

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

DISTRIBUOVANÝ TEPLOTNÍ SENZOR

DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Holík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**
Ústav telekomunikací

Student: Tomáš Holík

ID: 164597

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Distribuovaný teplotní senzor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište možnosti snímání teploty pomocí optického vlákna. Při studiu se zaměřte především na distribuované systémy. Navrhněte distribuovaný senzor pro měření teploty, proveďte měření a vyhodnocení výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SANTOS, José Luis a Faramarz FARAHI. Handbook of optical sensors. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor, 2015, pages cm. ISBN 978-143-9866-856.

[2] UDD, Eric a William B SPILLMAN. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2011, xiii, 498 p. ISBN 978-047-0126-844.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Distribučované teplotní senzory jsou v současné době hojně používány. Používají se k měření teploty pomocí optického vlákna. DTS systémy měří teplotu podél celého optického vlákna. Optické vlákno je zde využíváno jako přímý zdroj informací, ne jako nosič. To znamená, optické vlákno je zde využito jako senzor měřící teplotu. Tato práce obsahuje návrhy měřicího systému DTS využívající Ramanův rozptyl a Machův-Zehnderův modulátor v jednojádřovém optickém vláknu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Distribučovaný teplotní senzor, jednojádřové optické vlákno, návrh měření DTS, optické vláknové senzory, Ramanův rozptyl, Machův-Zehnderův modulátor

ABSTRACT

Distributed temperature sensors are currently widely used. They are used for measuring temperature using optical fiber. DTS systems measure the temperature along the optical fiber. Optical fiber is used as a direct source of information, not as a carrier. That is, optical fiber is used as a sensor measuring the temperature. This work includes designs of the measuring system DTS using Raman scattering and Mach-Zehnder modulator in a single-mode fiber.

KEYWORDS

Distributed temperature sensing, single-mode optical fiber, DTS measurements proposal, optical fiber sensors, Raman scattering, Mach-Zehnder modulator

HOLÍK, Tomáš *Distribučovaný teplotní senzor*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Rok. 81 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Petr Münster, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/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(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Münsterovi , Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	12
1 Optické vláknové senzory	13
1.1 Základní zapojení OVS	14
1.2 Základní rozdělení OVS	15
2 Rozptyl záření	17
2.1 Rayleighův rozptyl	17
2.2 Ramanův rozptyl	18
2.2.1 Stokesova složka Ramanova rozptylu	20
2.2.2 Anti-Stokesova složka Ramanova rozptylu	21
2.3 Brillouinův rozptyl	23
3 Distribuované teplotní senzory	24
3.1 Měřicí metody DTS systémů	25
3.1.1 Měření pomocí OTDR	25
3.1.2 Měření pomocí OFDR	26
3.1.3 Měření pomocí Machova-Zehnderova modulátoru	27
3.2 Teplotní kalibrace DTS systému	28
3.3 Použití DTS	29
4 Návrh systému DTS	30
4.1 DTS využívající Ramanův rozptyl	31
4.1.1 Popis jednotlivých bloků zapojení	32
4.2 DTS využívající Machův-Zehnderův modulátor	37
4.2.1 Popis jednotlivých bloků zapojení	38
4.3 Výběr systému DTS	38
5 Výroba teplotní komory	39
5.1 Schéma zapojení kontroléru s displejem	40
5.2 Popis jednotlivých částí termokomory	40
5.2.1 Zdroj	40
5.2.2 Peltierův článek	40
5.2.3 Kontrolér Peltierova článku	41
5.2.4 Displej kontroléru Peltierova článku	41
5.2.5 Vodní chlazení s čerpadlem	41
5.2.6 Termistor, svorkovnice, chladicí pasta, tlačítka, přepínač	41

6	DTS využívající Machův-Zehnder. modulátor	43
6.1	Popis měření a uložení optického vlákna	44
6.1.1	Měření teploty při ustálené (nastavené) teplotě	45
6.1.2	Získané poznatky	56
6.1.3	Měření teploty s rychlou změnou teploty	57
6.1.4	Získané poznatky	68
7	Měření akustických vibrací	69
7.1	Schéma zapojení	70
7.2	Popis měření	71
7.3	Grafy získané měřením	71
7.4	Získané poznatky	74
8	Závěr	75
	Literatura	77
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	79
	Seznam příloh	80
A	Obsah přiloženého média	81

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Přímá metoda měření OVS [1, 7]	14
1.2	Reflektometrická metoda měření OVS [1, 7]	14
1.3	Intrinzitní OVS [2, 14]	15
1.4	Extrinzitní OVS [2, 14]	16
2.1	Rozptyl záření v OVS[4, 8]	17
2.2	Vznik Rayleighova rozptylu [8]	19
2.3	Vznik Ramanova rozptylu ve Stokesově oblasti [8, 9]	21
2.4	Vznik Ramanova rozptylu v anti-Stokesově oblasti[8, 9]	22
3.1	Blokové schéma OTDR [7, 16]	25
3.2	Blokové schéma Machova-Zehnderova modulátoru [13]	27
3.3	Blokové schéma kalibračního systému	29
4.1	DTS využívající Ramanův rozptyl	31
4.2	Blokové schéma EDFA	33
4.3	Cirkulator	33
4.4	DTS využívající Machův-Zehnderův modulátor	37
5.1	Celá sestava s vloženým optickým vláknem	39
5.2	Schéma zapojení kontroléru s displejem	40
5.3	Displej pro Peltierův kontrolér s tlačítky a potenciometrem	42
6.1	Termokomora se smotaným optickým vláknem	44
6.2	Průběh signálu pro 15 °C – ustálená teplota	45
6.3	Průběh signálu pro 20 °C – ustálená teplota	46
6.4	Průběh signálu pro 25 °C – ustálená teplota	46
6.5	Průběh signálu pro 30 °C – ustálená teplota	47
6.6	Průběh signálu pro 35 °C – ustálená teplota	47
6.7	Průběh signálu pro 40 °C – ustálená teplota	48
6.8	Průběh signálu pro 45 °C – ustálená teplota	48
6.9	Průběh signálu pro 50 °C – ustálená teplota	49
6.10	Průběh signálu pro 55 °C – ustálená teplota	49
6.11	Průběh signálu pro 60 °C – ustálená teplota	50
6.12	Spektrum signálu pro 15 °C – ustálená teplota	51
6.13	Spektrum signálu pro 20 °C – ustálená teplota	52
6.14	Spektrum signálu pro 25 °C – ustálená teplota	52
6.15	Spektrum signálu pro 30 °C – ustálená teplota	53
6.16	Spektrum signálu pro 35 °C – ustálená teplota	53
6.17	Spektrum signálu pro 40 °C – ustálená teplota	54
6.18	Spektrum signálu pro 45 °C – ustálená teplota	54
6.19	Spektrum signálu pro 50 °C – ustálená teplota	55

6.20	Spektrum signálu pro 55 °C – ustálená teplota	55
6.21	Spektrum signálu pro 60 °C – ustálená teplota	56
6.22	Průběh signálu pro 15 °C – rychlá změna teploty	57
6.23	Průběh signálu pro 20 °C – rychlá změna teploty	58
6.24	Průběh signálu pro 25 °C – rychlá změna teploty	58
6.25	Průběh signálu pro 30 °C – rychlá změna teploty	59
6.26	Průběh signálu pro 35 °C – rychlá změna teploty	59
6.27	Průběh signálu pro 40 °C – rychlá změna teploty	60
6.28	Průběh signálu pro 45 °C – rychlá změna teploty	60
6.29	Průběh signálu pro 50 °C – rychlá změna teploty	61
6.30	Průběh signálu pro 55 °C – rychlá změna teploty	61
6.31	Průběh signálu pro 60 °C – rychlá změna teploty	62
6.32	Spektrum signálu pro 15 °C – rychlá změna teploty	63
6.33	Spektrum signálu pro 20 °C – rychlá změna teploty	64
6.34	Spektrum signálu pro 25 °C – rychlá změna teploty	64
6.35	Spektrum signálu pro 30 °C – rychlá změna teploty	65
6.36	Spektrum signálu pro 35 °C – rychlá změna teploty	65
6.37	Spektrum signálu pro 40 °C – rychlá změna teploty	66
6.38	Spektrum signálu pro 45 °C – rychlá změna teploty	66
6.39	Spektrum signálu pro 50 °C – rychlá změna teploty	67
6.40	Spektrum signálu pro 55 °C – rychlá změna teploty	67
6.41	Spektrum signálu pro 60 °C – rychlá změna teploty	68
7.1	Schéma zapojení systému pro měření akustických vibrací	70
7.2	Průběh signálu pro 50 Hz	71
7.3	Průběh signálu pro 100 Hz	72
7.4	Průběh signálu pro 250 Hz	72
7.5	Spektrum signálu pro 50 Hz	73
7.6	Spektrum signálu pro 100 Hz	73
7.7	Spektrum signálu pro 250 Hz	74

SEZNAM TABULEK

4.1	Výkon zpětně odraženého signálu	35
-----	---	----

ÚVOD

Distribuované teplotní senzory (DTS – Distributed Temperature Sensing) využívají pro měření teploty optické vlákno. Takto konstruované teplotní senzory poskytují informace o teplotě po celé délce optického vlákna. Můžeme si to představit jako několik tisíc senzorů rozestých po celé délce vlákna. Principem měření je detekce zpětných rozptylů světla, a to buď detekce pomocí Brillouinova rozptylu světelného záření nebo pomocí Ramanova rozptylu světelného záření.

Systémy DTS byly objeveny v 80. letech 20. století. Ovšem výrazného rozmachu a zdokonalení těchto systémů dochází až v posledních desetiletích. DTS systémy jsou velmi přesné i na velké vzdálenosti. Typická rozlišovací schopnost je standardně $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 1 m , při rozlišení $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Velkou výhodou DTS systémů je jejich odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Uplatnění systémů DTS je v současné době velmi rozmanité.

Tato práce pojednává o optických vláknových senzorech, jejich rozdělení a využití. Dále se věnuje jednotlivým druhům rozptylů světelného záření, které se využívají k měření teploty podél optického vlákna (Rayleighův, Ramanův a Brillouinův rozptyl). Hlavní částí je popis systému DTS, jeho funkce, metody měření, kalibrace měřicího systému a využití těchto systémů v praxi.

První částí vypracování této práce jsou dva vlastní návrhy měřících systémů DTS. V této části jsou uvedena navržená bloková schémata pro snímání teploty. První se týká měřicího systému využívající Ramanův rozptyl v jednovidovém optickém vláknu a druhý využívá měření pomocí Machova-Zehnderova modulátoru.

Další částí je zpracování výsledků naměřených hodnot, pomocí měřicí metody využívající Machův-Zehnderův modulátor. Pro měření teploty bylo zvoleno dvojí měření. První spočívalo v měření ustálené nastavené teploty a to druhé spočívalo v rychlé změně měřené teploty.

Poslední část se zabývá měřením akustických vibrací. I když měření akustických vibrací nebylo cílem této bakalářské práce, ale mělo nám posloužit ke zjištění, do jaké míry vibrace ovlivňují měření teploty.

1 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

Na konci šedesátých let minulého století zažily optické vláknové senzory (dále jen OVS) velký rozvoj týkající se jejich používání. Ovšem kvůli velké finanční náročnosti nedošlo k jejímu hromadnému rozšíření ihned po celém světě. Postupem času se ovšem o OVS začalo zajímat čím dál více lidí, což bylo dáno i díky značnému snížení ceny. V dnešní době máme již třetí generaci měřících sensorů. Existuje celá řada fyzikálních veličin, které můžeme pomocí těchto sensorů měřit, jelikož optické vlákno vytváří díky svým vlastnostem nenahraditelné prostředí, které lze ovlivňovat různými veličinami. Nyní umíme měřit například tyto veličiny [4]:

Senzory fyzikálních veličin:

- teplota,
- tlak,
- tah,
- vibrace,
- posuv,
- mechanické napětí.

Senzory chemické a biochemické:

- pH,
- parciální tlak kyslíku.

Optický vláknový senzor je složen z optického vlákna, u kterého je již při výrobě určeno na jakou fyzikální veličinu bude citlivé a tudíž k měření jaké veličiny bude využito. Základní princip měření pomocí OVS: na začátku měřícího systému máme zdroj záření, kterým vysíláme světelný paprsek do optického vlákna a na konci systému je snímač záření (přímá metoda měření) a nebo měříme pomocí zpětných rozptylů (reflektometrická metoda měření), pomocí kterých tento světelný paprsek snímáme (viz další kapitola Rozptyl záření 2). Měřená fyzikální veličina způsobuje určité změny v optickém vlákne např. změna indexu lomu optického vlákna, absorpce, či emise (fluorescence).

Zdroj optického záření může být např. luminiscenční dioda, což je zdroj nekoherentního světelného záření a nebo laserová dioda, která je zdrojem koherentního světelného záření. Zdroj záření je charakterizován [2, 7]:

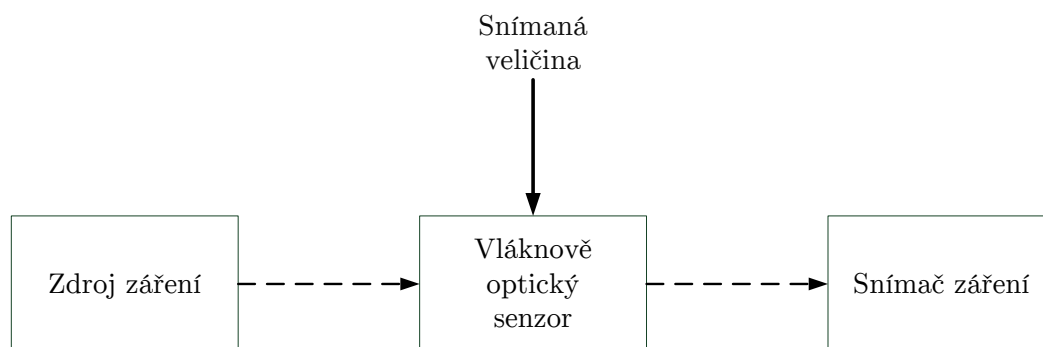
- vlnovou délkou λ ,
- šířkou pásma $\Delta\lambda$,
- optickým výkonem,
- stabilitou,
- druhem provozu (kontinuální, pulzní).

Snímačem světelného záření bývají nejčastěji použity fotodiody, lavinové diody, příp. PIN diody. Výběr typu diody závisí na požadované citlivosti, odstupu signál–šum, zisku a způsobu dalšího zpracování signálu [2, 7].

1.1 Základní zapojení OVS

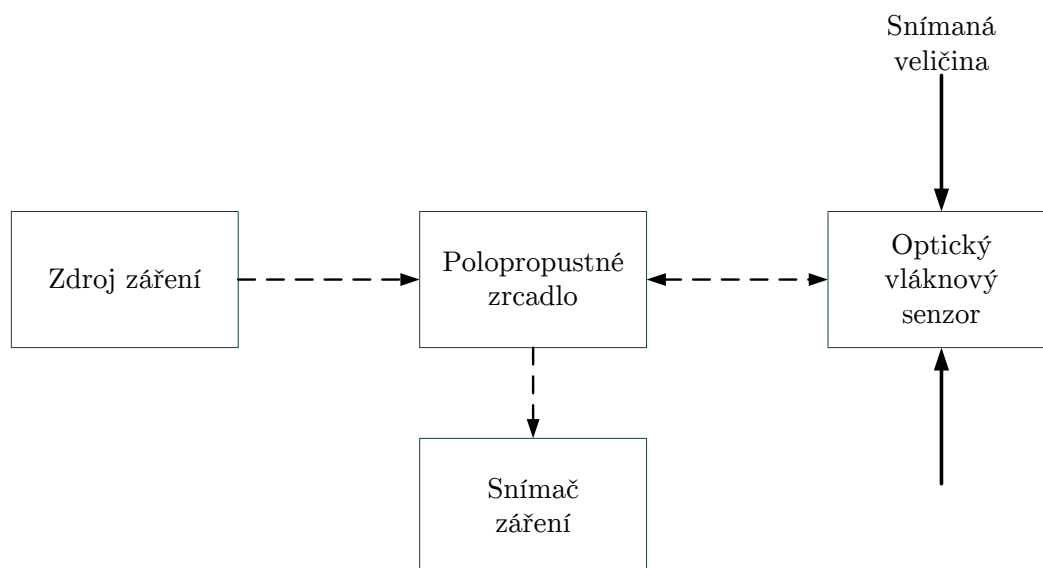
Podle metody měření lze OVS rozdělit do 2 skupin:

- přímá metoda měření (obr. 1.1) – dochází zde k přímému ovlivnění procházejícího paprsku měřenou fyzikální veličinou,



Obr. 1.1: Přímá metoda měření OVS [1, 7]

- reflektometrická metoda měření (obr. 1.2) – nevyužívá optický signál ze zdroje, nýbrž zpětných rozptylů světelného záření.



Obr. 1.2: Reflektometrická metoda měření OVS [1, 7]

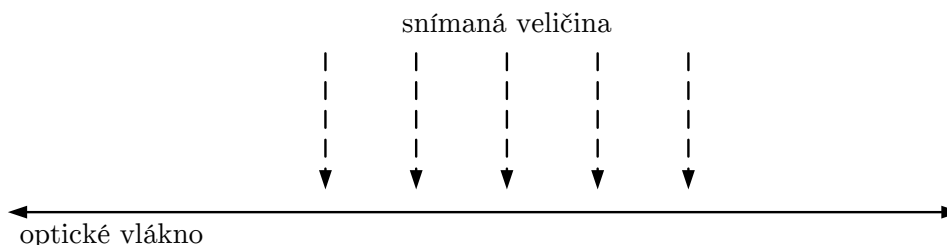
Na obr. 1.2 můžeme vidět polopropustné zrcadlo, které slouží k odklonění zpětně odraženého optického signálu na snímač záření. Měření zde probíhá tak, že do optického vlákna je vyslán optický signál, který se pomocí zpětného rozptylu šíří zpátky ke zdroji záření. Takto konstruovaný měřicí systém slouží k měření těžko dosažitelných, nepřístupných míst jako jsou např. jeskyně.

Místo polopropustného zrcadla se používají také jiná zařízení modulující optický signál. Může to být např. elastooptický prvek reagující na změnu tlaku, či teploty. V biomedicíně se jako modulátor využívá upravené optické vlákno, které má obnažené jádro. Na takto upravené optické vlákno působí antigen nebo protilátka přímo na jádro a tak dokáže zjistit v jakém množství, ale také v jaké intenzitě vir či bakterie na jádro působí. Principem takového měření je změna indexu lomu na přechodu, kde se aplikuje protilátka na daný vir. Důsledkem toho se změní útlum optického vlákna v daném místě v závislosti na působení protilátky na daný vir.

1.2 Základní rozdělení OVS

Rozdělení optických vláknových senzorů je možné z mnoha hledisek, protože existuje mnoho parametrů, dle kterých by se dalo rozdělení provést. Základní rozdělení OVS dle využití optického vlákna [7]:

- **intrinžitní (vnitřní)** – vlákno slouží jako snímač záření,

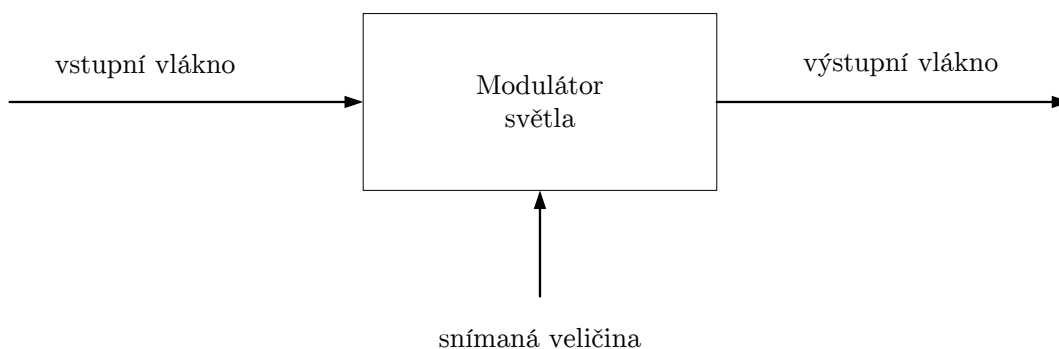


Obr. 1.3: Intrinžitní OVS [2, 14]

Na obr. 1.3 si můžeme všimnout **intrinžitního** OVS. Princip spočívá v přímém ovlivnění procházejícího paprsku v závislosti na velikosti působící snímané veličiny. Přes OVS se šíří tok fotonů, který je ovlivňován snímanou vnější veličinou (teplota, tlak apod.).

Užitečnou vlastností intrinžitních OVS je, že mohou poskytnout distribuované snímání na velmi velké vzdálenosti. Teplota zde může být měřena za použití vláken jako evanescenční ztráta měnící se s teplotou nebo analýzou Ramanova rozptylu.

- **extrinžitní (vnější)** – vlákno slouží pouze k přenášení informací.

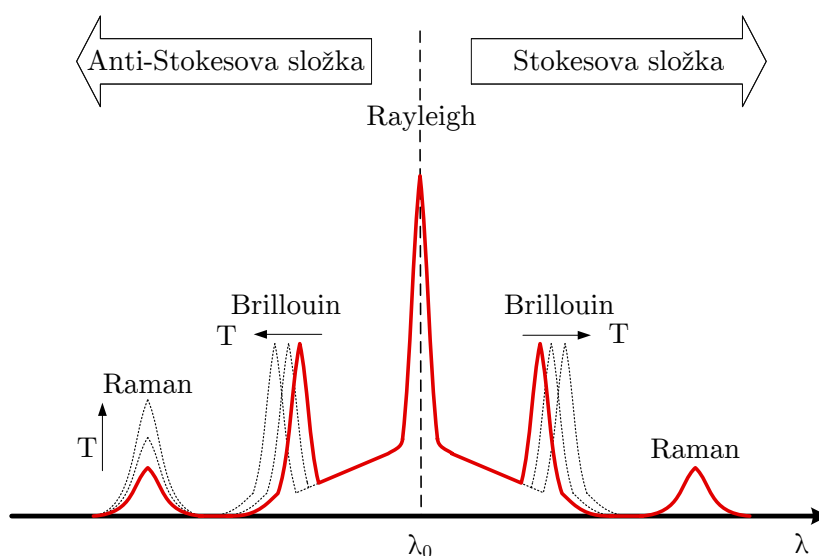


Obr. 1.4: Extrinžitní OVS [2, 14]

Extrinžitní OVS nevyužívají optické vlákno jako snímač světelného záření. Tyto OVS využívají optické vlákno pouze k přenášení informace potřebné k měření. Extrinžitní OVS se používají k měření rychlosti, zrychlení, vibrací, kroutícího momentu, teploty aj.

2 ROZPTYL ZÁŘENÍ

Rozptyl je fyzikální obecný proces, který vzniká odchýlením částic od rovné trajektorie směrem do prostoru. Při průchodu světelného záření zkoumanou látkou dochází k rozptylu záření, ale nejen k rozptylu, nýbrž i k absorpci záření, popřípadě fluorescenci. K rozptylu záření může dojít vlivem kolize, mezi světelným zářením a malými tuhými částicemi hmoty nebo na molekulách. V dalších částech práce budou popsány rozptyly, které vidíme na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Rozptyl záření v OVS[4, 8]

Fyzika rozlišuje dva druhy rozptylu:

- **Pružný** – při pružném rozptylu nedochází ke změně (ztrátě) energie. Mezi takto označované rozptyly patří např. Rayleighův rozptyl.
- **Nepružný** – při nepružném rozptylu dochází ke změnám energie. Mezi nepružné rozptyly patří např. Ramanův rozptyl.

2.1 Rayleighův rozptyl

O tento jev se zasloužil v roce 1899 anglický fyzik John William Strutt (nazýván také Lord Rayleigh). Ten vyšel z teorie, že světlo rozptylují přímo molekuly vzduchu a vypočítal, že energie rozptýleného světla silně závisí na vlnové délce tohoto světelného záření a to nepřímo úměrně její čtvrté mocnině a přímo úměrně osmé mocnině indexu lomu prostředí, kde se světelný paprsek láme. To znamená, že světlo červené

se rozptyluje méně než světlo modré s krátkou vlnovou délkou. Tím teoreticky popsal závislost modré oblohy, která vzniká průchodem slunečního světelného paprsku zemskou atmosférou.

Rayleighův rozptyl lze popsat Rayleighovým rozptylovým koeficientem [7]:

$$\gamma_R = \frac{8 \cdot \pi^3}{3 \cdot \lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot k \cdot T_f \quad [\text{m}^{-1}], \quad (2.1)$$

kde n značí index lomu, p je fotoelektrický koeficient, β_c označuje isothermální stlačitelnost, k je Boltzmanova konstanta ($1,380\,658 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), T_f značí fiktivní teplotu (pro oxid křemičitý SiO_2 je tato teplota rovna 1400 K).

