pro 2 m, 6.16 pro 106 m a na 6.17 pro zhruba 3 km.



Obr. 6.15: Výstup z AD zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru - 2m



Obr. 6.16: Výstup z AD zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru - 106m



Obr. 6.17: Výstup z AD zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru - 3km

První peak na grafech je způsobený startem laserové diody, další tři záchvěvy jsou lokalizované vibrace.

Tabulka 6.3 obsahuje vypočítané hodnoty umístění vibrací při použití duálního Machova-Zehnderova interferometru.

Tab. 6.3: Tabulka místa vibrací pro duální Machův-Zehnderův interferometr

Typ zapojení	Dvoucestný Mach-Zehnderův interferometr					
	2m		106m		3km	
Strana	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
1. Vibrace	1,6543	0,3457	96,3829	9,6171	2837,8378	162,1622
2. Vibrace	1,1679	0,8321	72,6168	33,3832	2756,7568	243,2432
3. Vibrace	1,9177	0,0823	92,3189	13,6811	1743,2432	1256,7568

7 Závěr

Diplomová práce se věnuje sensorům, které jsou schopny měřit vibrace s velkou přesností. V práci je obecně popsána problematika sensorů, co to senzory jsou, kde je možné se s nimi setkat a je zde uveden i rozdíl mezi senzory klasickými a optovláknovými.

Dále se práce věnuje interferometrům. Je zde krátce zmíněn optovláknový senzor na bázi Michelsonova interferometru. Větší důraz je však kladen na optovláknový senzor na bázi Michelsonova interferometru. Jsou zde popsány jeho součásti a princip funkce.

Jedna jeho součást, a to konkrétně couplery, je v práci velmi podrobně rozebrána, a to především z pohledu přesnosti. Jedná se o porovnání couplerů od různých distributorů a následné porovnání couplerů 2x2 a 3x3.

Pomocí matematického programu MatLab byla vytvořena simulace Michelsonova interferometru s couplerem 3x3 a využitím jako senzor. Bylo zhotoveno i měřící pracoviště, které bylo vytvořeno tak, aby odpovídalo zapojení Michelsonovu interferometru a využívalo coupler 3x3. Pro toto měření byly zvoleny dva způsoby zobrazování výsledků. Jedním bylo využití osciloskopu a druhým AnalogDiscovery prvku.

Z prvotních pokusů vycházel lépe z pohledu přesnosti senzor na bázi Michelsonova interferometru, který používal coupler 3x3, disponoval stabilnějším a citlivějším výsledným výstupem, ale z tabulkového porovnání couplerů 3x3 a couplerů 2x2 vychází lépe coupler 2x2.

Při podrobnějším měření a získáním naměřených hodnot byly vytvořeny grafy a z nich následně odečteny hodnoty, sloužící k porovnání přesností couplerů 2x2 a 3x3. Tyto hodnoty byly zakomponovány do tabulek 5.1 a 5.2 pro lepší přehlednost. Z těchto tabulek vyplývá, že coupler 3x3 je pro nižší frekvence, které ovlivňují měřené vlákno, přesnější než coupler 2x2. Při vyšších frekvencích, řádově stovkách, není již rozdíl tak patrný. Coupler 3x3 po celou dobu měření vykazoval větší stabilitu a umožňoval lokalizovat ovlivnění ramene s vysokou přesností, což se projevovalo při měření na proměnném signálu získaném z ramen a cirkulátoru, ale také na tabulkách přesností, kde při ideálním odchycení signálu měl jen nepatrný frekvenční rozdíl oproti frekvenci, kterou byl buzen reproduktor.

Měření pomocí AD při vstupním proudu 15 mA bylo pro nízké frekvence (2-100 Hz) nejpresnější, jelikož se naměřené frekvence blížily k nastavovaným frekvencím. Z výsledků je patrné, že naměřené frekvence pomocí AD (jak při 15 mA, tak i při 25 mA), nejsou příliš rozdílné a pro oba proudy se měřené frekvence blíží k frekvencím generátoru. U měření pomocí osciloskopu vycházely nejlépe výsledky při proudu 25 mA a měření frekvence 100 Hz a 1000 Hz, kdy se naměřené frekvence na každém

rameni nejvíce blížily k frekvenci reproduktoru a navíc byly všechny tři frekvence stejné. Z tohoto měření je možné říci, že i přes rušení vnějšími vlivy a neměření v ideálních podmínkách, záleží na vstupním proudu zdroje světelného záření, a tím na jeho výstupním výkonu, na velikosti měřené frekvence, kvalitě optovláknových součástí, dobré izolaci jednotlivých optických vláken od zdroje vibrací a na vyhodnocovacím a zobrazovacím zařízení. Výsledkem této práce je zjištění, že měření pomocí AD bylo přesnější díky schopnosti nasnímat více hodnot výsledného signálu oproti osciloskopu, který dokázal uložit pouze 600 hodnot. Při měření nízkých frekvencí je pro přesnější výsledky dobré použít zapojení s couplerem 3x3 a zdrojem světelného záření s minimálním vstupním proudem 25 mA.