Způsobený útlum Rayleighovým rozptylem α_R [7]:

$$\alpha_R = \frac{C_1}{\lambda^4} \quad [\text{dB}], \quad (2.2)$$

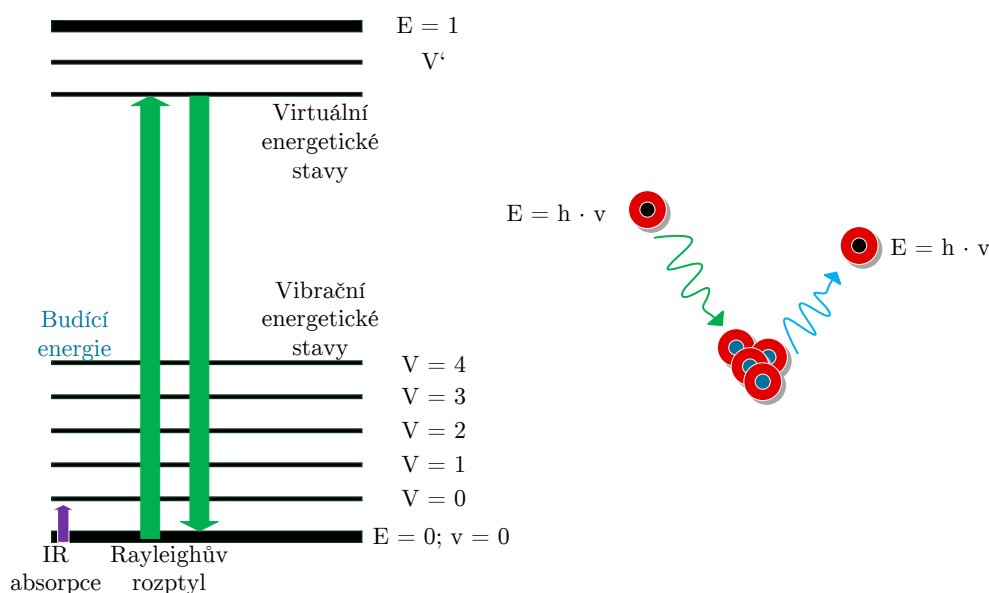
kde C_1 značí koeficient Rayleighova rozptylu ($0,802 \cdot 10^{-27} \text{ dB} \cdot \text{m}^3$ pro křemenné sklo).

Rayleighův rozptyl (obr. 2.2) je rozptyl pružný, nebo-li elastický. Princip Rayleighova rozptylu spočívá v pružné srážce fotonů vstupujícího světelného záření s molekulou měřené fyzikální veličiny. Při této pružné srážce se energie \mathbf{E} odraženého fotonu nezmění, což znamená, že u nově vzniklého rozptýleného světelného záření nedojde ke změně vlnové délky λ oproti záření vycházejícímu ze zdroje světelného paprsku.

Při srážce fotonu záření s molekulou se molekula na chvíli dostane na excitovanou vibrační energetickou hladinu, ale téměř ihned se vrací zpátky na počáteční energetickou hladinu. Jelikož zde nedochází k žádnému pohlcení, ba ani k emisi energie, má foton po srážce stejnou energii jako před srážkou a tudíž i stejnou vlnovou délku [8].

2.2 Ramanův rozptyl

Při zkoumání rozptylu světelného záření na molekulách, dojdeme k závěru, že většina rozptýleného záření má stejnou vlnovou délku jako původní světelné záření (Rayleighův rozptyl). Ovšem u malé části rozptýleného záření dochází ke změně vlnové délky oproti původnímu záření vyslanému ze zdroje záření. Tento jev se nazývá Ramanův rozptyl (nebo také kombinační rozptyl). Experimentálně tento jev prokázal v roce 1928 indický vědec Chandrasekhara Venkata Raman, po němž byl tento jev pojmenován a za něj získal v roce 1930 i Nobelovu cenu za fyziku.



Obr. 2.2: Vznik Rayleighova rozptylu [8]

Princip Ramanova rozptylu (jevu) je založen na nepružné srážce fotonu záření a molekul. Dopadající foton předá nebo naopak získá část své energie od molekuly. Při této nepružné srážce se nemění kinetická energie fotonů a molekul, ale mění se nám pouze vnitřní energie molekul, které jsou součástí nepružné srážky. Výsledkem této srážky je změna vibračně-rotačního stavu a to buď z nižšího stavu do vyššího nebo z vyššího stavu do nižšího. Takto vzniklé rozptylové záření má oproti budícímu záření rozdílnou frekvenci. Abychom mohli zaznamenat tuto změnu frekvence musíme používat pro buzení Ramanova rozptylu monochromatické záření [9, 17, 19].

Rozptýlené světlo Ramanova rozptylu vzniká teplotně ovlivněnými vibracemi molekul. Důsledkem toho nese zpětně rozptýlené záření informaci o teplotě v místě rozptylu. Ovšem ve skutečnosti má Ramanovo rozptýlené záření 2 frekvenčně posunuté složky a to: Stokesovu složku Ramanova rozptylu a Anti-Stokesovu složku Ramanova rozptylu (viz obr. 2.1). Amplituda Stokesovy složky není teplotně závislá, ovšem amplituda složky Anti-Stokesovy je silně teplotně závislá. Proto sensorové měření založené na Ramanově jevu vyžaduje odfiltrování důležitých frekvenčních složek, které nesou teplotní informaci. Teplota se následně získá porovnáním Anti-Stokesovy složky se složkou Stokesovou.

Výsledná intenzita spektrálních pásů ve Stokesově a v Anti-Stokesově oblasti Ramanova rozptylu závisí na množství molekul, které se nacházejí v základním a ve vyšším vibračně-rotacním stavu. Za normálních podmínek se nachází daleko větší množství molekul v základním vibračně-rotacním stavu než ve stavu vyšším vibračně-rotacním, nebo-li excitovaném. Ovšem pokud teplota vzroste, tak už tomu

tak není. Při růstu teploty se počet molekul, ve stavu vyšším vibračně-rotacním zvyšuje, oproti tomu ve stavu základním se zase počet těchto molekul snižuje.

Výsledkem těchto intenzit je vztah [8]:

$$\frac{I_{aS}}{I_S} = \frac{(v_0 + v_v)^4}{(v_0 - v_v)^4} \cdot e^{(-\frac{\Delta E}{k \cdot T})}, \quad (2.3)$$

kde I_{aS} je intenzita pásu v Anti-Stokesově oblasti, I_S intenzita pásu ve Stokesově oblasti, v_0 frekvence budícího světelného záření, v_v frekvence pásu spektrálního (frekvence Ramanova posunu), e Eulerovo číslo, ΔE rozdíl energií základního a excitovaného vibračně-rotacního stavu, k Boltzmannova konstanta, T termodynamická teplota.

Výkon signálu, při kterém začíná docházet ke zpětnému rozptylu, lze označit jako kritický výkon a ten lze vypočítat dle následujícího vzorce [7]:

$$P_{SRS} = (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot d^2 \cdot \lambda \cdot \alpha_{dB} \quad [\text{W}], \quad (2.4)$$

kde P_{SRS} je hodnota kritického výkonu navázaného do optického vlákna, d průměr jádra vlákna, α_{dB} měrný útlum, λ vlnová délka.

2.2.1 Stokesova složka Ramanova rozptylu

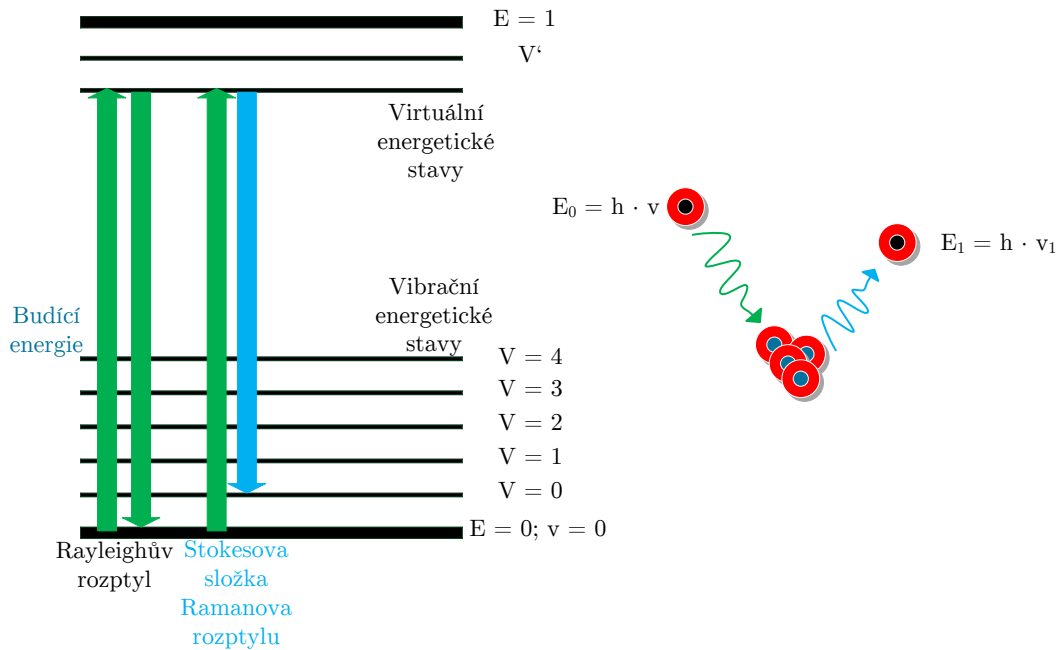
Jak již bylo uvedeno, základní princip Ramanova rozptylu spočívá v nepružné srážce fotonu a molekul. Při srážce se molekula dostane na virtuální energetickou hladinu a poté klesne směrem zpět na základní vibrační energetickou hladinu. Ovšem pokud neklesne na počáteční, nýbrž na hladinu, která je vyšší než ta počáteční, jedná se o tzv. Stokesovu oblast. U Stokesovy složky se jedná o posun směrem k nižším frekvencím, což ale znamená směrem k vyšším vlnovým délkám. Jelikož se bude jednat o snížení energie fotonu, předá foton část své energie (vzorec (2.5)) molekule, která má poté energii viz vzorec (2.6). Na konci má molekula tolik energie, kolik potřebuje k přechodu do vyššího vibračně-rotacního stavu, vzorec (2.7). Takto popsanou situaci můžeme vidět na obr. (2.3) [8, 9].

$$E_0 = h \cdot v_0, \quad (2.5)$$

$$E_1 = h \cdot v_1, \quad (2.6)$$

$$\Delta E = h \cdot (v_0 - v_1) = h \cdot \Delta v, \quad (2.7)$$

kde E_0 je energie fotonu před srážkou, h Planckova konstanta ($6,626\,070 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), v_0 frekvence fotonu před srážkou, E_1 energie fotonu po srážce, v_1 frekvence fotonu po srážce, ΔE úbytek energie fotonu způsobený srážkou (tento úbytek je roven energii potřebné k přechodu z nižšího do vyššího rotačně-vibračního stavu) a Δv frekvence Ramanova posunu (frekvence odpovídající pásu v Ramanově spektru) [8, 9].



Obr. 2.3: Vznik Ramanova rozptylu ve Stokesově oblasti [8, 9]

2.2.2 Anti–Stokesova složka Ramanova rozptylu

Anti–Stokesova složka Ramanova rozptylu (obr. 2.4) spočívá, taktéž jako Stokesova složka, v nepružné srážce fotonu a molekul. Zde molekula ovšem zůstane po nepružné srážce s fotonem v excitovaném vibračním energetickém stavu, který je vyšší než ten základní. Energie, kterou potřebujeme, abychom udrželi molekuly v excitovaném vibračním energetickém stavu, je fotonu odebrána (viz vzorec (2.9)). Následně má foton (po nepružné srážce) energii nižší, než byla energie před srážkou (vzorec (2.8)). V případě, že bude mít foton vyšší energii, získá energii od molekuly a výsledná hodnota této získané energie je stejná s energetickým kvantem, které molekula uvolní při snaze přejít z vyššího vibračně–rotačního energetického stavu na nižší. Na konci tohoto procesu má foton vyšší energii a tedy i vyšší frekvenci, což nám dokazuje vzorec (2.10) [8, 9].

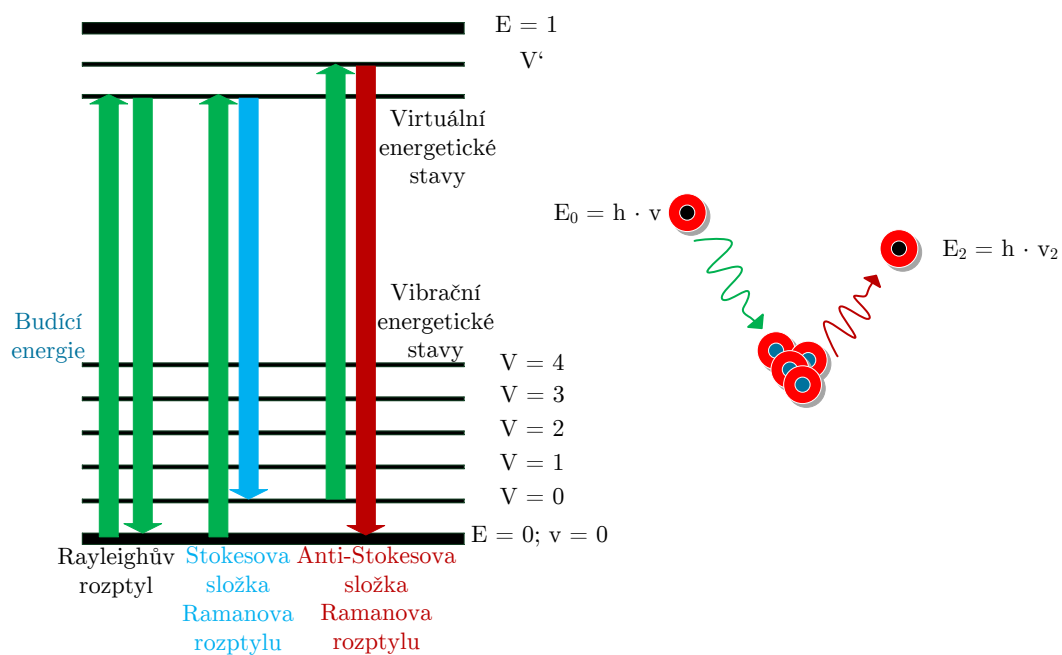
$$E_0 = h \cdot v_0, \quad (2.8)$$

$$E_2 = h \cdot v_2, \quad (2.9)$$

$$\Delta E = h \cdot (v_0 + v_2) = h \cdot \Delta v, \quad (2.10)$$

kde E_0 je energie fotonu před srážkou, h Planckova konstanta, v_0 frekvence fotonu před srážkou, E_2 energie fotonu po srážce, v_2 frekvence fotonu po srážce, ΔE úbytek energie fotonu způsobený srážkou (tento úbytek je roven energii uvolněné při

přechodu díky srážce z vyššího do nižšího vibračně–rotačního stavu) a $\Delta\nu$ frekvence Ramanova posunu (frekvence odpovídající pásu v Ramanově spektru) [8, 9].



Obr. 2.4: Vznik Ramanova rozptylu v anti-Stokesově oblasti[8, 9]

2.3 Brillouinův rozptyl

Brillouinův rozptyl je způsoben tepelně excitovanými akustickými vibracemi, kdy je světelný paprsek podél celého optického vlákna. Tento rozptyl je zařazen do kategorie nelineárních rozptylů, které pracují s frekvenčním posunem rozptýleného světla. Akustické vibrace zvyšují tok energie záření a rozptyl vlny. Rozdíl frekvencí bývá v řádu GHz. Ta se liší i při změně teploty, či deformaci. Pokud bychom měli porovnat měření pomocí Ramanova rozptylu a Brillouinova rozptylu, dojdeme k závěru, že Brillouinův rozptyl je podstatně přesnější, stabilnější a také častěji využívanější [17, 19].

V optickém vlákne se Brillouinův rozptyl vyskytuje ve 2 typech [6, 8]:

- **Spontánní Brillouinův rozptyl** – vzniká v každém optickém vláknu při působení akustických vln na optické vlákno, taková hodnota bývá o 30 dB nižší než hodnota Rayleighova rozptylu.
- **Stimulovaný Brillouinův rozptyl** – vzniká při působení akustických, či mechanických vibrací a také při působení optického záření o nadkritické hodnotě výkonu (mW) pro dané vlákno. V místě, kde dojde k působení všech veličin, dojde ke změně indexu lomu. Zde se oddělí foton od šířícího se světelného záření a směřuje poté opačným směrem, než kterým putovalo světelné záření. Jelikož foton putuje opačným směrem, je rozdílně frekvenčně posunut oproti původnímu světelnému záření.

Jelikož je stimulovaný Brillouinův rozptyl mnohem účinnější než spontánní Brillouinův rozptyl, bývá častěji využíván k měření v technice distribuovaného snímání fyzikální veličiny [18].

Podobně jako u Ramanova rozptylu lze vypočítat hodnotu kritického výkonu i u Brillouinova rozptylu. Jedná se zde také o výkon signálu, při kterém dojde ke zpětnému rozptylu [7]:

$$P_{\text{SBS}} = (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot d^2 \cdot \lambda^2 \cdot \alpha_{\text{dB}} \cdot v \quad [\text{W}], \quad (2.11)$$

kde P_{SBS} je hodnota kritického výkonu navázaného do optického vlákna, d průměr jádra vlákna, α_{dB} měrný útlum, λ vlnová délka, v šířka pásma.

3 DISTRIBUOVANÉ TEPLOTNÍ SENZORY

Distribuované teplotní senzory (DTS – Distributed Temperature Sensing) jsou senzory, které jsou schopny pomocí optického vlákna měřit mechanické napětí nebo teplotu. Optické vlákno využívající systém DTS představuje obrovské množství měřících senzorů, které nám slouží k poskytnutí zpracované informace o teplotním profilu podél celého optického vlákna [15]. Jelikož jsou DTS systémy ještě poměrně mladé, lze od nich v budoucnu očekávat mnoho skvělých využití. Mezi přednosti systému DTS bezpochyby patří [8]:

- odolnost vůči elektromagnetickému rušení,
- odolnost vůči agresivnímu prostředí (použití speciálních kabelů),
- okamžité zjištění místa změny teploty, tlaku, či poruchy,
- snadná instalace, téměř žádná údržba, dlouhodobé monitorování,
- odečítání několika tisíců hodnot naměřených najednou,
- dosažení velkých vzdáleností.

Nejčastěji se DTS systémy měří pomocí reflektometrů, ovšem výsledkem této práce je měření akustických vibrací a teploty pomocí Machova-Zehnderova modulátoru (kapitola 3.1.3). K měření pomocí reflektometrů se využívají dvě metody: optická reflektometrie v časové oblasti (OTDR – Optical Time Domain Reflectometry) nebo optická reflektometrie ve frekvenční oblasti (OFDR – Optical Frequency Domain Reflectometry). Více využívaná je metoda OTDR, ovšem tato metoda nemůže být použita na krátké úseky, protože by potřebovaly extrémně rychlou odezvu použitých prvků. Princip měření optického reflektometru (OTDR) spočívá ve vyslání světelného záření (impulzu) do optického vlákna. Výkon zdroje bývá v řádu mW a šířka impulzu většinou 10 nanosekund. Část světelného impulzu se vlivem nepružné srážky fotonu a molekul vrací prostřednictvím rozptylu směrem zpátky (ke zdroji záření) na detektor systému DTS. Rozptyly, které se vracejí zpět jsou tzv. nelineární jevy. Mezi takto označované jevy patří Ramanův a Brillouinův rozptyl (viz kapitola 2 Rozptyl záření). Dělení DTS systémů bývá dle konstrukce zapojení měřícího systému v závislosti na použitém druhu rozptylu záření. Pro měření Ramanova rozptylu se nejčastěji využívá mnohovidové optické vlákno s velkou hodnotou numerické apertury za účelem maximalizování vedené intenzity zpětně odraženého světelného impulzu. Ovšem cílem této práce je měření teploty pomocí jednovidového optického vlákna. Dosah systémů využívajících Ramanova rozptylu je ovlivněn poměrně vyšší útlumovou charakteristikou mnohovidového vlákna (8–10 km). Oproti tomu systémy využívající Brillouinův rozptyl záření, který k měření používá jednovidové optické vlákno, jsou schopny měřit mechanické napětí i teplotu až do vzdáleností 100 km. Rozlišitelnost systémů DTS bývá standardně 1 m s přesností

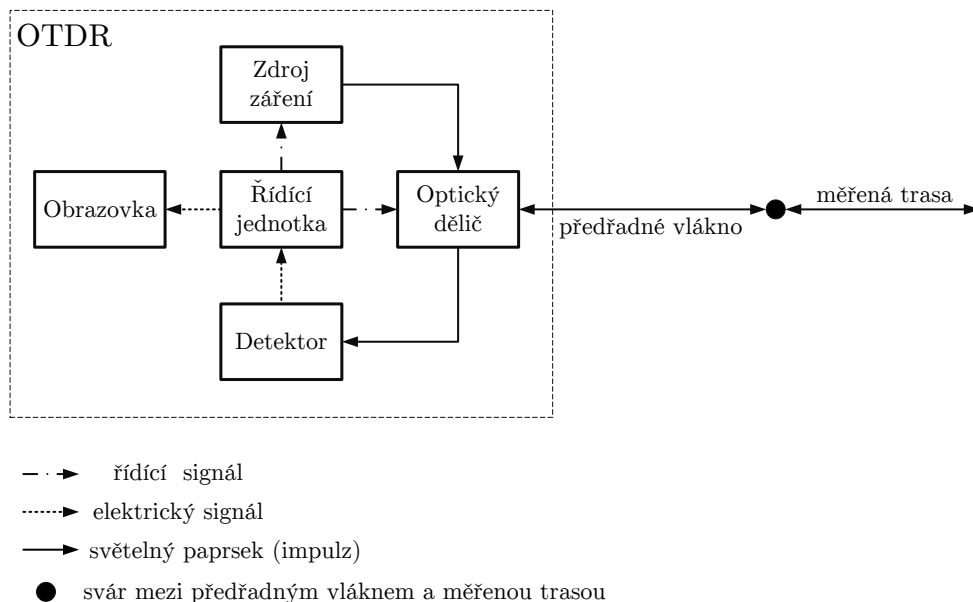
1 °C, při rozlišení 0,01 °C. U extrémních systémů bývá tato schopnost rozlišitelnosti 0,5 m při rozlišení 0,05 °C. DTS systémy jsou velice přesné a spolehlivé [8, 15].

3.1 Měřící metody DTS systémů

3.1.1 Měření pomocí OTDR

Jak již bylo řečeno, měření DTS systémů probíhá nejčastěji pomocí reflektometru OTDR. Tato metoda je nejrozšířenější metodou měření zpětných rozptylů. Metoda nám umožňuje určit místo, kde nám měřená fyzikální veličina ovlivňuje optické vlákno. Z toho plyne, že tato metoda vyhodnocuje časovou závislost zpětně rozptýleného optického výkonu při šíření úzkého optického impulsu optickým vláknem. Využívá při tom Rayleighova rozptylu a Fresnelova odrazu (tlumení). Tento Fresnelův odraz vzniká v případě, kdy dopadne optické záření na spojení dvou prostředí s rozdílnými indexy lomu. Fresnelův odraz tudíž může vzniknout v případě, kdy připojíme konektory nebo optické spojky na počátku i na konci optického vlákna nebo v místě svařované spojky. Pomocí Fresnelova odrazu lze tedy zjistit a následně rychle opravit nepřípustné problémy na optickém vlákně, to je výhodné zejména při zjišťování poruchy na optickém vlákně, které je zakopáno pod povrchem (nemusí se vykopat celá cesta vlákna) [18].

Základní blokové schéma měřícího systému OTDR:



Obr. 3.1: Blokové schéma OTDR [7, 16]

Na obr. 3.1 můžeme vidět blokové schéma zapojení reflektometru OTDR. Zdrojem záření se rozumí laser, který je schopen vysílat světelné záření o různých délkách. Obecně to bývají desítky nanosekund až desetiny sekund. Frekvence laseru bývá v jednotkách kHz. Šířka vyslaného impulsu je závislá na délce optické trasy, a proto šířka impulsu roste s rostoucí délkou měřené optické trasy. Optický dělič nám slouží k propouštění měřícího signálu ze zdroje záření do měřené optické trasy. Zpátky odražené signály, či rozptýlené signály ovšem nepropouští, nýbrž jen odkloní na detektor světelného záření. Detektor slouží k převedení optického signálu na elektrický signál. Tento elektrický signál je dále zpracováván. Výsledky si můžeme nechat zobrazit např. na obrazovce nebo prostřednictvím počítače. V blokovém schématu je uvedeno předřadné vlákno, to má zde velmi důležitou funkci. Jelikož každý měřící přístroj využívající metodu reflektometru OTDR obsahuje tzv. mrtvou zónu (vzniká např. Fresnelovým odrazem). Tato mrtvá zóna představuje určitou vzdálenost od přístroje, kde nelze provést přesné měření. Předřadné vlákno plní funkci ochrany měřícího zařízení v případě, kdy je měřící vlákno porušeno v blízkosti měřícího systému. To by způsobilo odraz a měřící signál by se odrazil ihned zpátky na detektor záření. Je zde umístěno také proto, aby měření na měřeném optickém vláknu začalo ihned od svého začátku [7, 8].

Výkon světelného záření, který se šíří vlivem světelného rozptylu zpátky ke zdroji záření [8]:

$$P_b(z) = \frac{1}{2} \cdot P_0 \cdot \Delta t \cdot S \cdot \alpha_R \cdot v_g \cdot e^{(-2 \cdot \alpha_{dB} \cdot z)} \quad [\text{dB}], \quad (3.1)$$

kde P_0 je výkon obdélníkového impulsu, Δt šířka obdélníkového impulsu, S koeficient zpětného rozptylu, α_R činitel ztrát Rayleighovým rozptylem, v_g skupinová rychlost šíření signálu, α_{dB} střední hodnota koeficientu útlumu vlákna na délce (z) v dopředném a zpětném směru.

Zpětně rozptýlený výkon světelného záření vypočítaný dle vzorce (3.1) nám slouží ke zvolení správných detekujících součástí.

3.1.2 Měření pomocí OFDR

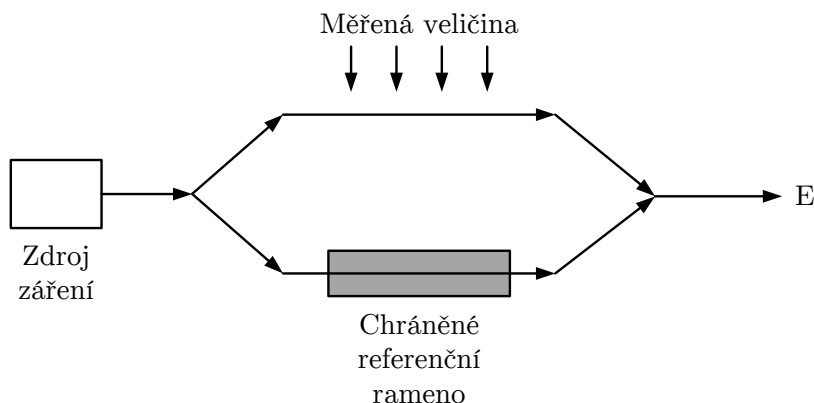
Principem metody OFDR je vyhodnocování frekvenčně modulovaného světelného záření vyslaného laserem do optického vlákna. Optický signál je frekvenčně ovlivňován generátorem pilových impulsů. Záření, které je zpětně rozptýleno, se smíchává se signálem vstupním. Výsledkem je změna spektra zpětně rozptýleného signálu oproti původnímu vyslanému signálu do vlákna v místě, kde působí snímaná fyzikální veličina [2].

Metoda měření OFDR se vyskytuje ve dvou typech:

- **Koherentní metoda OFDR** – umožňuje dosáhnout frekvenčního posunu až 1 kHz na 1 centimetr optického vlákna. Jsou ovšem náročnější na použití optoelektronických součástí, ale výhodou zase je jejich širší uplatnění. Prostorová zesilovací schopnost založená na této metodě je u OVS cca 3 mm. Použití např. diagnostika optických integrovaných obvodů.
- **Nekoherentní metoda OFDR** – využívá: frekvenční modulaci amplitudově modulované nosné vlny, přímou modulaci polovodičového laseru nebo použití externích amplitudových modulátorů.

Metodu OFDR lze využít i tam, kde jsou využity krátké úseky optického vlákna, což by nebylo možné při využití metody měření jako je OTDR, jelikož tato metoda by potřebovala extrémně rychlou odezvu optoelektronických součástí [2].

3.1.3 Měření pomocí Machova-Zehnderova modulátoru



Obr. 3.2: Blokové schéma Machova-Zehnderova modulátoru [13]

Na obr. 3.2 můžeme vidět princip Machova-Zehnderova modulátoru, který představuje interferometrický senzor s optickým vláknem. Princip Machova-Zehnderova modulátoru spočívá ve dvou cestách (ramenech), které musí být stejně dlouhé. Jedno z ramen je vystaveno měřené veličině, která bývá např. tlak, popř. teplota, a to druhé rameno, tzv. referenční, od kterého jsou porovnávány změny, které způsobí měřená veličina. Principem měření je tedy změna indexu lomu světla v ramenu, které je vystaveno měřené veličině, oproti referenčnímu ramenu. Výsledkem je změna výstupní úrovně, která je důsledkem optické interference mezi signály z těchto dvou ramen [13].

Pokud vyšleme světelný signál (o stejných parametrech a stejným polarizačním stavem) do obou ramen, dostaneme na výstupu součet dvou amplitud elektrického pole:

$$E_T = E \sin \omega t + E \sin(\omega t + \varphi) \quad [\text{V}], \quad (3.2)$$

kde φ je fáze ramene, které je ovlivněno měřenou veličinou.

Intenzita přijatého světelného signálu pomocí fotodetektoru bude úměrná druhé mocnině absolutní hodnoty výstupní energie:

$$|E_T|^2 = E^2(1 + \cos \varphi) \quad [\text{V}], \quad (3.3)$$

nebo

$$I_T = I(1 + \cos \varphi) \quad [\text{V}], \quad (3.4)$$

kde I je intenzita světelného paprsku.

Nezbytná podmínka pro správný provoz Machova-Zehnderova modulátoru je tzv. kvadrurní podmínka, tj. změna I_T bude největší, pokud bude φ na hodnotě $\pi/2$.

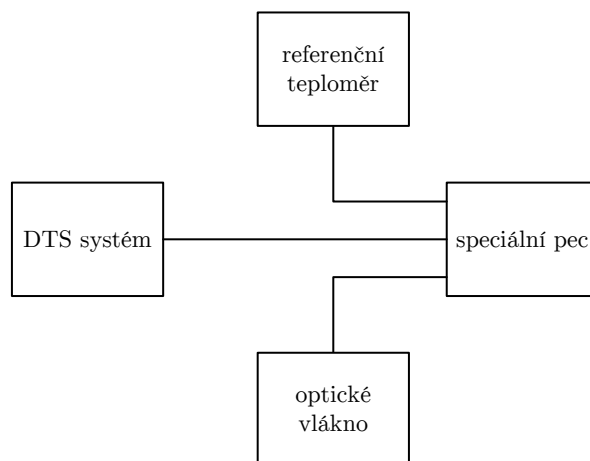
$$dI_T = -I \sin \varphi d\varphi \quad [\text{V}], \quad (3.5)$$

V případě dodržení dvou podmínek, nedochází ke snížení citlivosti měření. Tyto podmínky zní: velikost koherence zdroje musí být vyšší, než rozdíl v optické dráze měřené veličiny, a dva paprsky by měly vzniknout se stejným polarizačním stavem.

Největší výhodou Machova-Zehnderova modulátoru je jeho nezávislost na jakýchkoli účincích společného režimu na hlavních vláknech (Mach-Zehnder zdroj, Mach-Zehnder detektor), neboť toto uspořádání nemění vztah mezi těmito dvěma signály. Speciálními případy Machova-Zehnderova modulátoru je např. Michelsonův interferometr, či optovláknový gyroskop [13].

3.2 Teplotní kalibrace DTS systému

Nejdůležitějším krokem pro přesné měření je správné nastavení systému DTS a jeho kalibrace. Ke kalibraci DTS systému se využívá speciální pec (teplotní komora), příp. teplotní lázně, pomocí kterých můžeme přesně odečíst teplotu spolu s referenčními teploměry. Takto konstruovaný systém pro kalibraci systému DTS můžeme vidět na obr. 3.3. Princip kalibrace spočívá v uložení části předřadného kabelu do speciální pece a pomocí referenčního teploměru se zkoumá, zda teplota změřená pomocí tohoto teploměru odpovídá teplotě změřené pomocí DTS systému. Pokud však ne, musí se vše nastavit správně tak, aby teplota změřená pomocí optického vlákna odpovídala teplotě na referenčním teploměru [8, 15].



Obr. 3.3: Blokové schéma kalibračního systému

3.3 Použití DTS

Systémy využívající DTS mají velmi širokou škálu použití. Tyto systémy se používají všude tam, kde je důležité kontrolovat teplotu např. nějakého přístroje. Nejčastěji bývají využity v místech, kde změna teploty může znamenat selhání systému. Využití DTS systémů [15]:

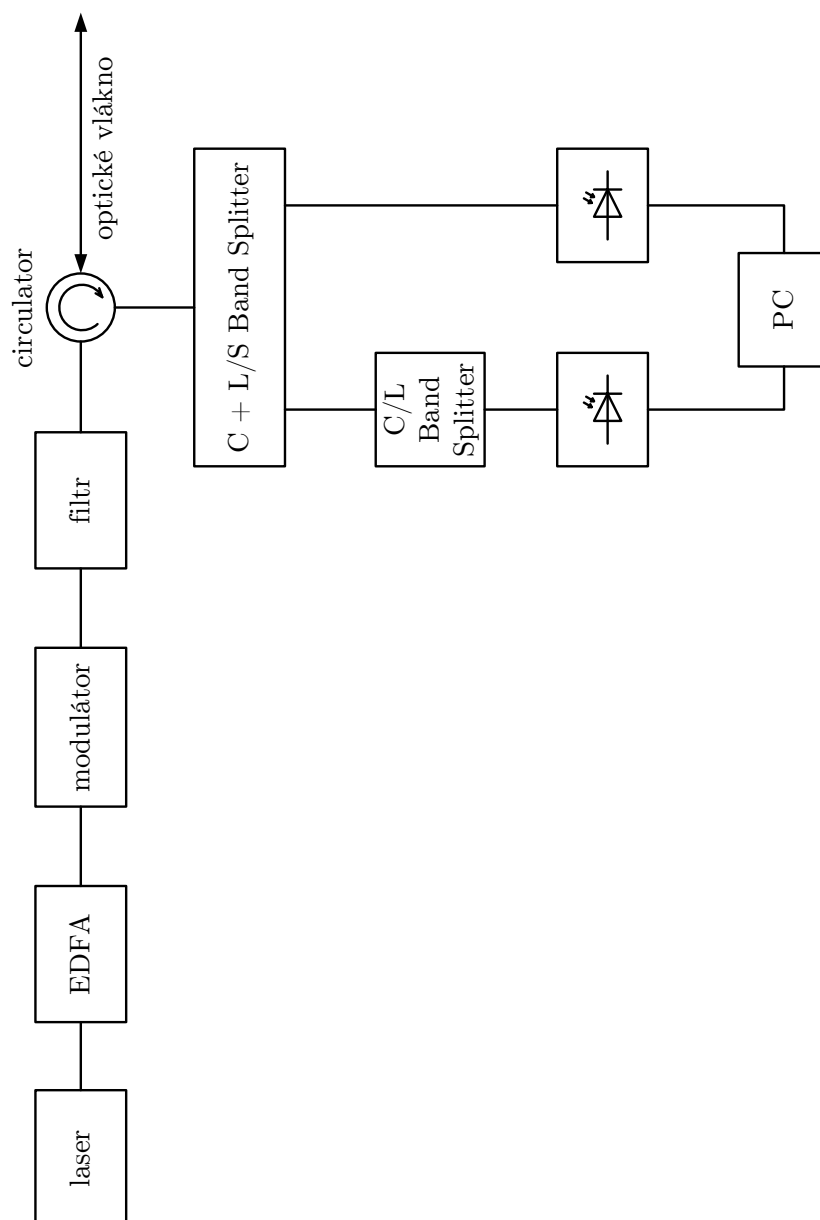
- Monitorování energetických kabelů, to umožňuje odhalit přetížená místa. Pomocí takto získaných hodnot lze kontrolovat a korigovat místa s přetížením a optimalizovat distribuční síť.
- Monitorování ve stavebnictví (tuhnutí betonu), výrazně napomáhá k výzkumu nových (rychle-tuhnoucích) betonových směsí, tzn. k urychlení staveb.
- Monitorování produktvodů, slouží k odhalení prosakování, či dokonce prasknutí potrubního vedení.
- Monitorování pozemních komunikací, v současnosti se v automobilovém průmyslu hovoří převážně o bezpečnosti na cestách, a proto se systémy mohou začít využívat (podél cest) jako senzory detekující náledí apod.
- Monitorování teploty vinutí transformátorů.
- Monitorování propustnosti hrází vodních nádrží apod.

4 NÁVRH SYSTÉMU DTS

Tato kapitola se zabývá dvěma návrhy měřícího systému pro měření teploty pomocí jednovidového optického vlákna (přesněji optického vláknového senzoru):

- DTS využívající principu Ramanova rozptylu,
- DTS využívající principu Machova-Zehnderova modulátoru.

4.1 DTS využívající Ramanův rozptyl



Obr. 4.1: DTS využívající Ramanův rozptyl

4.1.1 Popis jednotlivých bloků zapojení

Laser

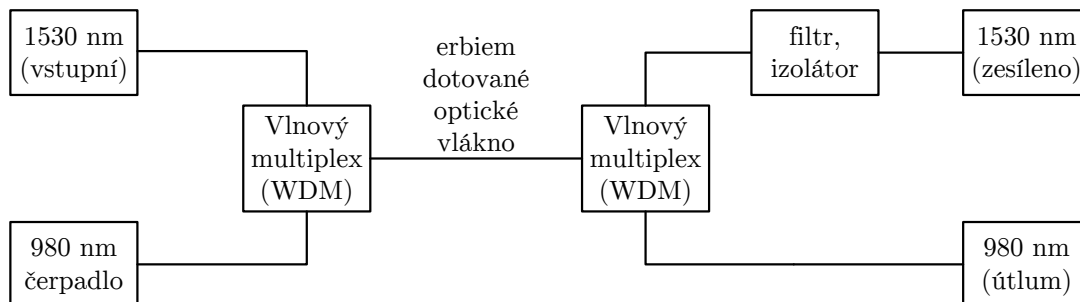
Slovo LASER (Light Amplification by Stimulated Emission od Radiation) znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření. K zesílení světla dochází opakovanými průchody fotonů médiiem se specifickými vlastnostmi.

Ke generování světelného záření bude sloužit tzv. kontinuální vláknový laser. Energie výstupního paprsku laseru v kontinuálním režimu se blíží její průměrné hodnotě. Tudíž ve zdroji nedochází k tak radikální akumulaci energie a následným výkonovým výkyvům systému, a proto je záření spíše lineární než pulzní. Obecně jsou lasery optické oscilátory, které se skládají z koherentního optického zesilovače, jehož výstupní signál se vrací zpátky pomocí zpětné vazby znovu na vstup. Ve vláknových laserech je zesilovacím médiem optické vlákno, nejčastěji takové vlákno, které je v jádru dopované prvky vzácných zemin (např. erbium, yterbium, thulium), které tvoří aktivní prostředí laseru. Světlo čerpané z laserové diody generuje ve vláknu další energii, která je následně akumulována a ve formě zesíleného laserového paprsku vychází ven z vlákna. Tento výstupní paprsek bývá většinou skládán s paprsky vystupujícími z mnoha dalších optických vláken a tak dochází ke zvýšení výkonu u laserového paprsku, který je takto poskládán. Paprsek prochází dalšími optickými součástkami, které ho mohou modifikovat a nakonec vystupuje ven za pomoci vychylovacích zrcátek a je zaostřen průchodem přes objektiv do optického vlákna [11].

My bychom využili pro případné měření laser s výkonem 300 mW.

EDFA - Erbium-doped Fiber Amplifiers

Vláknové zesilovače dotované erbiem (EDFA) jsou nejvýznamnější vláknové zesilovače co se týče komunikace s dlouhým dosahem. Zesilují světelný signál v oblasti vlnových délek okolo 1 500 nm. Maximální zesílení dochází v oblasti okolo 1530 nm až 1560 nm. Jádro EDFA je optické vlákno dotované erbiem, které bývá většinou jednovidové vlákno. Princip celého EDFA (obr. 4.2) spočívá v absorbování světla na jedné frekvenci a emitování světla na druhé frekvenci. Externí polovodičové lasery vyzařují do vlákna na vlnových délkách buď 980 nm nebo 1480 nm. Tato akce vybuzeje atomy erbia. Další optické signály o vlnových délkách mezi 1530 nm až 1620 nm vstupují do vlákna a stimulují vybuzené atomy erbia, které vydávají fotony na stejné vlnové délce jako je vlnová délka vstupního signálu (1530 nm až 1620 nm). Takto popsaná situace zesiluje vstupní signál. Zesilovače dotované erbiem nachází své uplatnění převážně v telekomunikačních systémech [10].



Obr. 4.2: Blokové schéma EDFA

Vlnový multiplex (WDM – Wavelength Division Multiplexing) představuje v optických sítích funkci, která při přenosu multiplexuje více optických signálů v jednom optickém vláknu. WDM využívá funkci multiplexeru na vysílači a funkci demultiplexeru na přijímači [10].

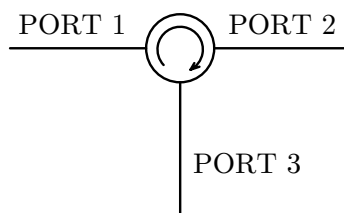
Modulátor

V uvedeném návrhu využijeme modulátor EOM (Electro-optic modulator), který se pro náš návrh měřicího systému hodí nejvíce. Modulátor EOM je optické zařízení řízené elektrickým signálem, který určuje frekvenci výstupního sledu světelných impulzů. V našem případě bude vytvářet impulzy o šířce 10 ns.

Filtr

Filtr je optický prvek, který je vložen do cesty světelnému impulzu za účelem odfiltrování nepotřebné vlnové délky světelného impulzu. V našem návrhu bude potřeba použít filtr propouštějící vlnovou délku 1530 nm. Taková totiž bude pracovní vlnová délka, od které se bude odvíjet následné měření.

Circulator



Obr. 4.3: Cirkulator

Cirkulator je pasivní optické zařízení, které slouží ke sloučení nebo dělení optického signálu na stejné vlnové délce. Světlo je směřováno od portu k portu pouze jedním směrem. Standardně má cirkulator 3 porty. Vstup z PORTu 1 směřuje na PORT 2 a vstup z PORTu 2 je směřován na PORT 3.

Optické vlákno

Měření by mělo probíhat na jednojádřovém optickém vlákně (single-mode optic fiber). Tento typ optického vlákna se využívá k přenosu dat na velké vzdálenosti. Kvůli malému průměru jádra (7–9 μm) mají tato vlákna velký úhel odrazu ve vlákně a tím dochází k menšímu prodloužení dráhy paprsku. Index lomu ve spektrální oblasti 1300 nm až 1600 nm bývá v rozmezí 1,46–1,49. Měrný útlum při vlnové délce 1550 nm je 0,2 dB/km [5].

Stokesova a Anti-Stokesova složka

K odfiltrování nepotřebných vlnových délek nám poslouží C+L/S Band Splitter, který nám propustí dál jen potřebné vlnové délky, které budeme porovnávat a ze kterých bychom nakonec měli získat informaci o změřené teplotě. Anti-Stokesova složka by měla být v rozmezí vlnových délek 1460 nm až 1490 nm oproti tomu Stokesova složka v rozmezí 1570 nm až 1625 nm. Na těchto vlnových délkách bychom měli při praktické části najít potřebné údaje sloužící k výpočtu teploty v optickém vlákně. Výslednou změřenou teplotu dostaneme porovnáním hodnot ve Stokesově a Anti-Stokesově složce.

Fotodioda

Fotodioda je polovodičová dioda, která je citlivá na osvětlení PN přechodu světlem o určité vlnové délce. V našem případě to budou vlnové délky zmíněné výše (Stokesova a Anti-Stokesova složka). Pokud není PN přechod osvětlen, má voltampérová charakteristika fotodiody stejný průběh jako běžná plošná dioda. Při osvětlení PN přechodu přecházejí elektrony do vodivostního pásu, vznikají díry a v elektrickém poli se přemísťují na příslušnou stranu (způsobeno ionty donorů a akceptorů, tj. nepohyblivými částicemi). Tím ovšem vznikne nové elektrické pole, které je způsobeno elektrony a dírami (tj. pohyblivými částicemi s nábojem). Vliv světelného záření na PN přechodu lze sledovat v polarizaci diody v závěrném směru, kde dochází k lineárnímu růstu anodového proudu při rovnoměrném zvětšování osvětlení. Taková situace znamená, že proud diody v závěrném směru je závislý na síle osvětlení PN přechodu.

PC

Počítač bude sloužit jako zobrazovací zařízení. Zde proběhnou také výpočty, či úkony potřebné k dosažení výsledků.

Výpočet zpětně rozptýleného výkonu

Vzorec pro výpočet výkonu zpětně odraženého signálu:

$$P_b(z) = \frac{1}{2} \cdot P_0 \cdot \Delta t \cdot S \cdot \alpha_R \cdot v_g \cdot e^{(-2 \cdot \alpha_{dB} \cdot z)} \quad [\text{dB}], \quad (4.1)$$

Výkon laseru $P_0 = 300 \text{ mW}$. Šířka impulzu $\Delta t = 10 \text{ ns}$. Koeficient zpětného rozptylu S je spektrálně závislý a vyjadřuje, jaká poměrná část optického výkonu se po rozptylu šíří vláknem ve zpětném směru. Pro jednovidová vlákna se dosahuje pro vlnovou délku 1530 nm hodnot okolo $-51,1 \text{ dB}$ ($S = 0,000061$). Tento koeficient je také silně závislý na geometrických a optických vlastnostech měřeného vlákna, jako např. index lomu, průměr vidového pole, numerická apertura atd. Činitel ztrát Rayleighovým rozptylem α_R je nutno si dopočítat dle vzorce 2.2. Skupinovou rychlost v_g musíme také dopočítat. Střední hodnota koeficientu útlumu $\alpha_{dB} = 0,2 \text{ dB/km}$. Délky optického vlákna s vypočítanými hodnotami zpětně rozptýleného výkonu jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Výkon zpětně odraženého signálu

Vzdálenost [m]	Výkon [W]	Výkon [dBm]
5	$3,712 \cdot 10^{-7}$	-34,30
10	$5,024 \cdot 10^{-8}$	-42,99
25	$1,245 \cdot 10^{-10}$	-69,05
50	$5,654 \cdot 10^{-15}$	-112,48
100	$1,165 \cdot 10^{-23}$	-199,34

Příklad výpočtu pro vzdálenost $z = 5 \text{ m}$:

- výpočet činitele ztrát Rayleighovým rozptylem:

$$\alpha_R = \frac{C_1}{\lambda^4} = \frac{0,802 \cdot 10^{-27}}{(1530 \cdot 10^{-9})^4} = 0,146 \text{ dB/km}, \quad (4.2)$$

- výpočet skupinové rychlosti:

$$v_g = \frac{c}{n} = \frac{299792458}{1,46} = 205337300 \text{ m/s}, \quad (4.3)$$

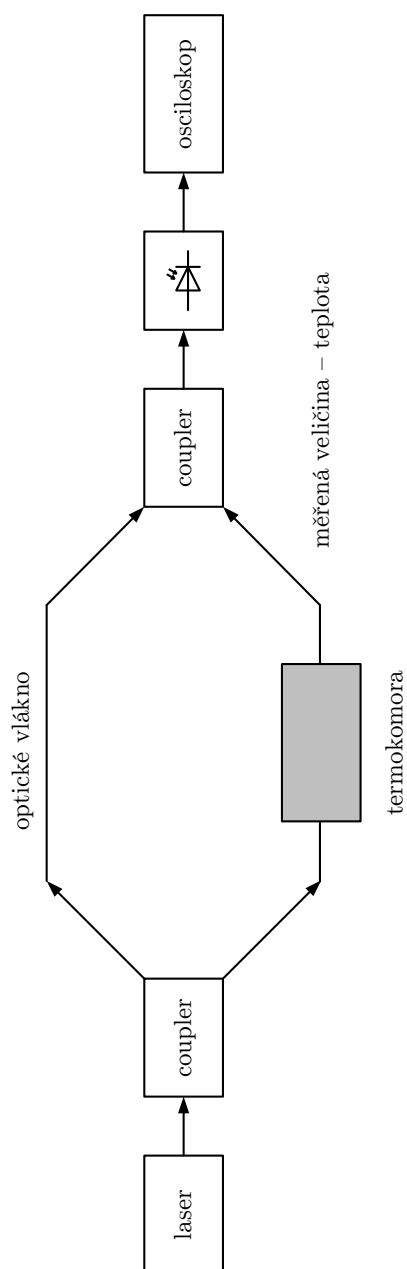
- výpočet výkonu zpětně odraženého signálu:

$$P_b(1) = \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 0,000061 \cdot 0,146 \cdot 205337300 \cdot e^{(-2 \cdot 0,2 \cdot 5)} = 3,712 \cdot 10^{-7} \text{ W}, \quad (4.4)$$

- přepočítání výkonu z jednotky W na dBm (hodnota výkonu vztažená k 1 mW):

$$P[\text{dBm}] = 10 \cdot \log \frac{P[\text{W}]}{0,001} = 10 \cdot \log \frac{3,712 \cdot 10^{-7}}{0,001} = -34,30 \text{ dBm}. \quad (4.5)$$

4.2 DTS využívající Machův-Zehnderův modulátor



Obr. 4.4: DTS využívající Machův-Zehnderův modulátor

4.2.1 Popis jednotlivých bloků zapojení

Některé bloky, jako např. laser, optické vlákno a fotodioda, jsou blíže popsány již výše (viz 4.1.1). Blok termokomora je rozepsán v kapitole 5. Obě ramena optického vlákna jsou dlouhé 1 m.