Pro vyšší frekvence je vhodné použít jak zapojení s 2x2 tak i zapojení s 3x3 couplerem. Podle výsledků byla obě měření uspokojivá. Pro měření jakýchkoliv frekvencí je důležité použít zobrazovací zařízení s vysokým rozlišením, které též ovlivňuje výsledky měření.

Poslední část práce byla věnována měření a lokalizaci vibrací. Cílem bylo vymyslet metodu pro co možná nejpřesnější lokalizaci vibrace, která ovlivňuje optické vlákno. Měření bylo rozděleno na několik částí.

V prvním měření bylo pro vyhodnocování výsledků přistoupeno k využití osciloskopu. Postupně bylo měřeno zapojení optovláknového interferometru na bázi Michelsonova interferometru. Další měření byla zaměřena na využití Machova-Zehnderova interferometru, a to jak klasického, tak duálního. Postupně bylo měření prováděno na třech délkách optických vláken. Konkrétně se jednalo o délky 2 m, 106 m a 3 km.

Při měření pomocí osciloskopu byly výsledky nevyhodnotitelné. První vadou tohoto měření bylo nemožnost nahrávání zobrazovaných dat pro pozdější analýzu. Druhým problémem bylo, že používaný osciloskop neměl dostatečnou rozlišovací schopnost. Pro měření bylo nutné dosáhnout minimálně řádu nanosekund.

V druhém měření vibrací bylo pro zobrazení a následnou analýzu dat využito přístroje AnalogDiscovery. Stejně jako u předchozího měření pomocí osciloskopu byla i zde postupně vyměněna všechna tři zapojení interferometrů s různými délkami. AD oproti osciloskopu umožňuje děj postupně nahrávat a uložit jej k dalšímu zkoumání. Také disponuje poměrně dobrou rozlišovací schopností. Avšak pro získání přesnějších výsledků by bylo potřeba ještě vyšší.

Výpočet místa vibrace byl realizován rozdělením nahraného výstupu na jednotlivé průchody a průchod, ve kterém se vibrace nacházela, byl dále podroben analýze, ze které bylo určováno přesné místo vibrace na vlákně.

Výsledky měření ukazují, že při detekci na dvoumetrovém optickém vlákně, vychází nejpřesněji zapojení s klasickým optovláknovým Mach-Zehnderovým interferometrem. Při měření na 106 m byl nejpřesnější opět klasický Machův-Zehnderův optovláknový interferometr. Jako poslední byla přesnost vyhodnocena pro vlákno

3 km a na této délce byl jako v předešlých případech nejpřesnější klasický Machův-Zehnderův interferometr. Avšak rozdíly jsou příliš malé a bylo by potřeba podrobnější zkoumání s přesnějšími přístroji.

Zvolená metoda lokalizace vibrace je vhodná především pro měření a detekci vibrace na menší vzdálenosti, zde je přesnost všech interferometrů v řádech desítek centimetrů. Při zvyšující se délce trasy (optického vedení) jsou výsledky méně přesné.

Tyto nepřesnosti jsou zapříčiněny především nepřesným odečítáním časových hodnot z naměřené sekvence. Dále také nevelkým zaokrouhlováním při výpočtech, menší rozlišovací schopností vyhodnocovacího přístroje a vnějšími vlivy, jako jsou například záchvěvy podlahy při chůzi. U tříkilometrového vlákna vznikala chyba také tím, že nebyla obě ramena stejně dlouhá. Jedno z ramen mělo délku 3,076 km a druhé 3,005 km. S tím je spojen i rozdílný útlum vláken.