Coupler

Coupler je zařízení, které se hojně využívá v optických systémech. Slouží k propojení světelného signálu z jednoho nebo více vstupních vláken do jednoho nebo více vláken výstupních, ale také z volného prostoru do vlákna. V případě, že všechna použitá vlákna jsou jednovidová, vyskytují se zde určitá výkonová omezení. Velké výkonové ztráty mohou vzniknout při použití dvou nebo více vstupů o stejné frekvenci. Výjimku tvoří pouze to, když jsou oba vstupy vzájemně koherentní.

Osciloskop

Osciloskop plní funkci zobrazovacího zařízení. Osciloskop by měl mít výstup na USB z důvodu následného uložení a stažení naměřených hodnot, pro následné vykreslení a úpravu grafů.

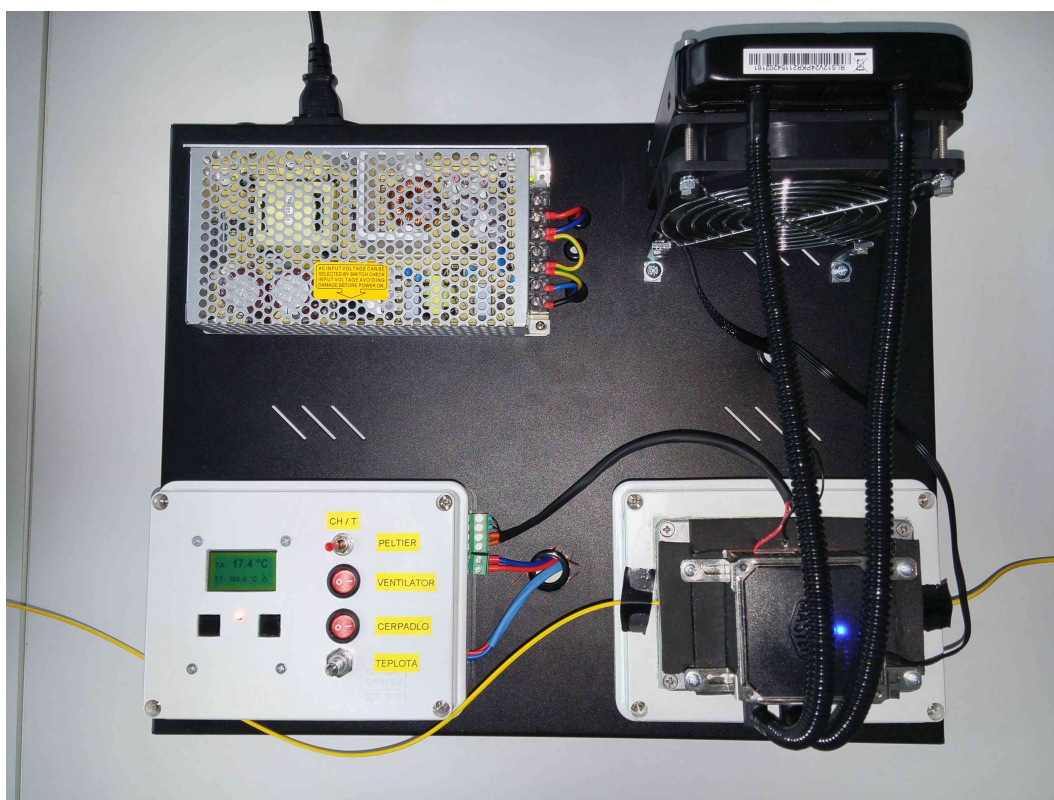
4.3 Výběr systému DTS

Z důvodu finanční náročnosti sestrojení DTS využívající Ramanův rozptyl a také s ohledem na to, že škola měla k dispozici již sestrojený Machův-Zehnderův modulátor, jsme se rozhodli, po dohodě s vedoucím práce, že teplotu budeme měřit pomocí druhého způsobu, a to pomocí již zmíněného Machova-Zehnderova modulátoru (viz kapitola 6). V neposlední řadě hrálo roli také to, že tato metoda je metodou interferometrickou, která je považována za jednu z nejpřesnějších měřících metod.

5 VÝROBA TEPLOTNÍ KOMORY

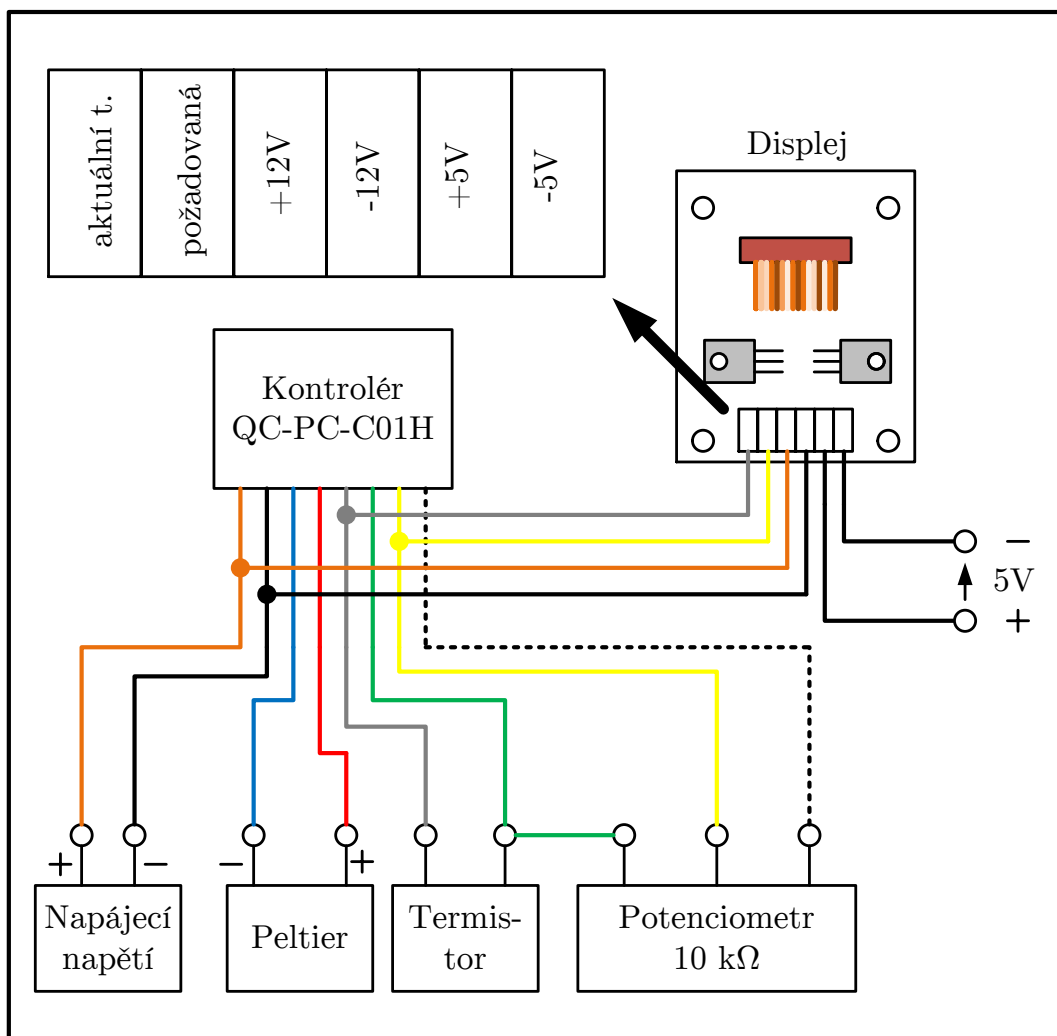
Teplotní komora (termokomora) byla vyrobena za účelem měření simulované teploty pomocí optického vlákna. Navržena a zkonstruována byla za pomoci kolegy Jakuba Drábka, který v teplotní komoře prováděl měření polarizační vidové disperze na optickém vlákně.

Námi vyrobená sestava teplotní komory obsahovala: zdroj na 12 V, hliníkovou krabičku (termokomoru), Peltierův článek, kontrolér pro ovládání Peltierova článku, displej pro Peltierův kontrolér, vodní chlazení s čerpadlem, potenciometr, termistor, plošný spoj se svorkovnicí, chladicí pastu a tlačítka, či přepínač. Celá sestava je připevněna na černém hliníkovém plechu pro snadnější přenos a kompaktnost, popř. umístění do racku.



Obr. 5.1: Celá sestava s vloženým optickým vláknem

5.1 Schéma zapojení kontroléru s displejem



Obr. 5.2: Schéma zapojení kontroléru s displejem

5.2 Popis jednotlivých částí termokomory

5.2.1 Zdroj

Jako zdroj jsme použili MiWi RS-150-12, který nám dodává potřebných 12 V a 12,5 A, jelikož Peltierův článek je celkem náročný na množství elektrického proudu.

5.2.2 Peltierův článek

Peltierův článek pracuje na principu Peltierova jevu. Principem Peltierova jevu je procházející proud obvodem se dvěma rozdílnými vodiči, které jsou zapojené v sérii.

Jedna plocha se zahřívá a ta druhá se naopak ochlazuje. Plocha, která se zahřívá nebo ochlazuje, závisí na směru elektrického proudu. Pro směr elektrického proudu nám sloužil přepínač, kterým si můžeme nastavit, aby Peltierův článek topil (T) nebo chladil (CH). Nejčastější využití Peltierova článku je chlazení malých výkonů. Nevýhodou Peltierova článku je jeho velká spotřeba a velké vyzáření tepla, které se musí nějak chladit (odvádět) [3].

5.2.3 Kontrolér Peltierova článku

V našem případě jsme využili kontrolér QuickCool QC-PC-C01H , který se využívá k dosažení a udržení určité teploty mezi -20°C a $+50^{\circ}\text{C}$ pomocí Peltierova článku. Těchto hraničních hodnot nelze dosáhnout, pokud není Peltierův článek dostatečně dimenzován nebo pokud není článek spojen s dostatečně výkonným chladícím zařízením (v našem případě jsme využili vodního chlazení) [12].

5.2.4 Displej kontroléru Peltierova článku

Zobrazovací displej QuickCool QC-PC-D je připojen ke kontroléru, viz obr. 5.2. Tím lze dosáhnout, za pomoci potenciometru na $10\text{ k}\Omega$, cíleného řízení Peltierova článku. Námi využitý displej nám zobrazuje na displeji teplotu aktuální a teplotu požadovanou. Displej obsahuje dvě tlačítka, pomocí kterých lze nastavit na kontroléru zda chceme topit, či chladit. Pokud je kontrolér v běhu a dodává elektrický proud do Peltierova článku, nám značí červená dioda pod displejem. Jakmile dosáhneme požadované teploty, dioda zhasne [12].

5.2.5 Vodní chlazení s čerpadlem

My jsme při sestavení využili vodního chlazení Cooler Master Seidon 120V ver.2. To bylo velmi přínosné a praktické, jelikož vodní chlazení je celkem tiché a neovlivňovalo tak příliš měření. Naše navržená termokomora ještě obsahovala tlačítka pro ovládání větráku, či čerpadla vodního chlazení, takže nebyl problém chlazení úplně vypnout na dobu nezbytnou pro měření a zbavit se tak rušivých vibrací.

5.2.6 Termistor, svorkovnice, chladící pasta, tlačítka, přepínač

Termistor je nezbytná část, která ovšem není součástí kontroléru. Slouží nám k měření aktuální teploty v termokomoře. Výslednou teplotu zobrazuje na displeji. Svorkovnice s plošnými spoji nám posloužila k přehlednějšímu a snadnějšímu propojení



Obr. 5.3: Displej pro Peltierův kontrolér s tlačítky a potenciometrem

jednotlivých součástí, jako např.: tlačítka pro zapnutí/vypnutí větráku, či čerpadla, přepínač CH/T (chlazení/topení) pro nastavení směru proudu na Peltierův článek a v neposlední řadě potenciometru, kterým se nastavuje požadovaná teplota. Chladicí pastu jsme nanесли jak mezi Peltierův článek a termokomoru, tak i mezi Peltierův článek a vodní chlazení. Jak je zřejmé z obr. 5.1, termokomora je ještě vložena do plastové krabičky, kde je prostor mezi hliníkovou krabičkou a plastovou krabičkou vyfoukán montážní pěnou pro lepší izolační vlastnosti.

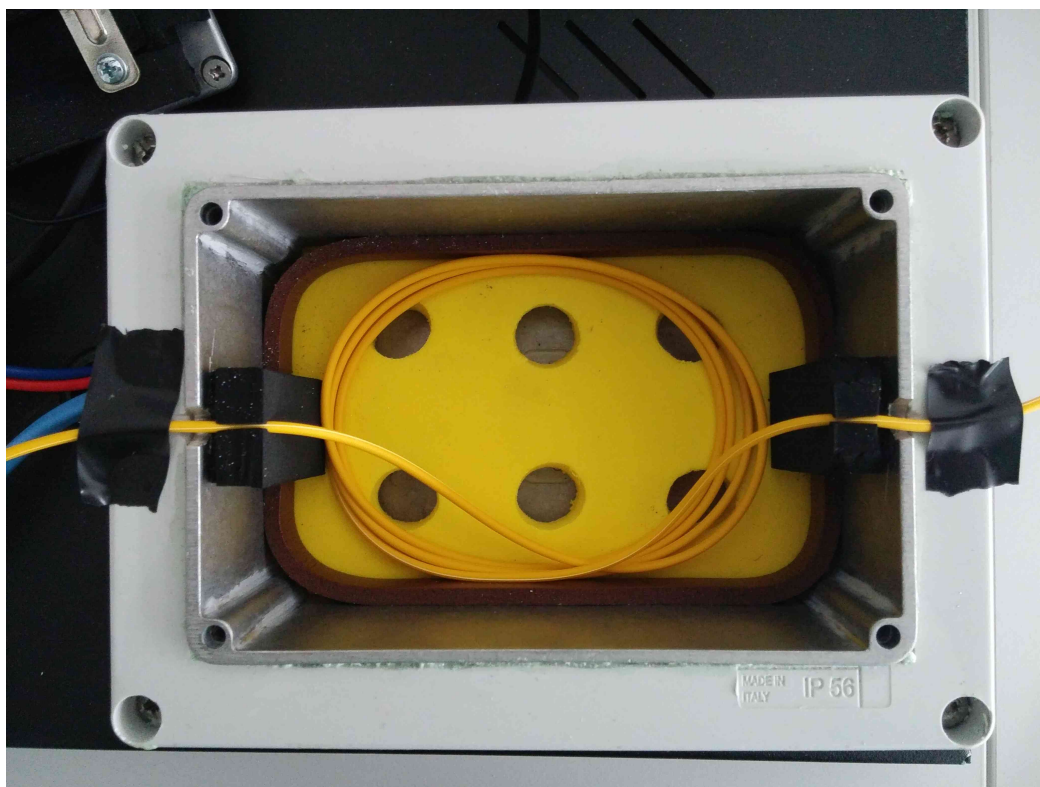
6 DTS VYUŽÍVAJÍCÍ MACHŮV-ZEHNER. MODULÁTOR

Jak již bylo zmíněno, pro měření teploty byl vybrán měřicí systém DTS využívající Machův-Zehnerův modulátor, jelikož toto zapojení má škola k dispozici a není tak složité na sestavení jako měřicí systém navržený v kapitole 4. Veškeré měření probíhalo v kanceláři vedoucího práce v místnosti SE5.121 (Technická 12, Brno 616 00), kde byla sestavena měřicí sestava dle obr. 4.4. K tomuto měření mi skvěle posloužila termokomora (kapitola 5), jelikož jsem mohl díky ní simulovat různé teploty a navíc díky termistoru a displeji jsem věděl, pro jakou teplotu právě probíhá měření a mohl tak porovnat, jaké změny se dějí v průběhu signálu nebo ve spektru při změně teploty.

6.1 Popis měření a uložení optického vlákna

Celý měřicí systém i s rameny interferometru byl umístěn na stole. Optické vlákno bylo smotáno do malinkého smotku a vloženo do termokomory obr. 6.1. Ta byla zespodu (i z boku) vystlána izolačním materiálem tak, aby se vlákno nedotýkalo žádné ze stěn komory. Otvory, kterými vlákno vstupovalo do a ven z komory byly zvětšeny, aby se vlákno nedotýkalo hliníkové krabičky, ale aby vlákno viselo na plastové krabičce (z venku), ve které byla komora uložena a na izolačním materiálu (vně krabičky).

Do optického vlákna jsme vysílali laserem signál o vlnové délce 1530 nm. Jako snímače optického signálu byly zvoleny fotodiody, které zpracovaly optický signál a poslaly ho (pomocí sond) na osciloskop, který sloužil jako výstupní zařízení měřicího systému. Pomocí něj jsem si ukládal naměřené hodnoty.



Obr. 6.1: Termokomora se smotaným optickým vláknem

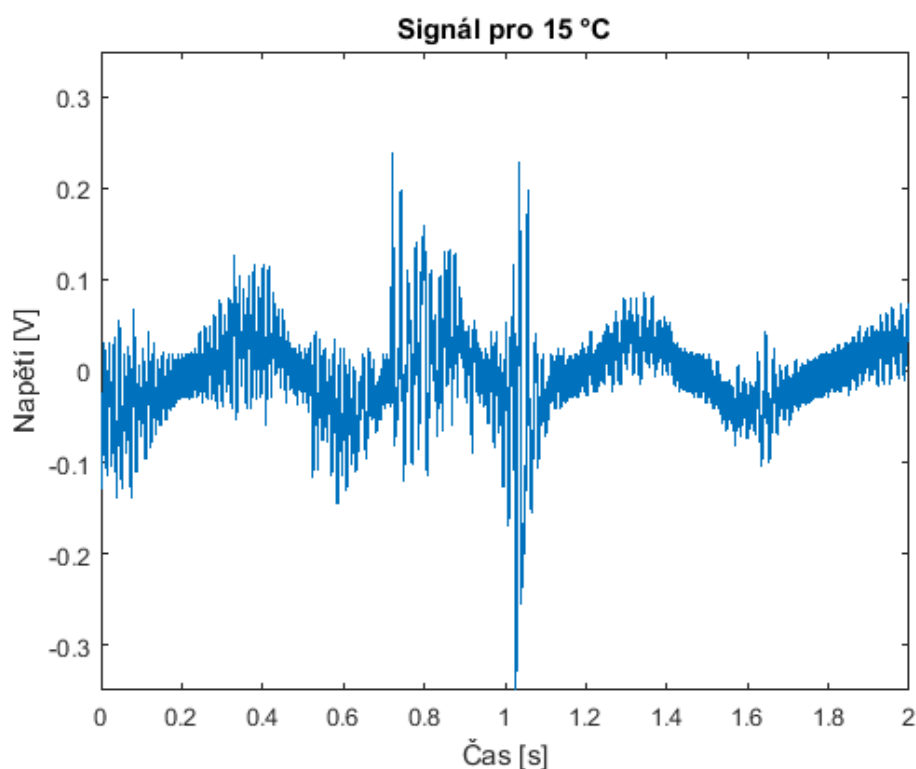
Měření bylo provedeno ve dvou typech:

- **Měření teploty při ustálené (nastavené) teplotě** – větrák a čerpadlo během měření vypnuto.
- **Měření teploty s rychlou změnou teploty** – větrák a čerpadlo během měření zapnuto.

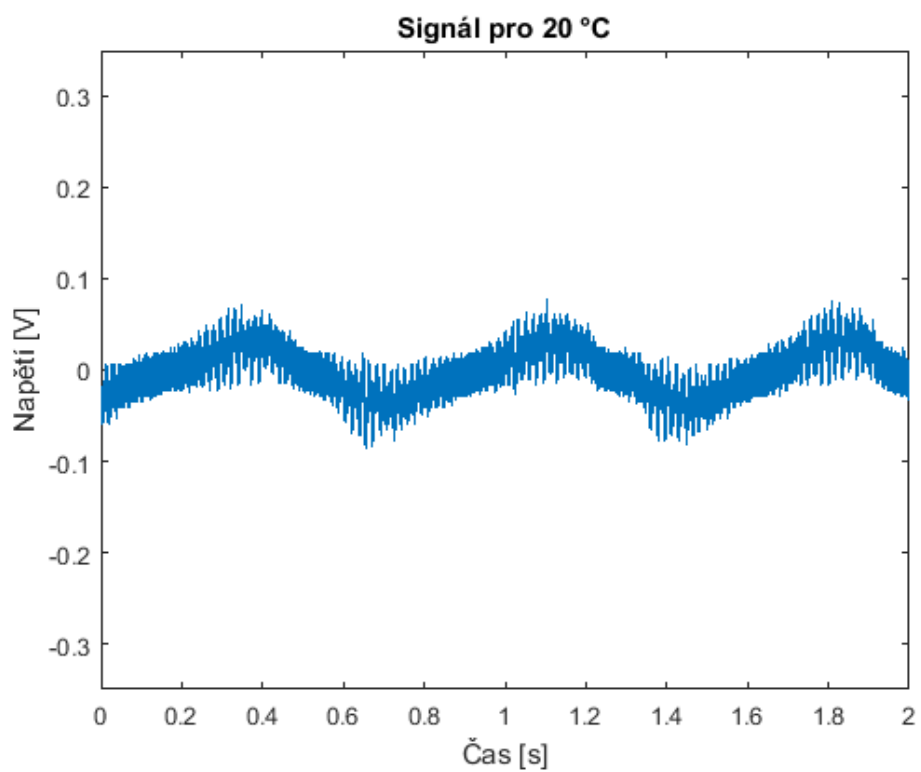
6.1.1 Měření teploty při ustálené (nastavené) teplotě

Princip měření spočíval v nastavení teploty v termokomoře a následnému změření průběhu pomocí osciloskopu. Pro toto měření jsem zvolil teploty od 15 do 60 °C, s krokem 5 °C. Jakmile jsem v termokomoře dosáhl požadované teploty a tato teplota se ustálila, vypnul jsem větrák s čerpadlem a následně provedl měření. Měření trvalo 2 s. Během těchto 2 sekund bylo zaznamenáno 16 777 216 vzorků. Vzorkovací frekvence tedy byla 8,388 MSa/s.

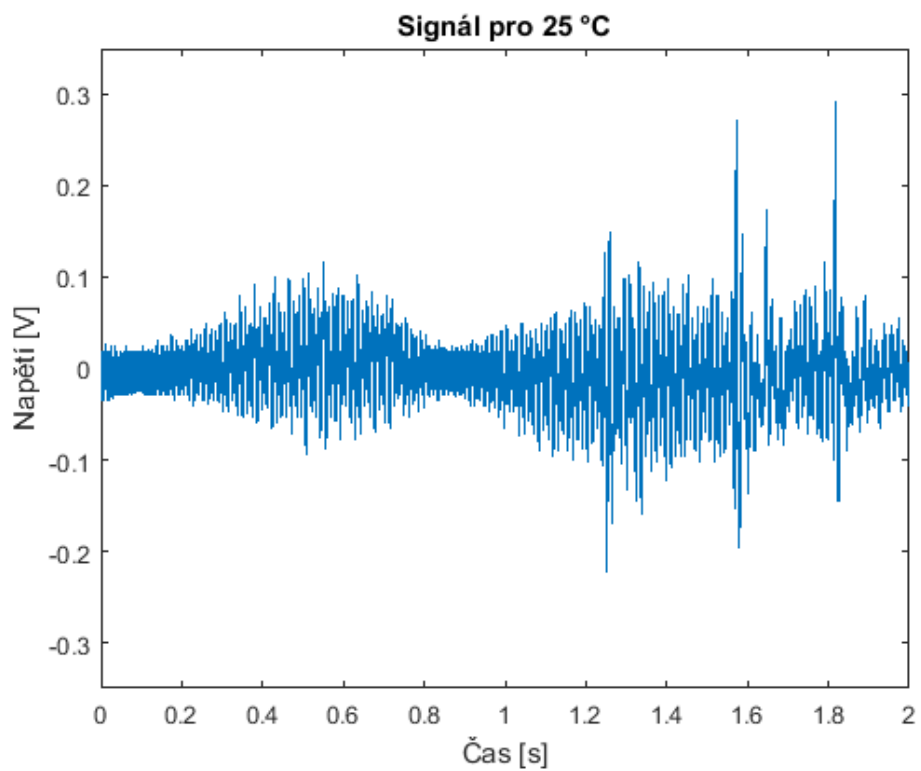
Dosažené grafy intenzity signálu v závislosti na čase



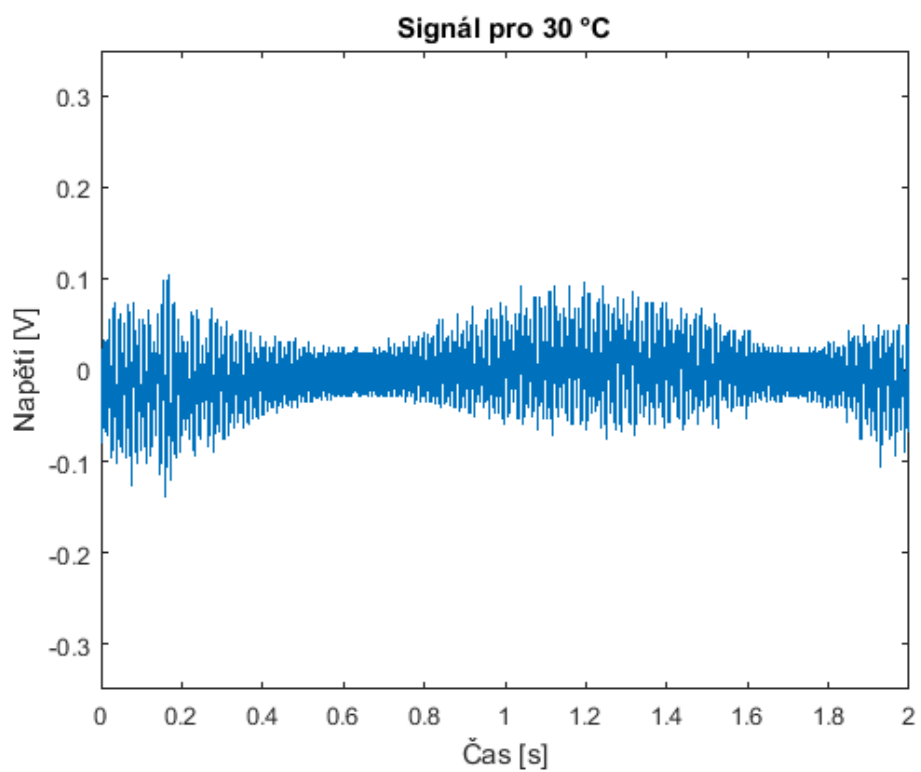
Obr. 6.2: Průběh signálu pro 15 °C – ustálená teplota



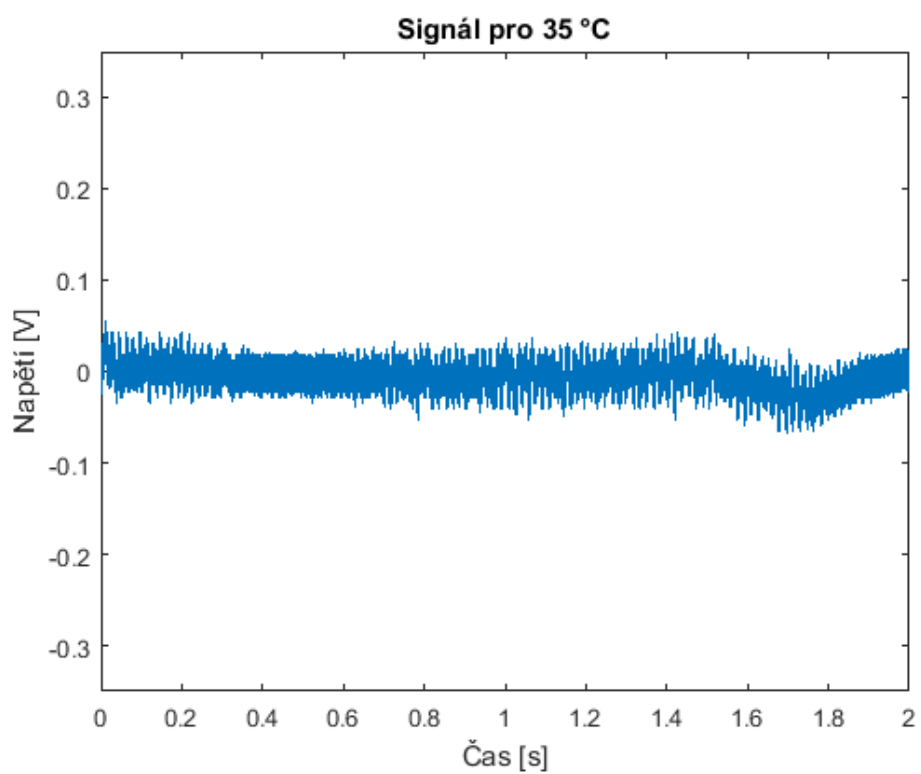
Obr. 6.3: Průběh signálu pro 20 °C – ustálená teplota



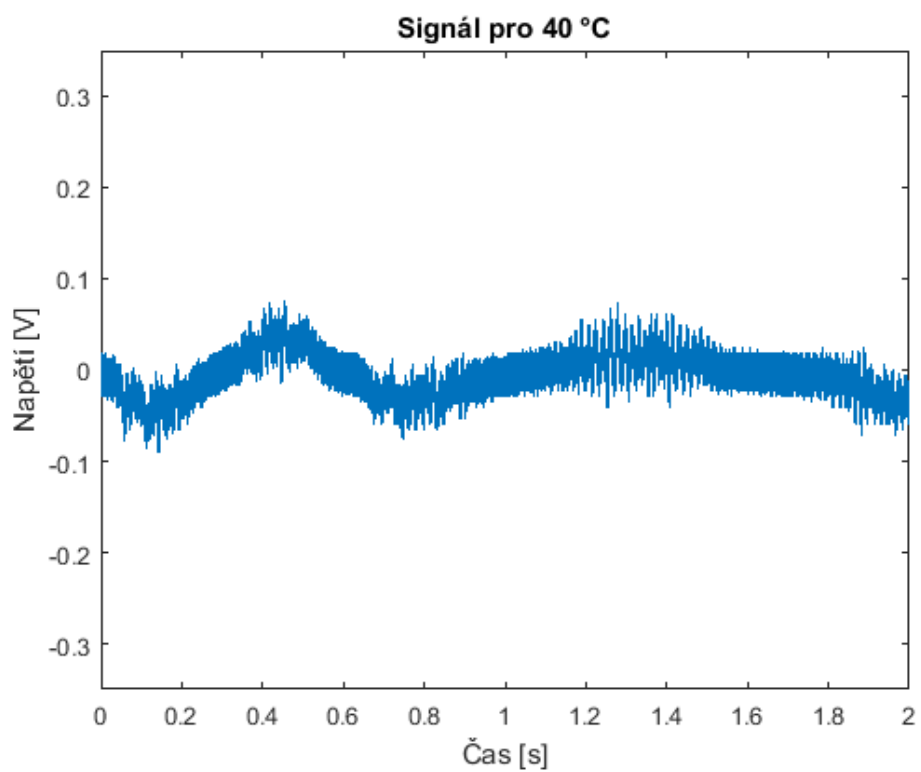
Obr. 6.4: Průběh signálu pro 25 °C – ustálená teplota



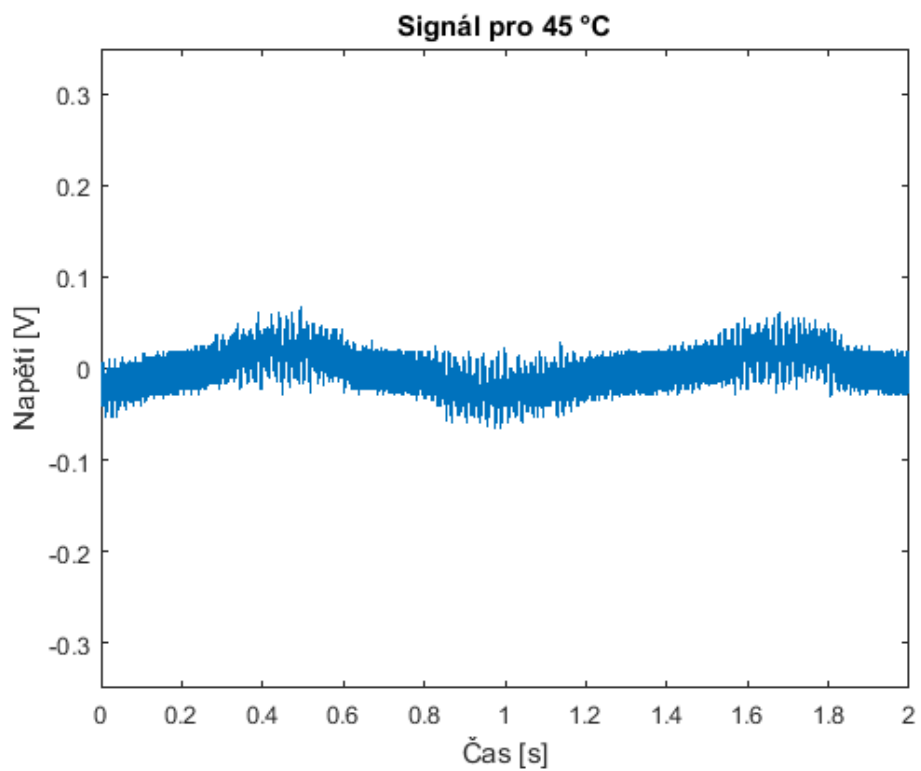
Obr. 6.5: Průběh signálu pro 30 °C – ustálená teplota



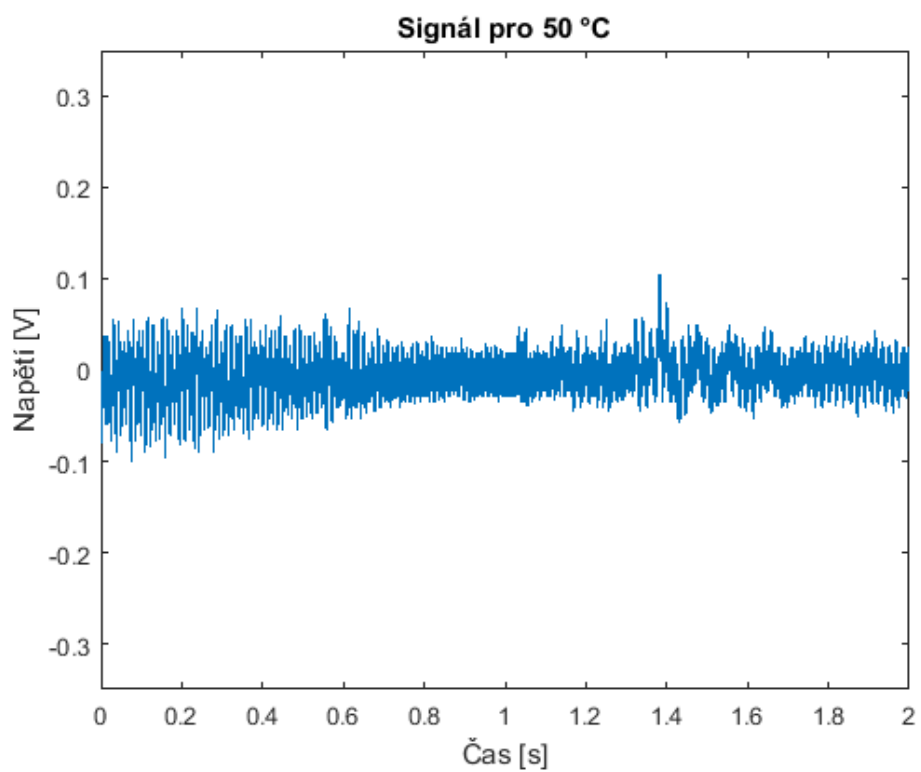
Obr. 6.6: Průběh signálu pro 35 °C – ustálená teplota



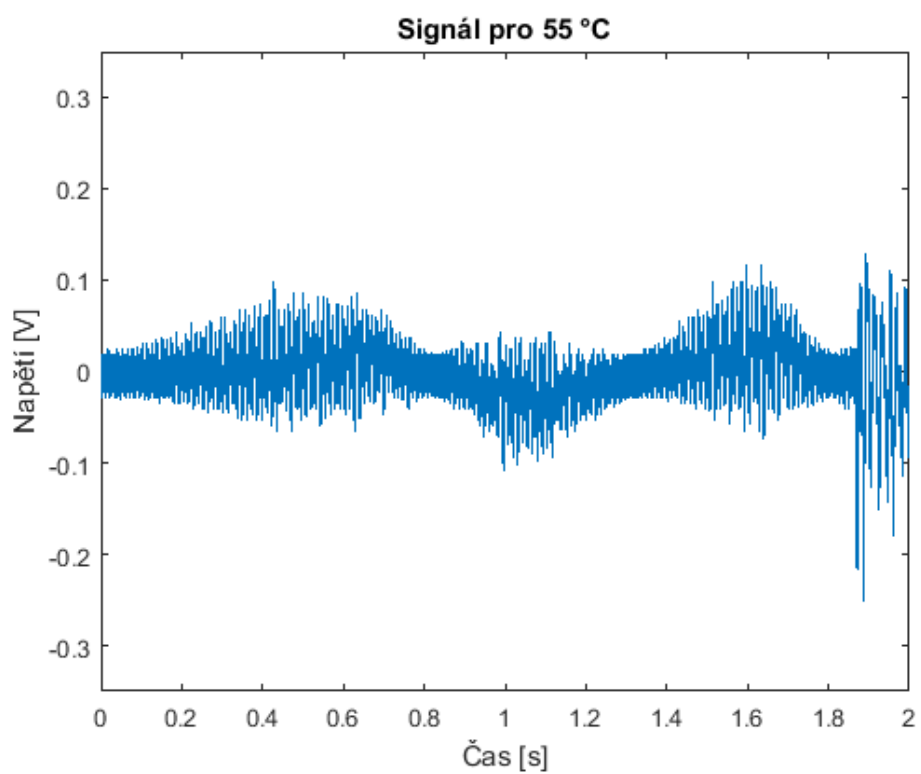
Obr. 6.7: Průběh signálu pro 40 °C – ustálená teplota



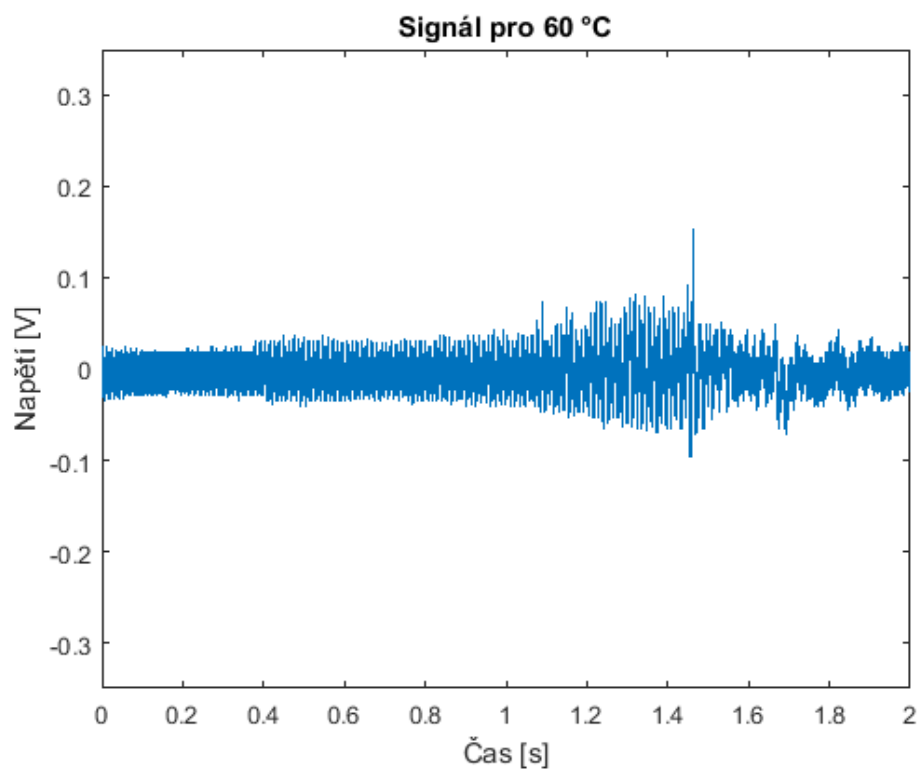
Obr. 6.8: Průběh signálu pro 45 °C – ustálená teplota



Obr. 6.9: Průběh signálu pro 50 °C – ustálená teplota

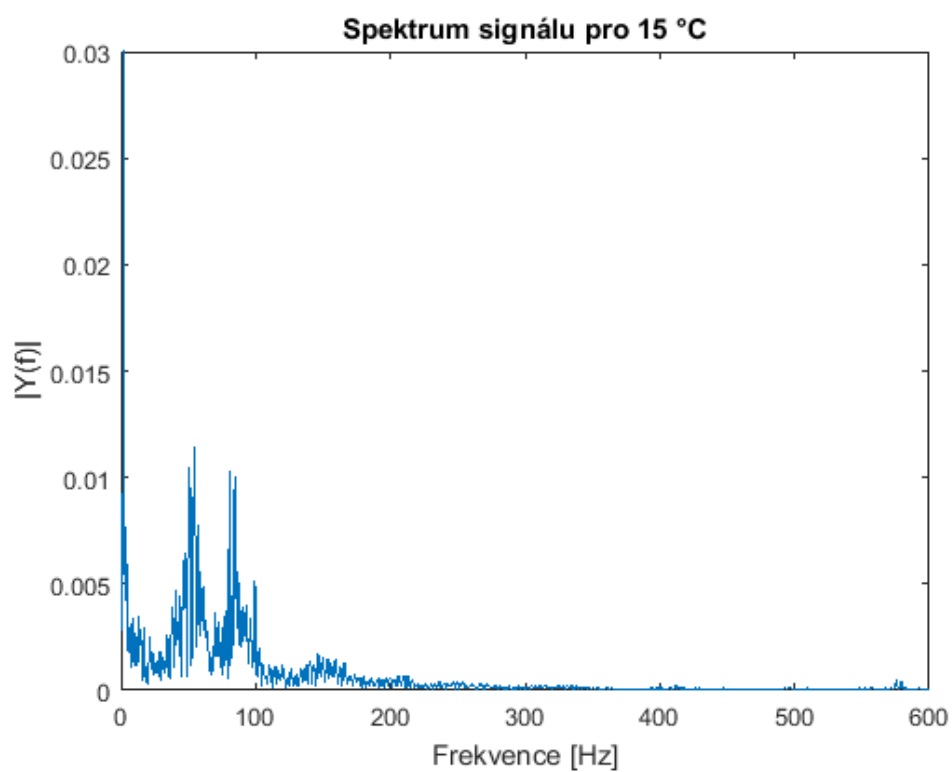


Obr. 6.10: Průběh signálu pro 55 °C – ustálená teplota

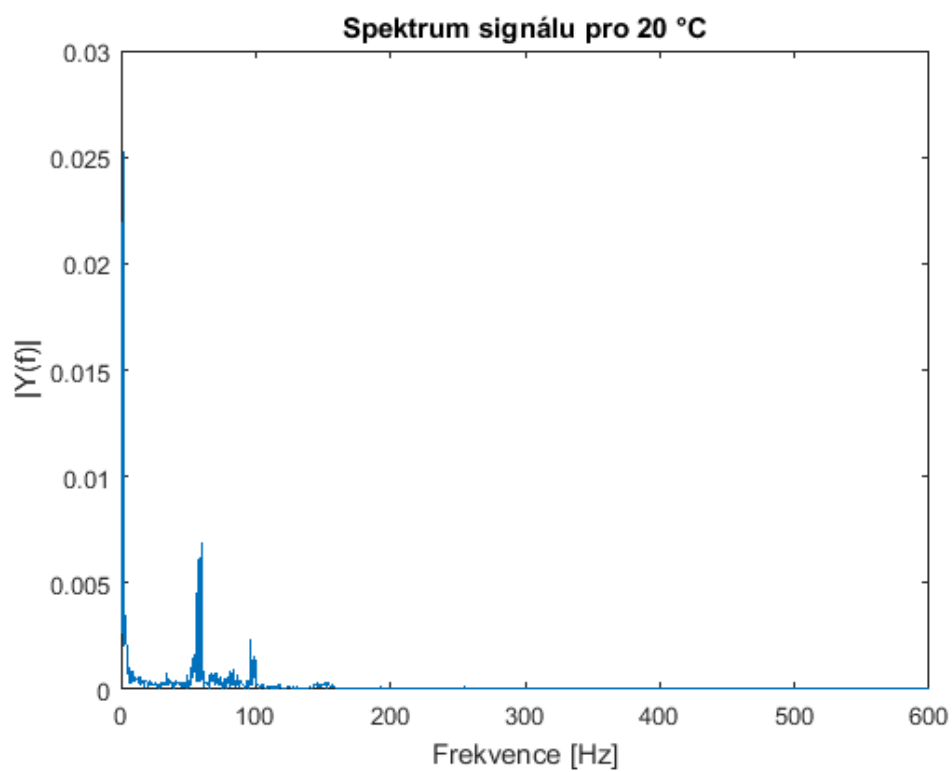


Obr. 6.11: Průběh signálu pro 60 °C – ustálená teplota

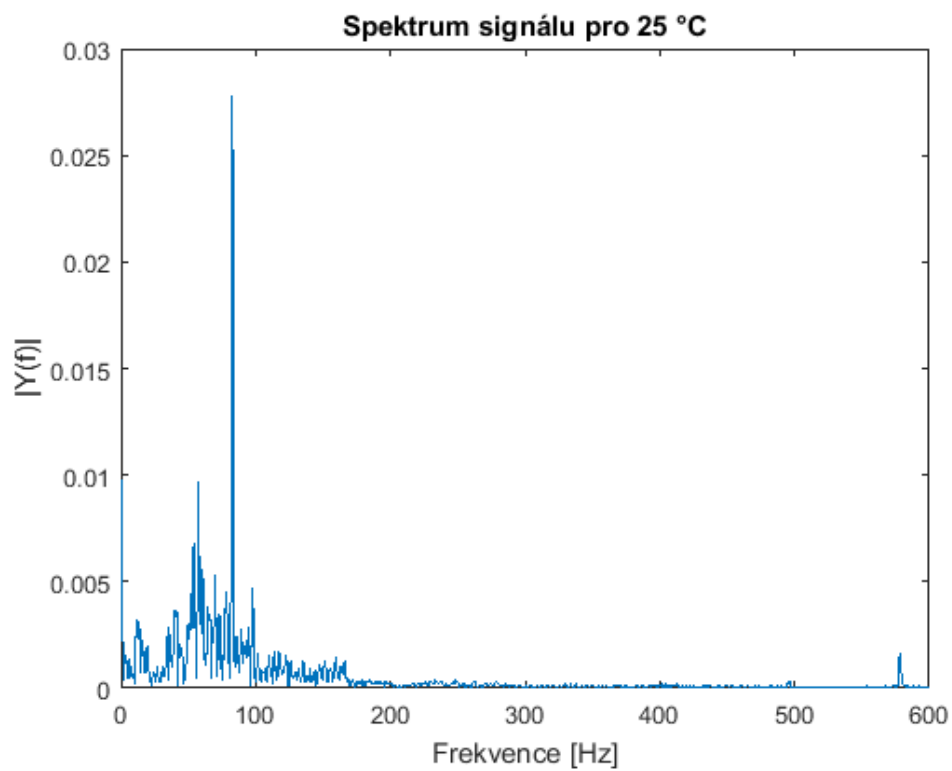
Spektrum signálu pro jednotlivé teploty



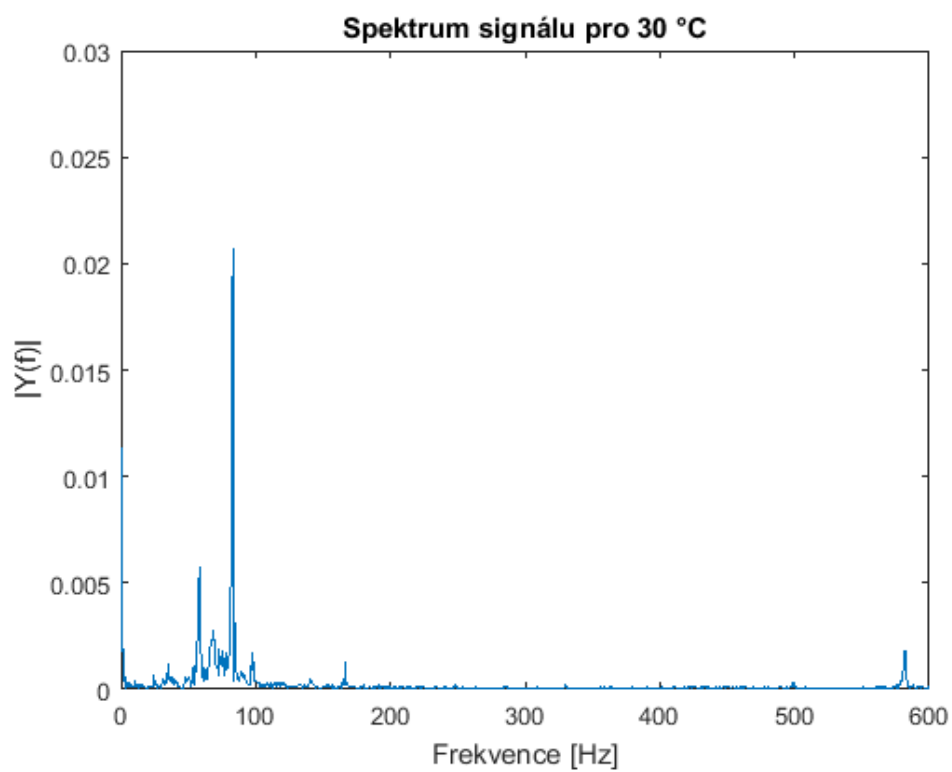
Obr. 6.12: Spektrum signálu pro 15 °C – ustálená teplota