Literatura

- [1] Phoenix Photonics Limited. *Monolithic 3x3 Optical Fiber Couplers. 3x3_Coupler_V1_0603*. U6 Vulcan House, Restmor Way, Wallington, SM6 7AH, UK: Phoenix Photonics Limited, 2018.[cit. 10. 12. 2018]
- [2] REID, Gregory John. *A technique for multiplexing 3x3-coupler terminated interferometric fiber-optic sensors*. Monterey, California, 1993. Diplomová práce. Naval Postgraduate School. [cit. 10. 12. 2018]
- [3] PUSTAKHOD, D., X. JIANG, E.M. VAN VLIET, K.A. WILLIAMS a X.J.M. LEIJTENS. Characterization of 3x3 and 4x4 multimode interference couplers in InP generic photonic integration technology. *Proceedings of the 20th Annual Symposium of the IEEE Photonics Benelux Chapter* [online]. Belgie: OPERA-photonics, Brussels School of Engineering, 2015, s. 35-38 [cit. 2018-12-11]. ISBN 978-2-8052-0288-9. Dostupné z: <<https://pure.tue.nl/ws/files/19974352/characterization.pdf>>
- [4] SCHMITT, G., W. WENZEL a K. DOLDE. *Integrated optical 3x3-coupler on LiNbO3: comparison between theory and experiment* [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.821.3528&rep=rep1&type=pdf>>
- [5] Go4fiber. *SINGLEMODE COUPLER / TAP*. Go4fiber. Dostupné také z: <http://spec.go4fiber.com/coupler_wdm/Single_Coupler_Tap_2017v1.pdf>
- [6] OPLINK. *Single Window Single Mode Wideband Fiber Coupler*. OPLINK. Dostupné také z: <<http://www.oplink.com/uploads/files/b74b47cc2addc6ee06573e2f7dedff9f.pdf>>
- [7] THORLABS. *Wideband Fiber Optic Coupler*. THORLABS. Dostupné také z: <<https://www.thorlabs.com/drawings/79b3b8e64c2c5190-2BC5008F-9F62-1B11-6824DF03A6B560E0/TW1550R5F2-SpecSheet.pdf>>
- [8] KOPÁČ, Ondřej. *Optovláknový senzor na bázi Michelsonova interferometru*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT FEKT.
- [9] ROZSYPAL, Filip. *Simulace Machova Zehnderova interferometru*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT FEKT.
- [10] Microlab. *3x3 Hybrid Coupler, CM-81 series*. Microlab. Dostupné také z: <<http://www.admiral-microwaves.co.uk/pdf/microlab/CM-81.pdf>>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

PC	osobní počítač
FFT	rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier transform
AD	měřicí systém AnalogDiscovery

Seznam příloh

A Obsah přiloženého CD

64

A Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD je umístěna simulace v matematickém prostředí MatLab. Tato simulace obsahuje Michelsonův interferometr využitý jako senzor, který používá ke své funkci coupler 3x3. Dále jsou na přiloženém CD umístěny výstupy z měření přesnosti couplerů a také z lokalizace vibrací. Též se na něm nachází program GUI, který se používá pro výpočet přesnosti couplerů.

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── Lokalizace vibrací ..... Měření lokalizace vibrací
│   ├── 1_5z2MI.dwf3work
│   ├── 1_5z2MZ.dwf3work
│   ├── 1_5z2MZ2c.dwf3work
│   ├── 105_5z106MI.dwf3work
│   ├── 105_5z106MZ.dwf3work
│   ├── 105_5z106MZ2c.dwf3work
│   ├── 3000z3005MI.dwf3work
│   ├── 3000z3005MZ.dwf3work
│   └── 3000z3005MZ2c.dwf3work
├── Lokalizace vibrací ..... Měření přesnosti couplerů
│   └── AD ..... Výstupy získané pomocí AnalogDiscovery
│       ├── 2x2 ..... Výstupy z měření - coupler 2x2
│           ├── 1Hz.dwf3work
│           ├── 10Hz.dwf3work
│           ├── 100Hz.dwf3work
│           ├── 500Hz.dwf3work
│           ├── 1000Hz.dwf3work
│           └── 1500Hz.dwf3work
│       └── 15mA ..... Výstupy z měření na 15mA
│           ├── 1Hz-C.dwf3work
│           ├── 1Hz-R.dwf3work
│           ├── 5Hz-C.dwf3work
│           ├── 5Hz-R.dwf3work
│           ├── 10Hz-C.dwf3work
│           ├── 10Hz-R.dwf3work
│           ├── 50Hz-C.dwf3work
│           ├── 50Hz-R.dwf3work
│           ├── 100Hz-C.dwf3work
│           ├── 100Hz-R.dwf3work
│           ├── 200Hz-C.dwf3work
│           ├── 200Hz-R.dwf3work
│           ├── 500Hz-C.dwf3work
│           ├── 500Hz-R.dwf3work
│           ├── 1000Hz-C.dwf3work
│           ├── 1000Hz-R.dwf3work
│           └── 1200Hz-C.dwf3work
```


- └─ 10Hz.wfm
- └─ 100Hz.csv
- └─ 100Hz.wfm
- └─ 500Hz.csv
- └─ 500Hz.wfm
- └─ 1000Hz.csv
- └─ 1000Hz.wfm
- └─ 1500Hz.csv
- └─ 1500Hz.wfm
- └─ ref25.csv
- └─ ref25.wfm

└─ Simulace Simulace v prostředí MatLab

└─ SimMI.mdl