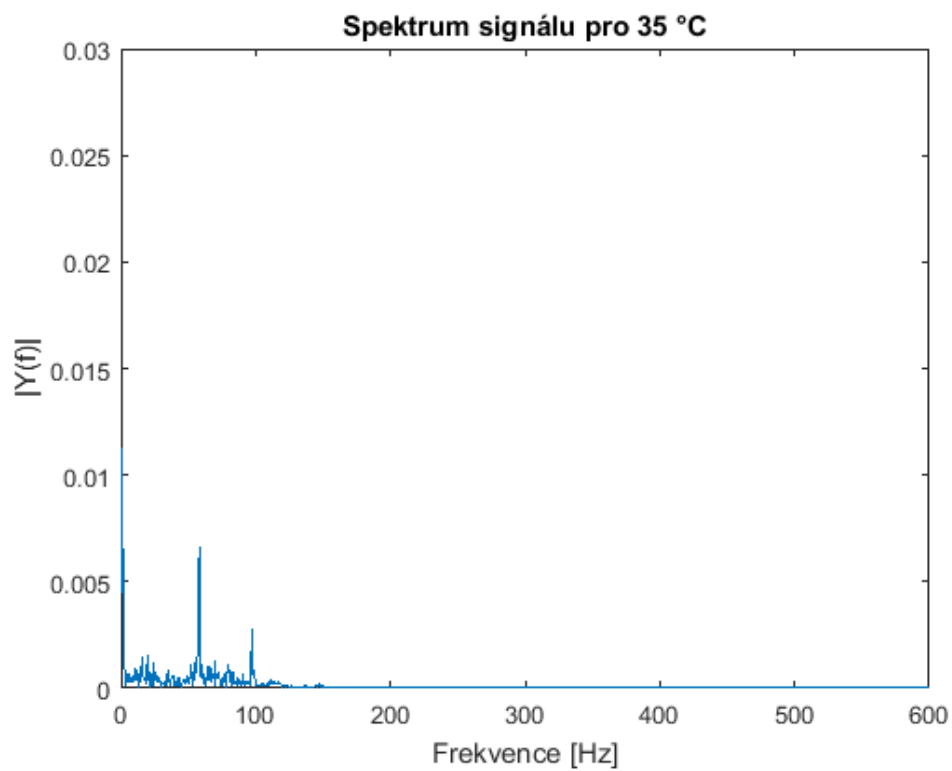
Obr. 6.13: Spektrum signálu pro 20 °C – ustálená teplota



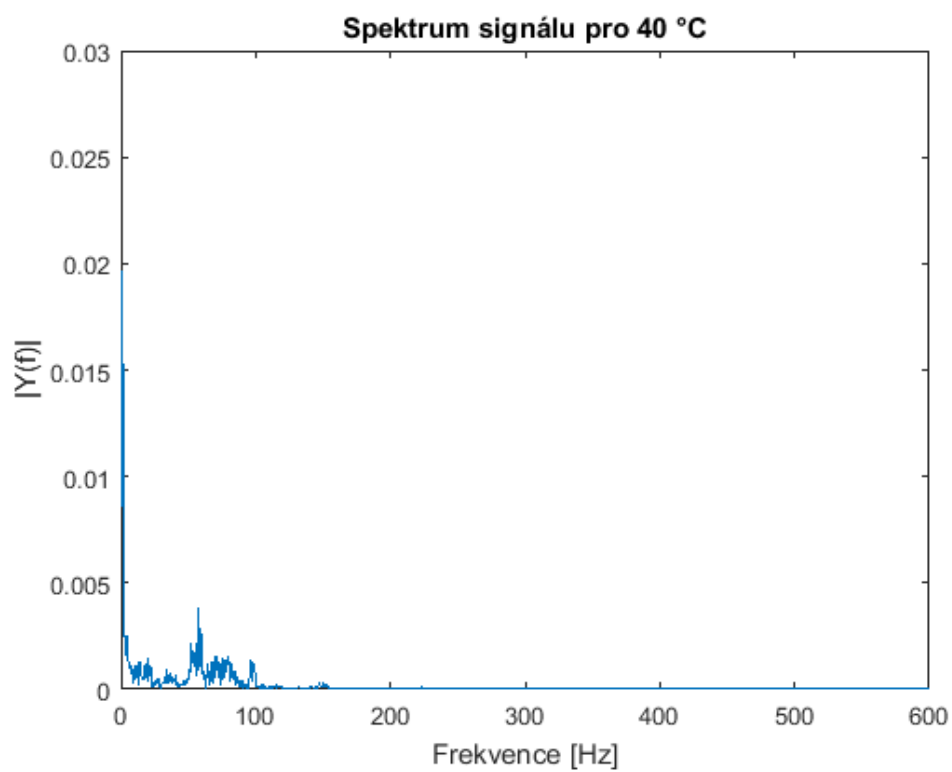
Obr. 6.14: Spektrum signálu pro 25 °C – ustálená teplota



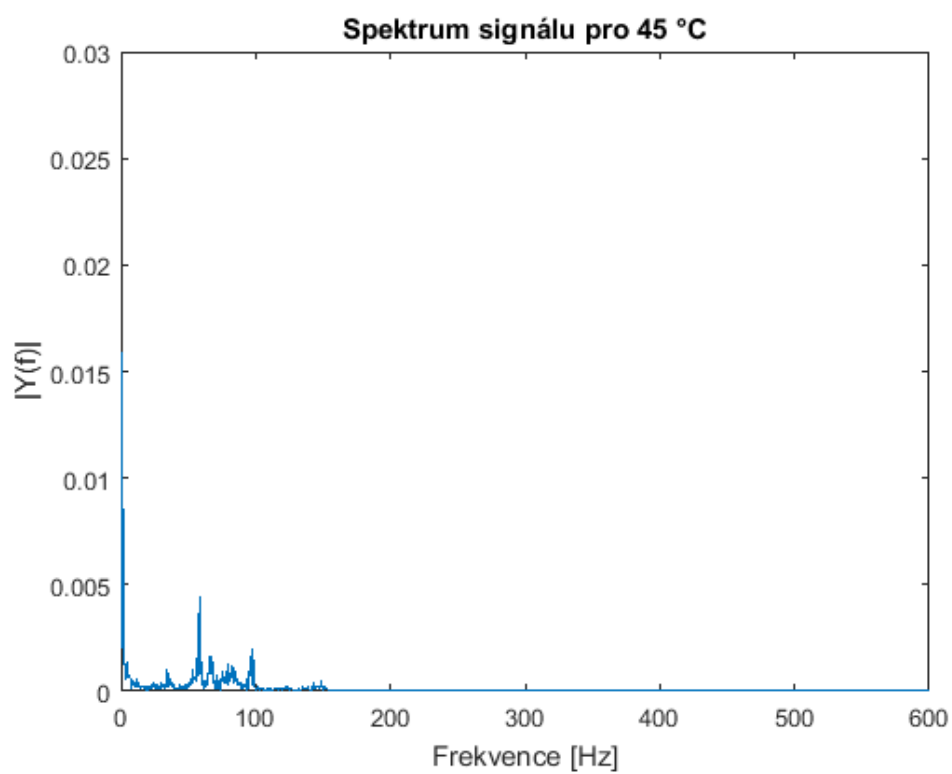
Obr. 6.15: Spektrum signálu pro 30 °C – ustálená teplota



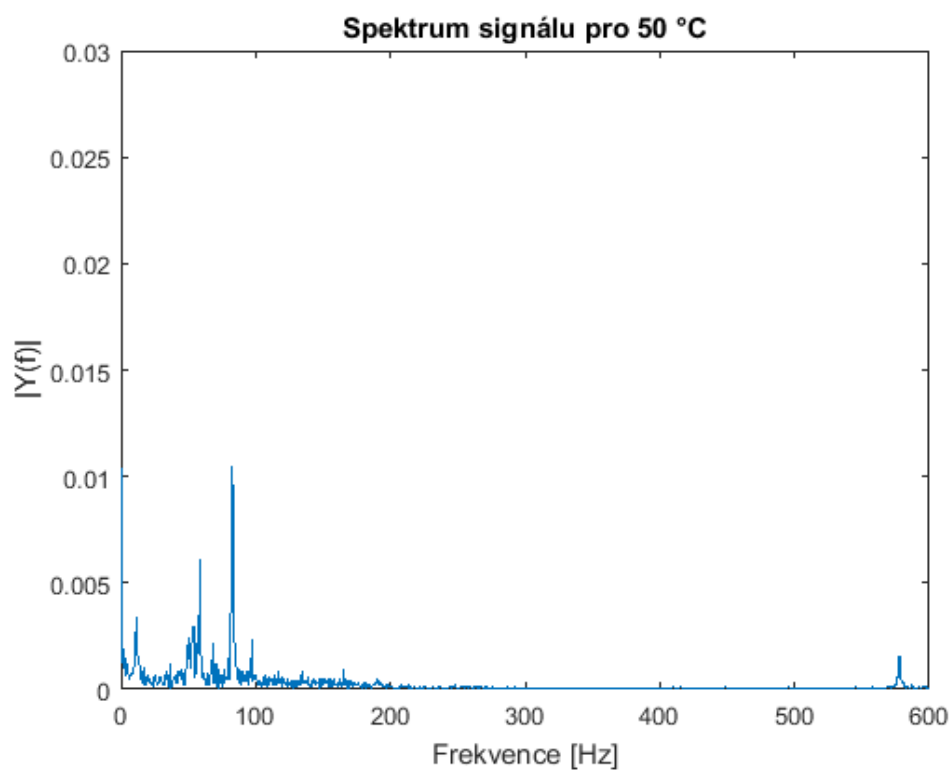
Obr. 6.16: Spektrum signálu pro 35 °C – ustálená teplota



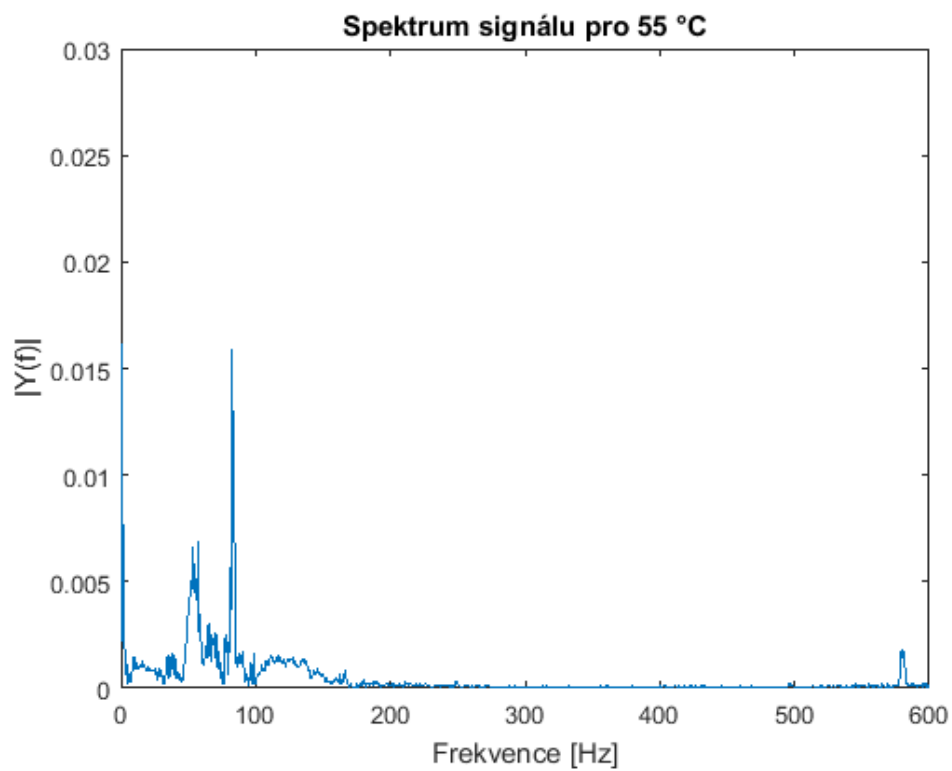
Obr. 6.17: Spektrum signálu pro 40 °C – ustálená teplota



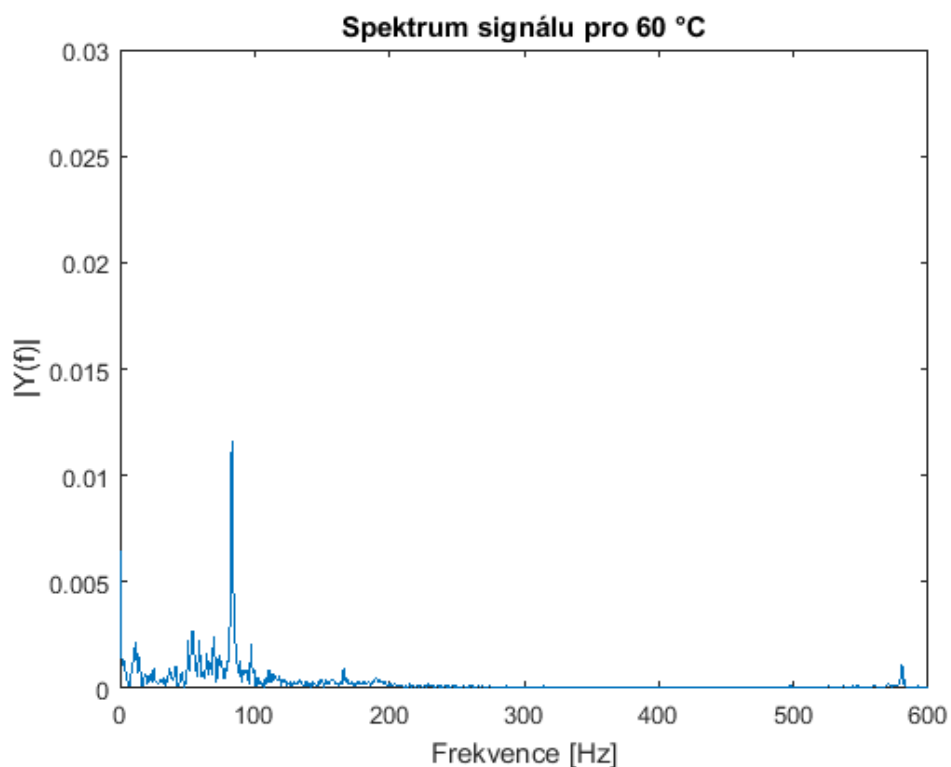
Obr. 6.18: Spektrum signálu pro 45 °C – ustálená teplota



Obr. 6.19: Spektrum signálu pro 50 °C – ustálená teplota



Obr. 6.20: Spektrum signálu pro 55 °C – ustálená teplota



Obr. 6.21: Spektrum signálu pro 60 °C – ustálená teplota

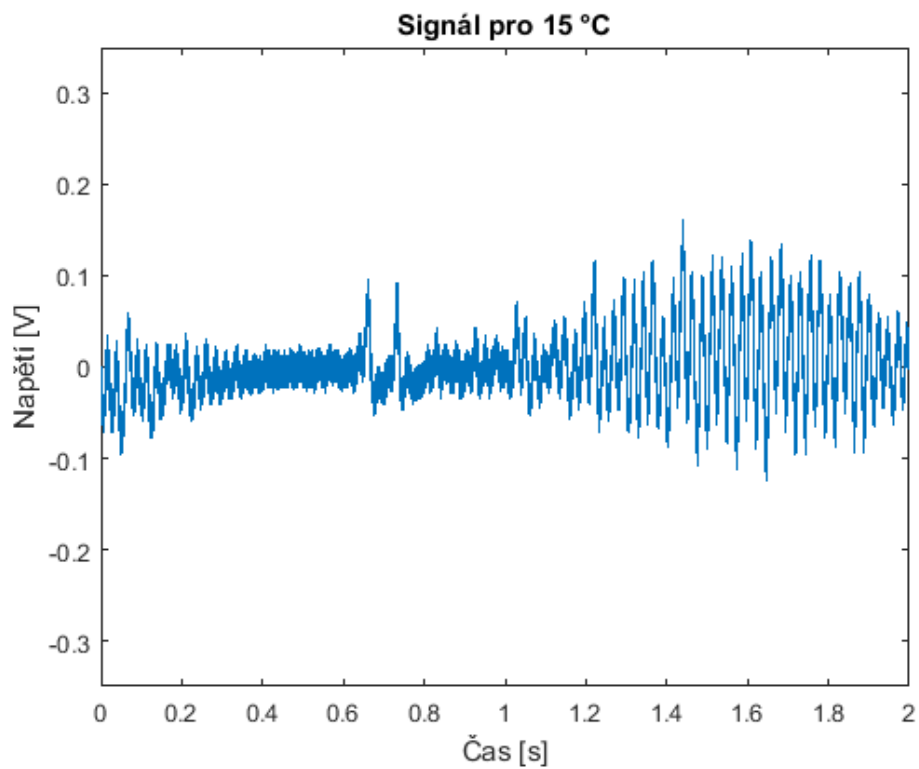
6.1.2 Získané poznatky

Z grafů pro zobrazení intenzity signálu v závislosti na čase je zřejmé, že měření teploty pomocí Machova-Zehnderova modulátoru je velmi náchylné na okolní vibrace. Jakýkoliv pohyb či záchvěv je ihned brán v potaz. Důležitou zmínkou je podstata tohoto měření a to ta, že měření teploty tímto způsobem je měřením relativním, ne absolutním, tzn., že nelze změřit přesnou teplotu pomocí optického vlákna nýbrž jen teplotní změnu, která se projeví v okolí vlákna. Dále z grafů zobrazených spekter signálů můžeme vyčíst frekvence, které jsou přibližně stejné pro všechny změřené teploty, na kterých se projevuje teplotní změna. Rozmezí těchto frekvencí je mezi 54,5 Hz až 59,5 Hz a mezi 80,5 Hz až 98 Hz. U některých teplot byla ještě společná frekvence okolo 580 Hz, ovšem ta nebyla společná ve spektru u všech uvedených teplot.

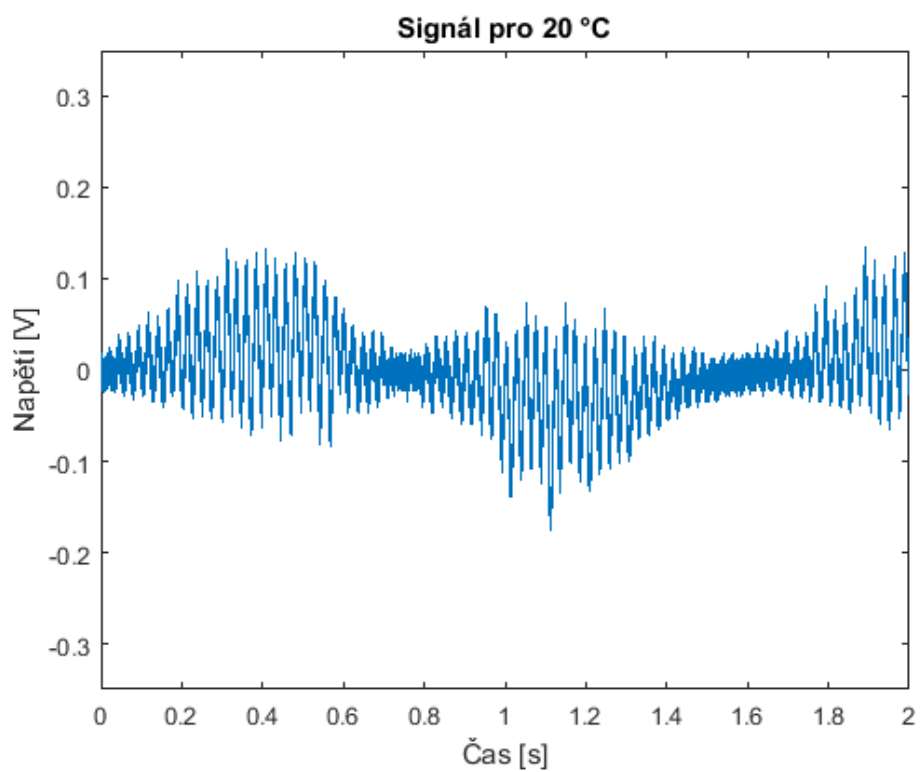
6.1.3 Měření teploty s rychlou změnou teploty

Měření teploty s rychlou změnou teploty probíhalo tak, že jsem nastavil počáteční teplotu 15 °C. Na kontroléru pro Peltierův článek jsem v menu nastavil topení a na displeji (pomocí potenciometru) teplotu 60 °C. Jak teplota stoupala, snažil jsem se zapnout měření vždy v době, kdy teplota v termokomoře byla stejná, jako při měření ustálené teploty, tedy s krokem 5 °C. Zde měření probíhalo taktéž 2 s, ale počet vzorků byl menší (1 048 576 vzorků). Vzorkovací frekvence byla 0,524 MSa/s. Po celou dobu tohoto měření byl větrák s čerpadlem zapnut.

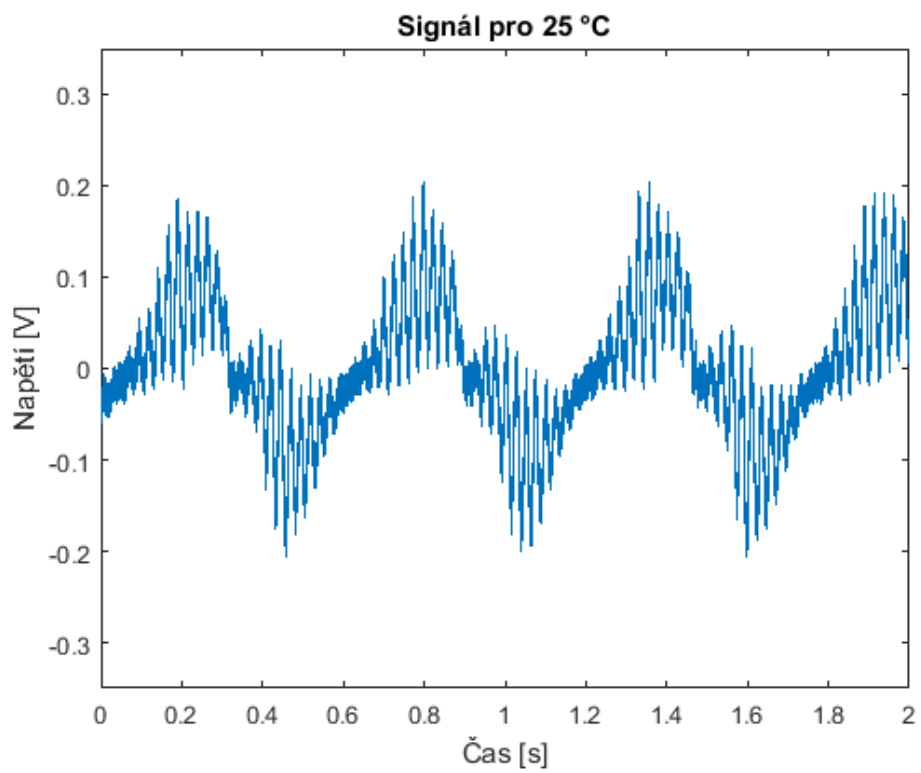
Dosažené grafy intenzity signálu v závislosti na čase



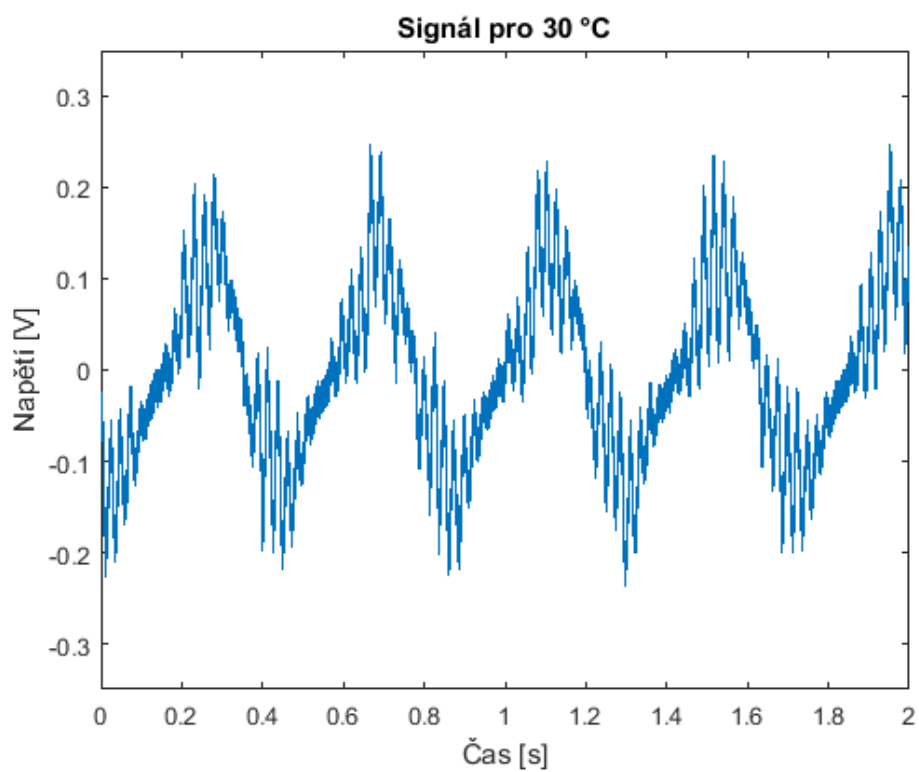
Obr. 6.22: Průběh signálu pro 15 °C – rychlá změna teploty



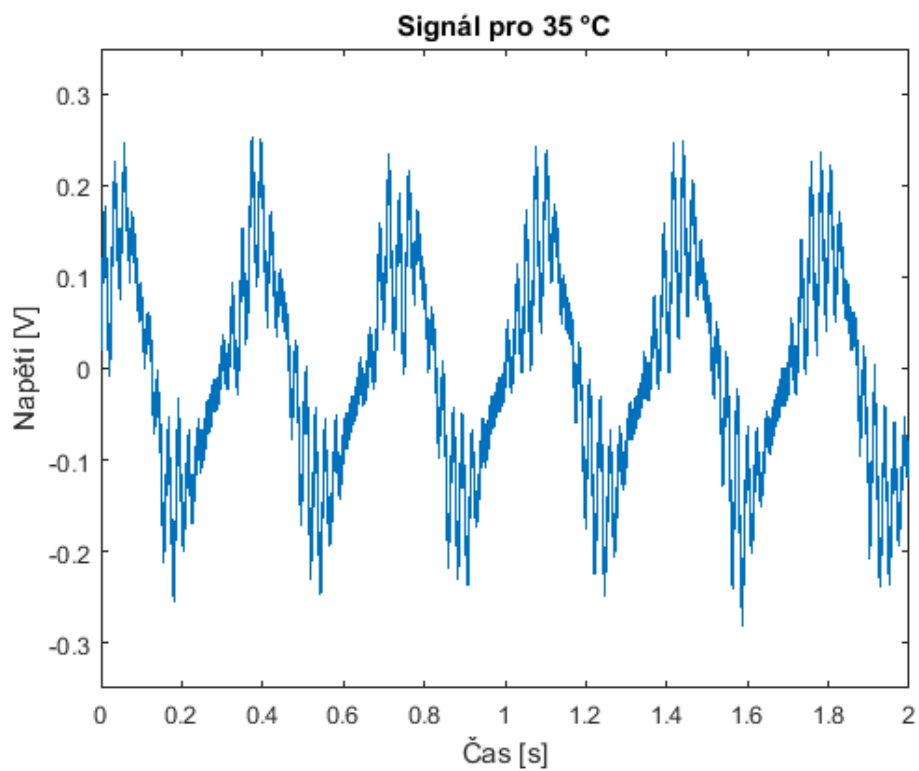
Obr. 6.23: Průběh signálu pro 20 °C – rychlá změna teploty



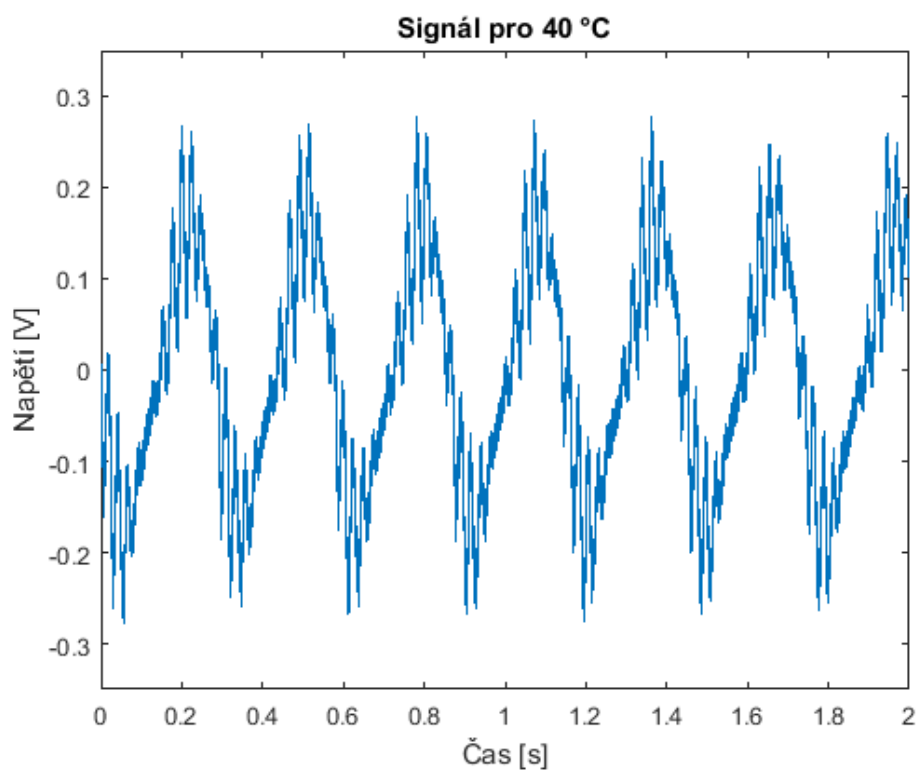
Obr. 6.24: Průběh signálu pro 25 °C – rychlá změna teploty



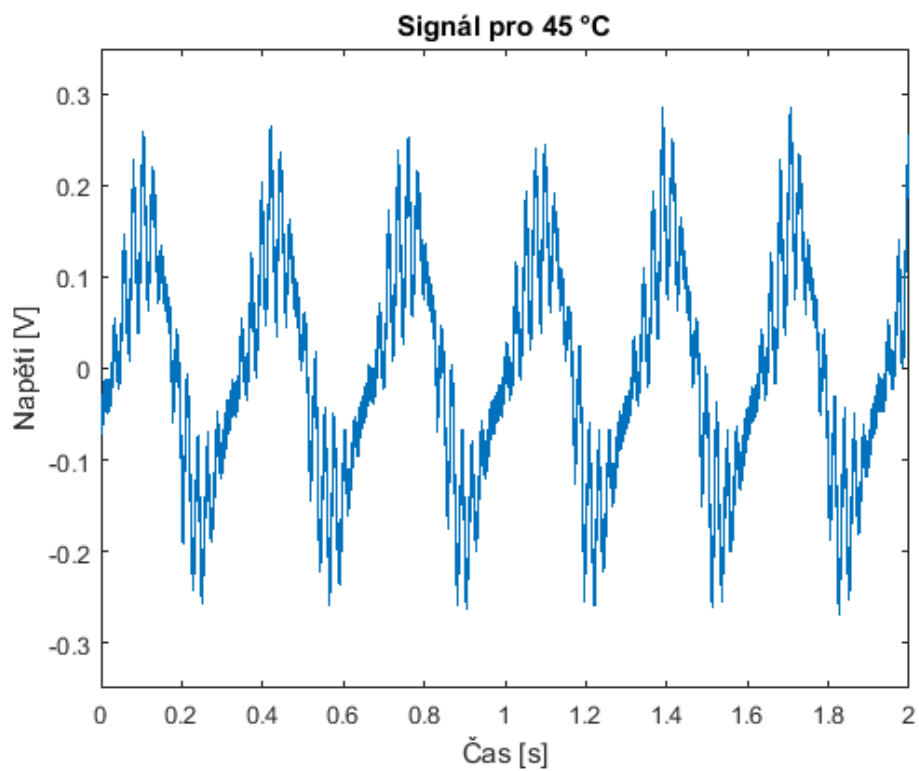
Obr. 6.25: Průběh signálu pro 30 °C – rychlá změna teploty



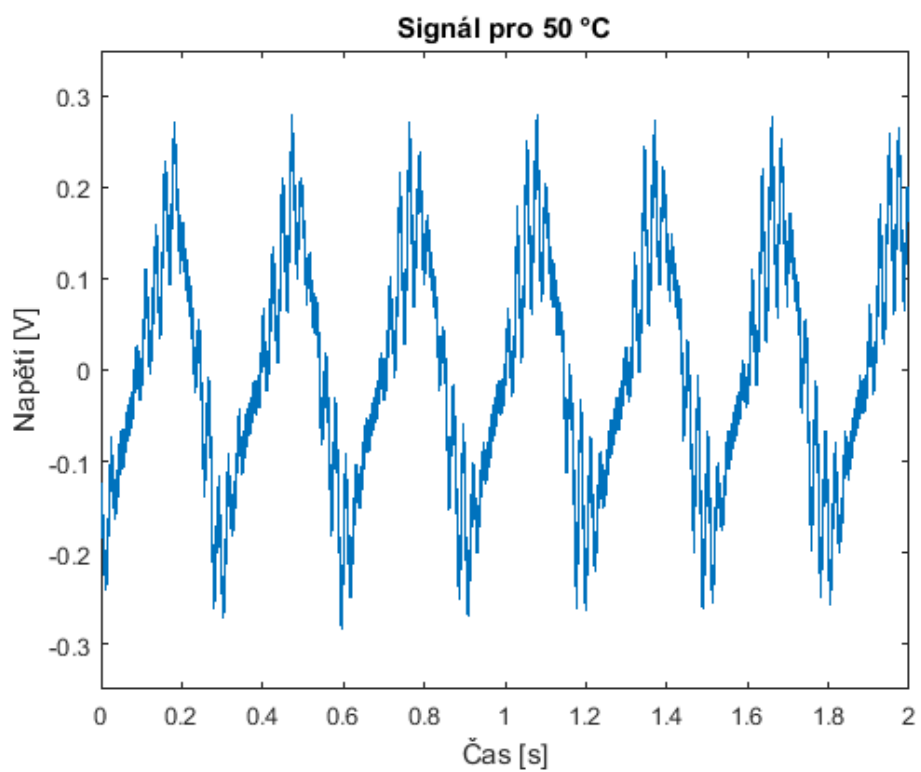
Obr. 6.26: Průběh signálu pro 35 °C – rychlá změna teploty



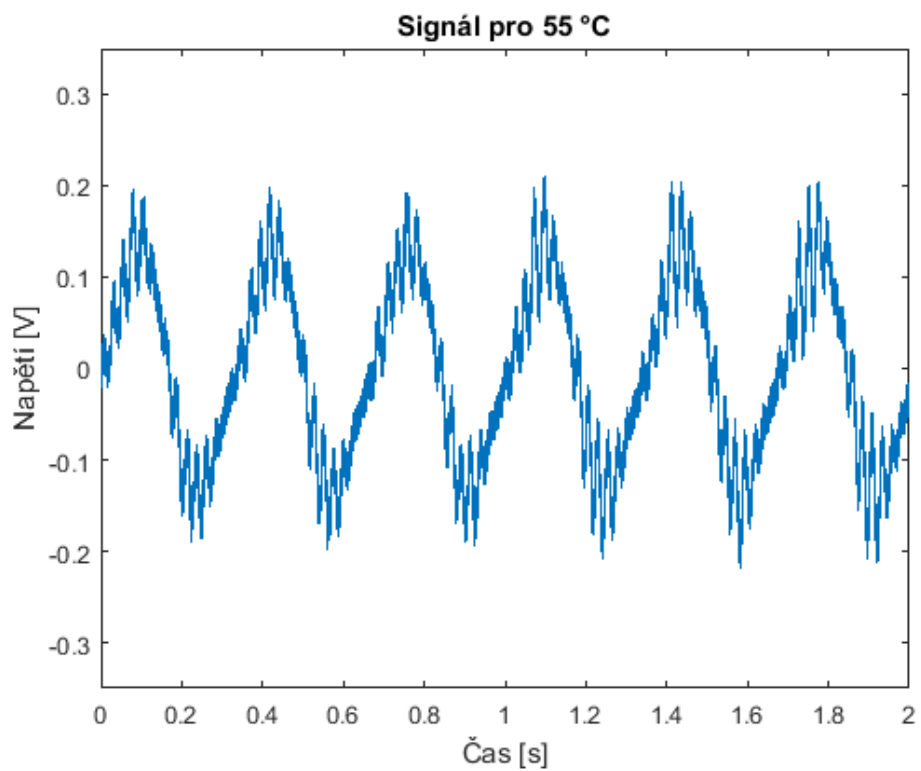
Obr. 6.27: Průběh signálu pro 40 °C – rychlá změna teploty



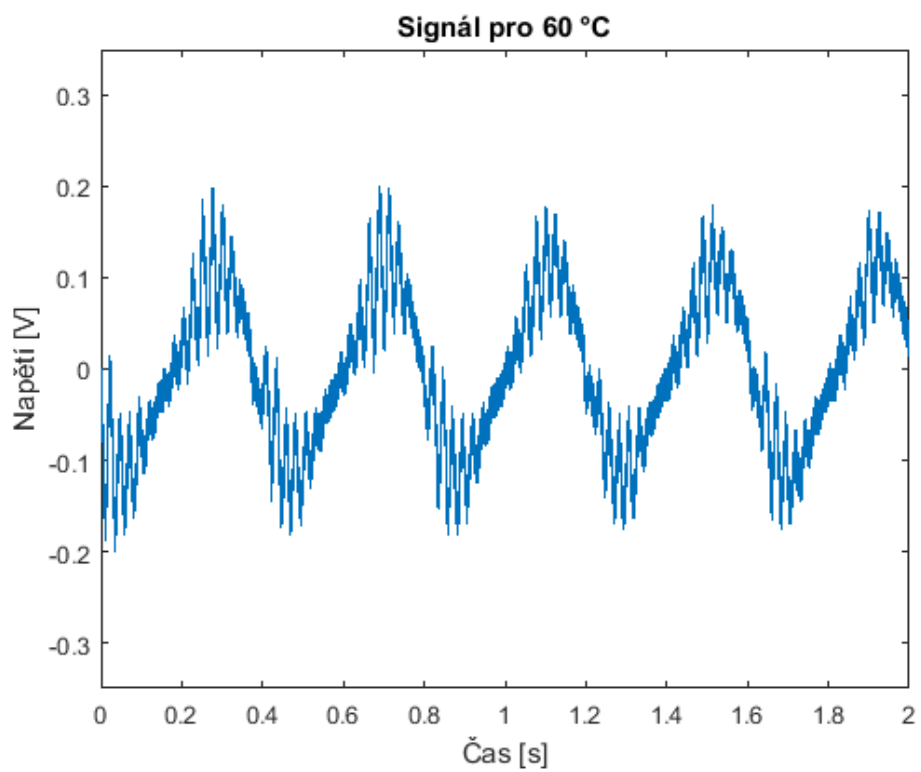
Obr. 6.28: Průběh signálu pro 45 °C – rychlá změna teploty



Obr. 6.29: Průběh signálu pro 50 °C – rychlá změna teploty

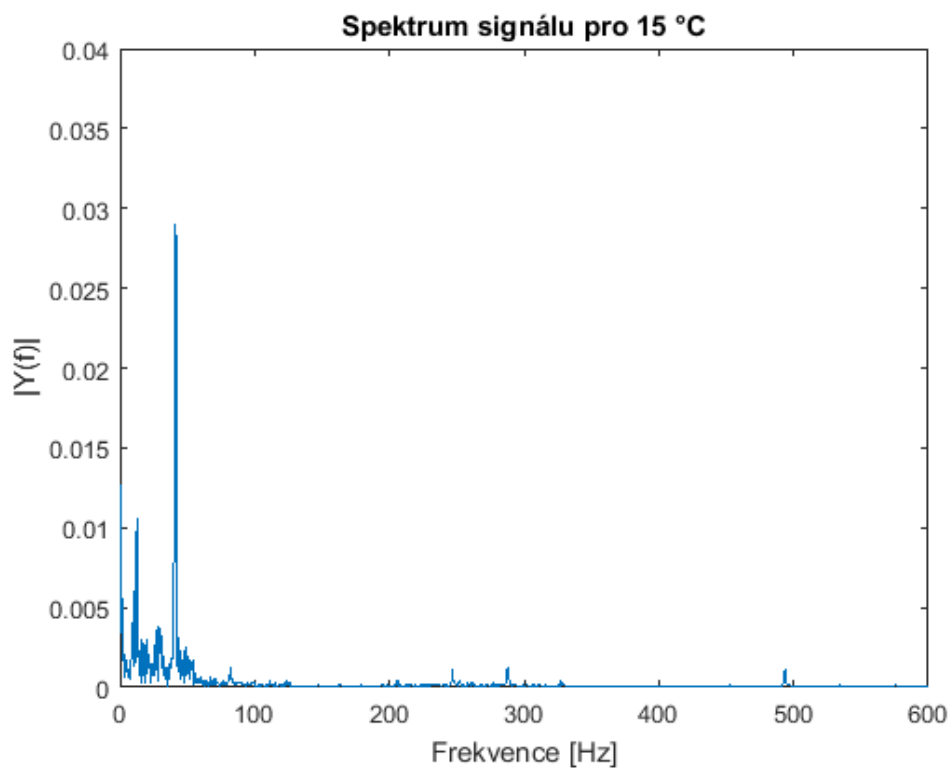


Obr. 6.30: Průběh signálu pro 55 °C – rychlá změna teploty

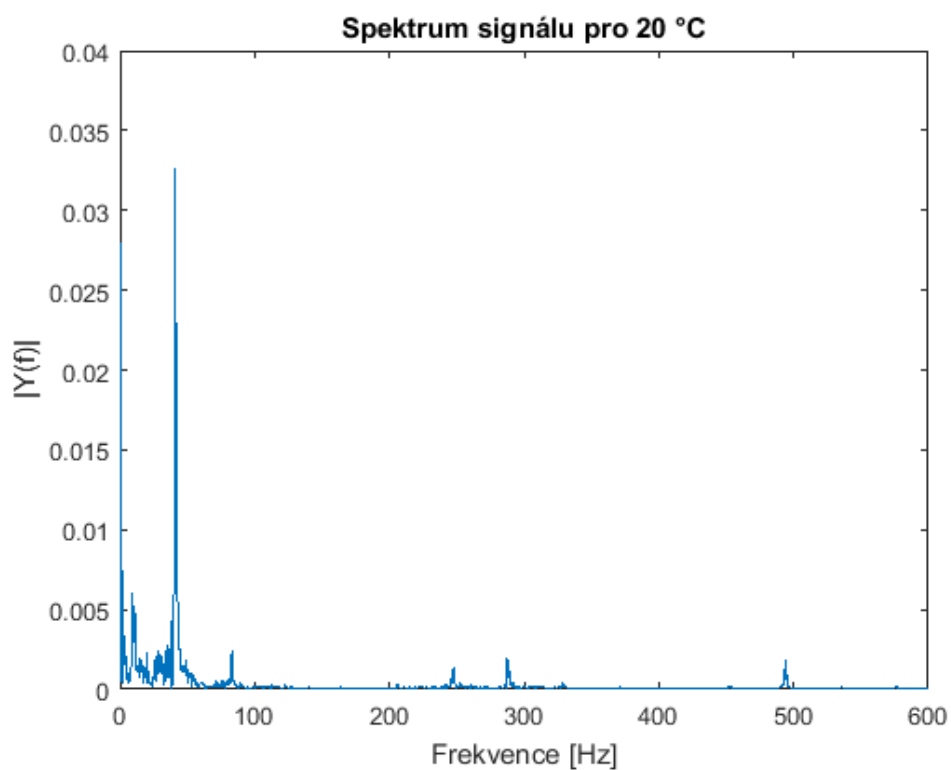


Obr. 6.31: Průběh signálu pro 60 °C – rychlá změna teploty

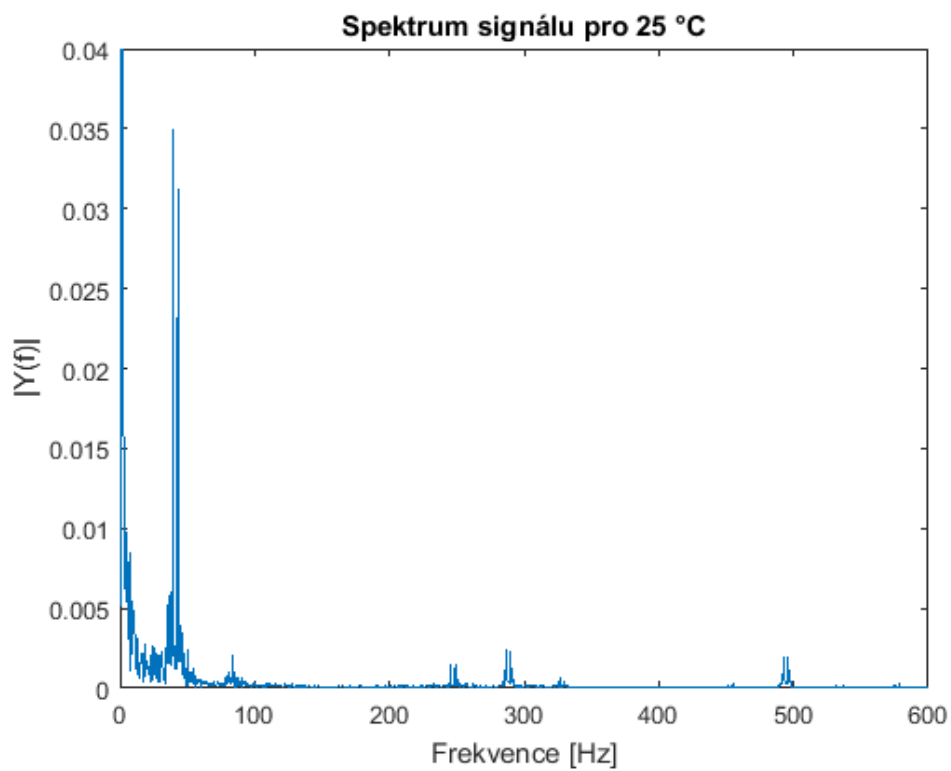
Spektrum signálu pro jednotlivé teploty



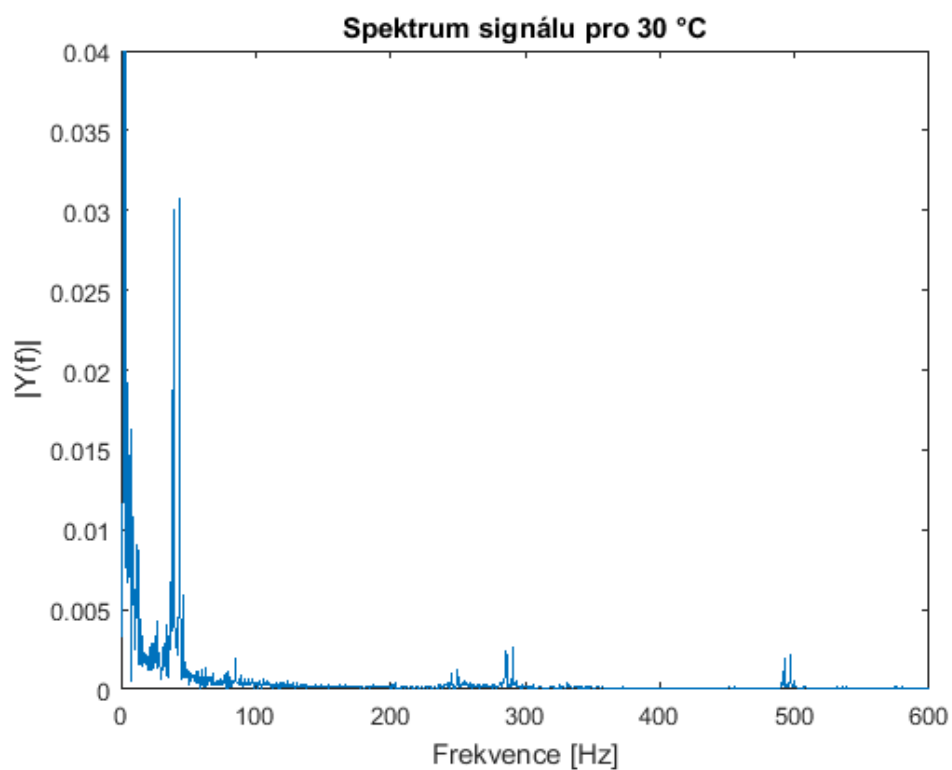
Obr. 6.32: Spektrum signálu pro 15 °C – rychlá změna teploty



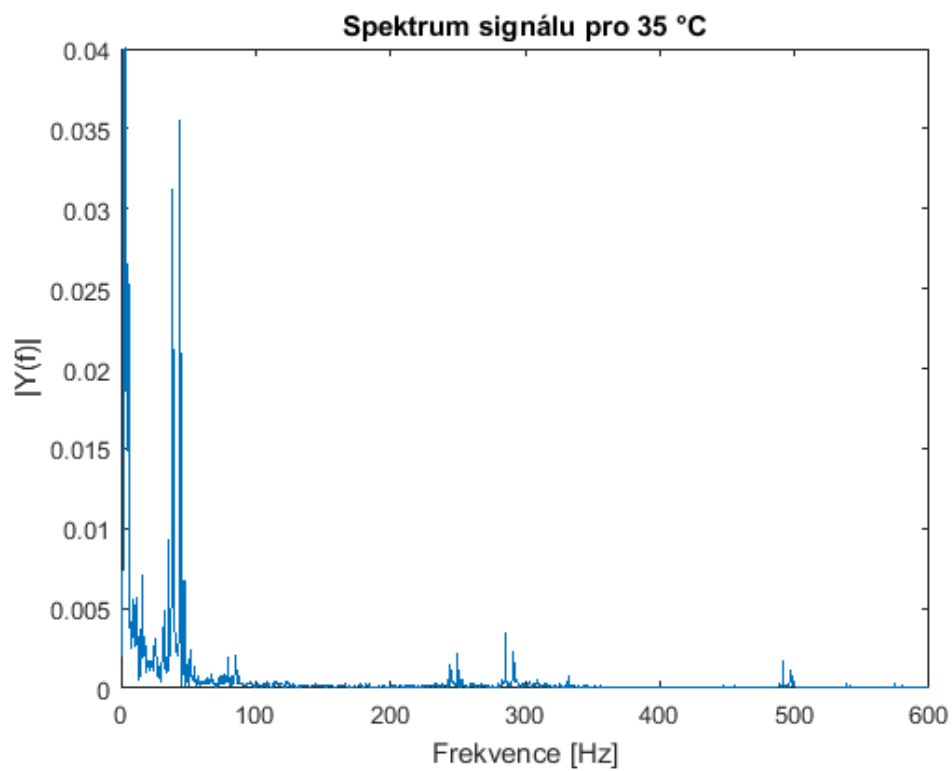
Obr. 6.33: Spektrum signálu pro 20 °C – rychlá změna teploty



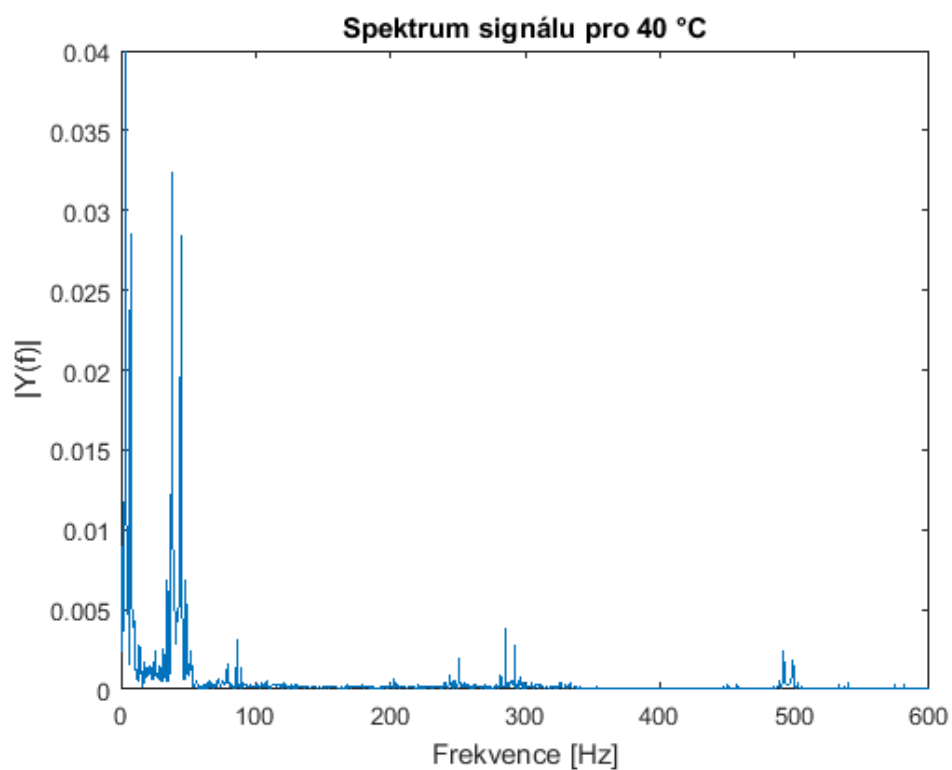
Obr. 6.34: Spektrum signálu pro 25 °C – rychlá změna teploty



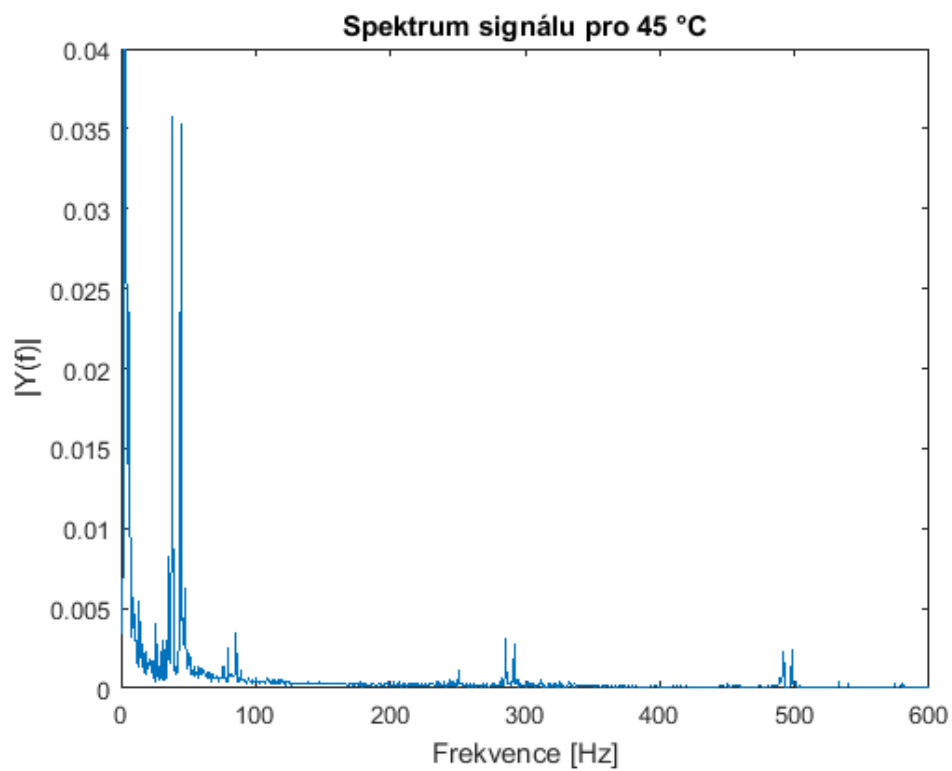
Obr. 6.35: Spektrum signálu pro 30 °C – rychlá změna teploty



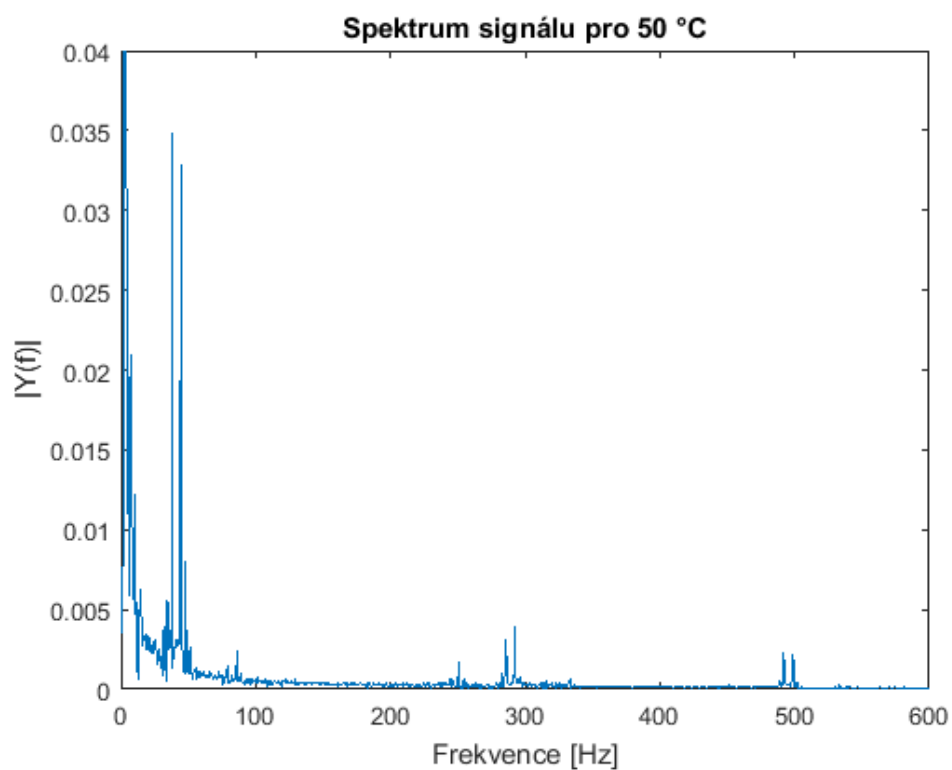
Obr. 6.36: Spektrum signálu pro 35 °C – rychlá změna teploty



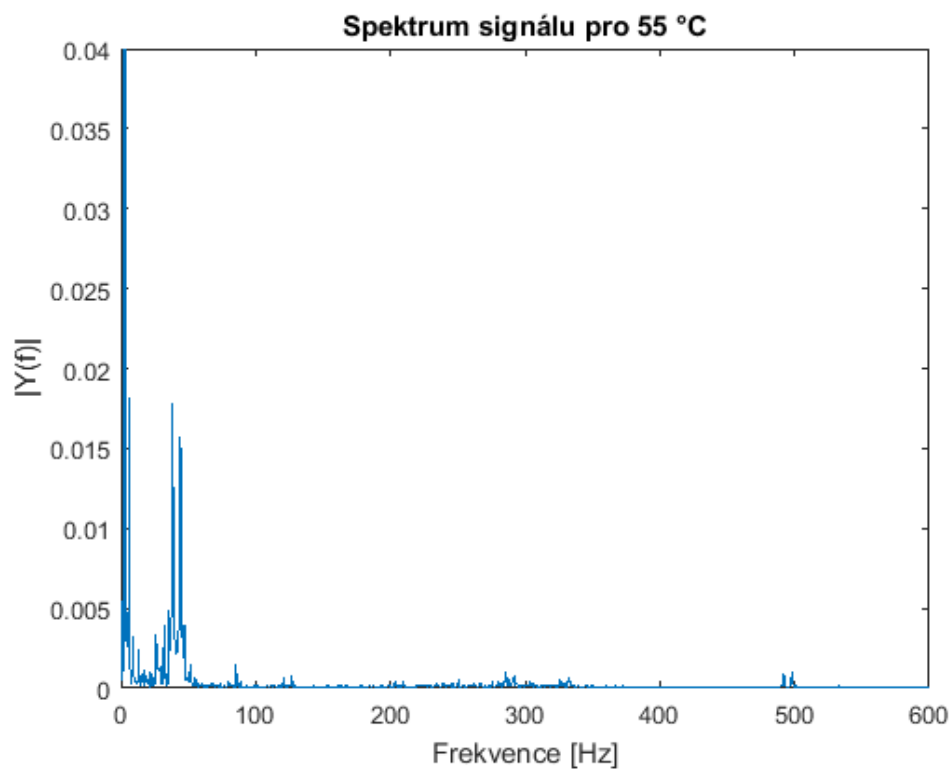
Obr. 6.37: Spektrum signálu pro 40 °C – rychlá změna teploty



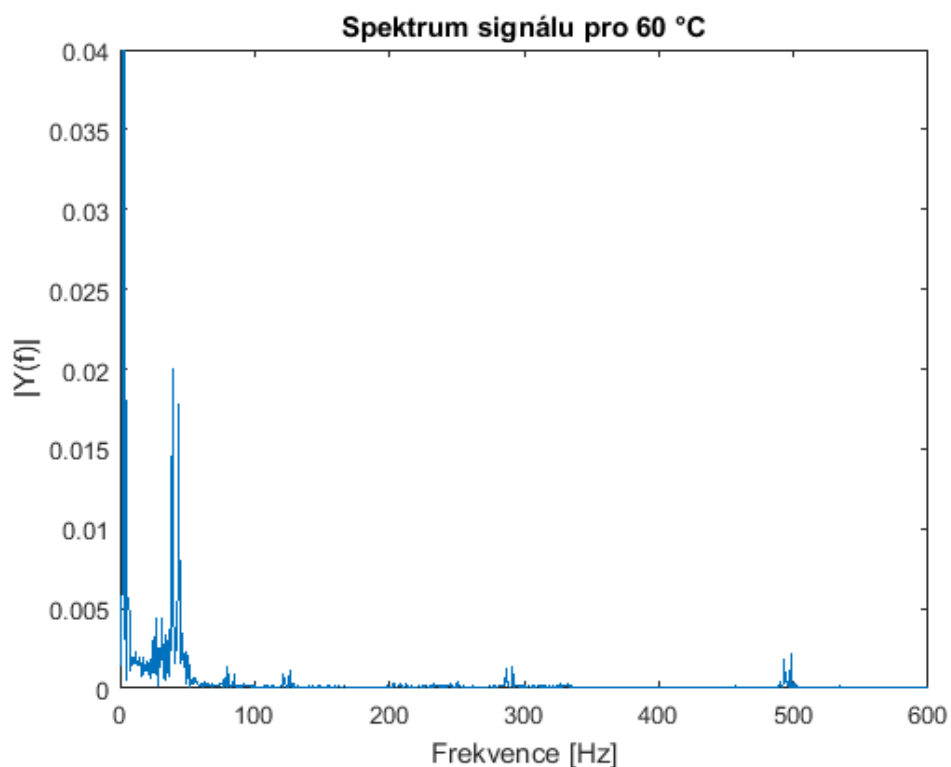
Obr. 6.38: Spektrum signálu pro 45 °C – rychlá změna teploty



Obr. 6.39: Spektrum signálu pro 50 °C – rychlá změna teploty



Obr. 6.40: Spektrum signálu pro 55 °C – rychlá změna teploty



Obr. 6.41: Spektrum signálu pro 60 °C – rychlá změna teploty

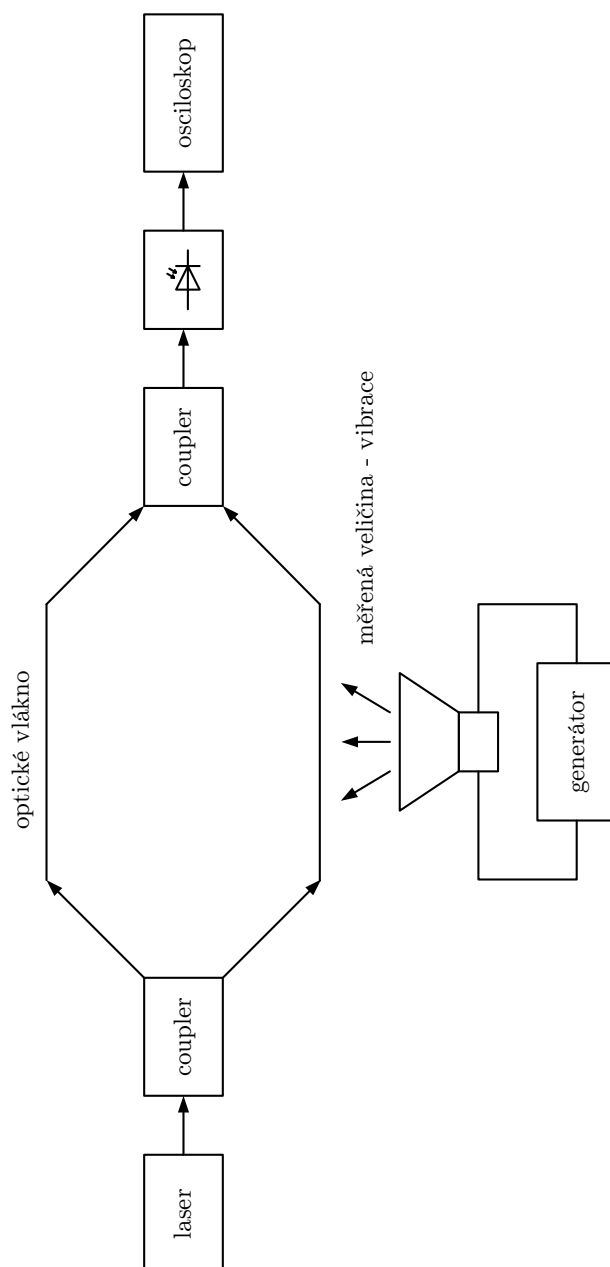
6.1.4 Získané poznatky

U tohoto měření teploty (s rychlou změnou nastavené teploty) se okolní rušivé vibrace tolik neprojevují, jak můžeme vidět na grafech pro intenzitu signálu v závislosti na čase měření. Ovšem to může být dáno i podstatně menší vzorkovací frekvencí, než v případě měření teploty s ustálenou nastavenou hodnotou teploty. Mohlo se také stát, že tyto okolní vibrace zastínily vibrace ze zapnutého větráku a čerpadla. Ze zobrazených grafů pro spektrum signálu pro jednotlivé teploty si můžeme všimnout vždy dvou frekvenčních složek vedle sebe. Frekvence, kde to můžeme zpozorovat např. jsou: 39–41 Hz a 42–44,5 Hz; 286–288 Hz a 290–292,5 Hz.

7 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VIBRACÍ

Měření akustických vibrací sice není cílem práce, ovšem toto měření nám mělo posloužit k tomu, abychom zjistili do jaké míry akustické vibrace ovlivňují naše měření teploty. Měření jsme prováděli také pomocí Machova-Zehnderova modulátoru v kanceláři SE5.121 (Technická 12, Brno 616 00), kde byla sestavena měřící sestava, dle obr. 7.1.

7.1 Schéma zapojení

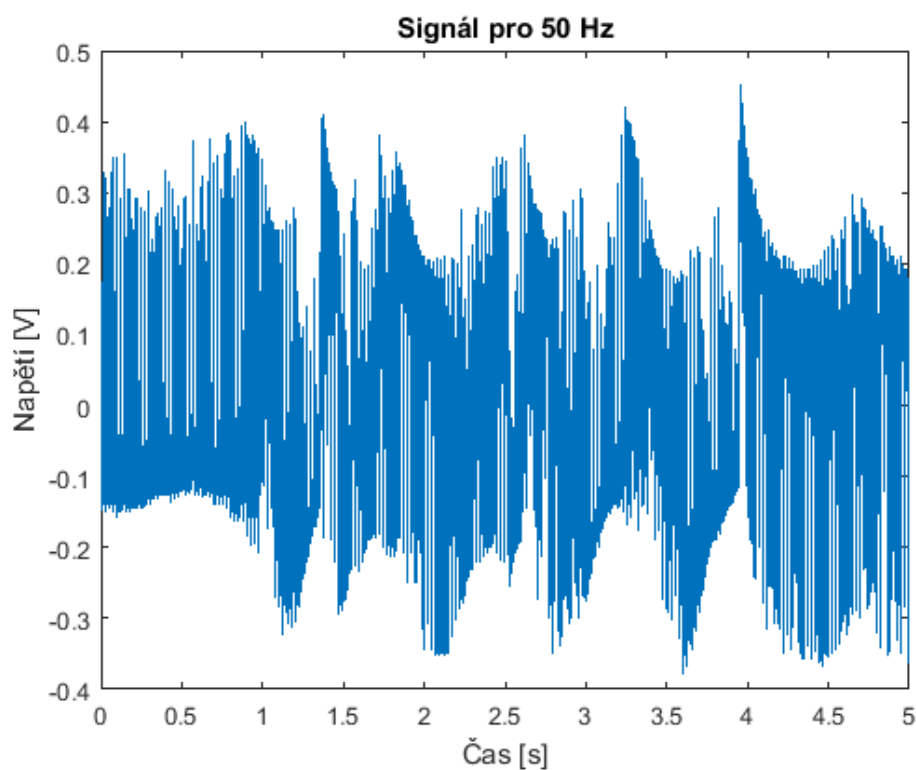


Obr. 7.1: Schéma zapojení systému pro měření akustických vibrací

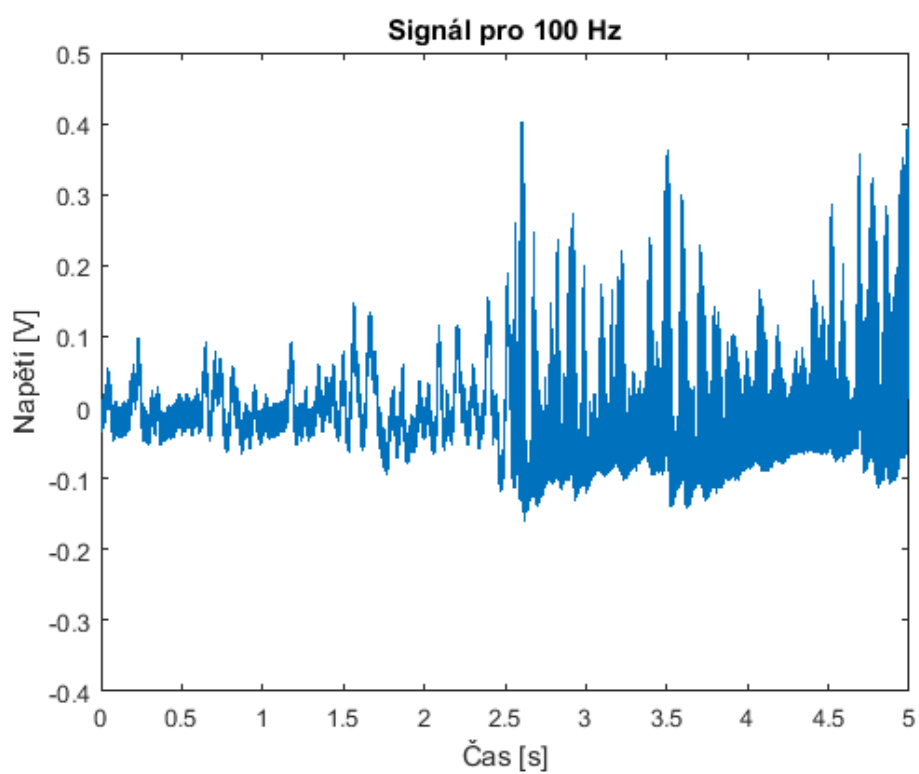
7.2 Popis měření

Oproti měření teploty, kde byl veškerý měřicí systém umístěn na stole, při tomto měření bylo měřicí rameno optického vlákna i s reproduktorem umístěno na podlaze. Rameno referenční a zbytek měřicí sestavy byl umístěn na stole. Měření probíhalo tak, že na připraveném generátoru jsem si nastavil potřebnou frekvenci (50 Hz, 100 Hz a 250 Hz) a spustil generátor. Ten vysílal signál do reproduktoru, který nastavenou frekvencí ovlivňoval optické vlákno. Obě ramena byly dlouhé 5 m. Každé měření trvalo 5 s a celkem bylo zaznamenáno 16 mil. vzorků, což znamená, že vzorkovací frekvence byla 3,2 MSp/s.

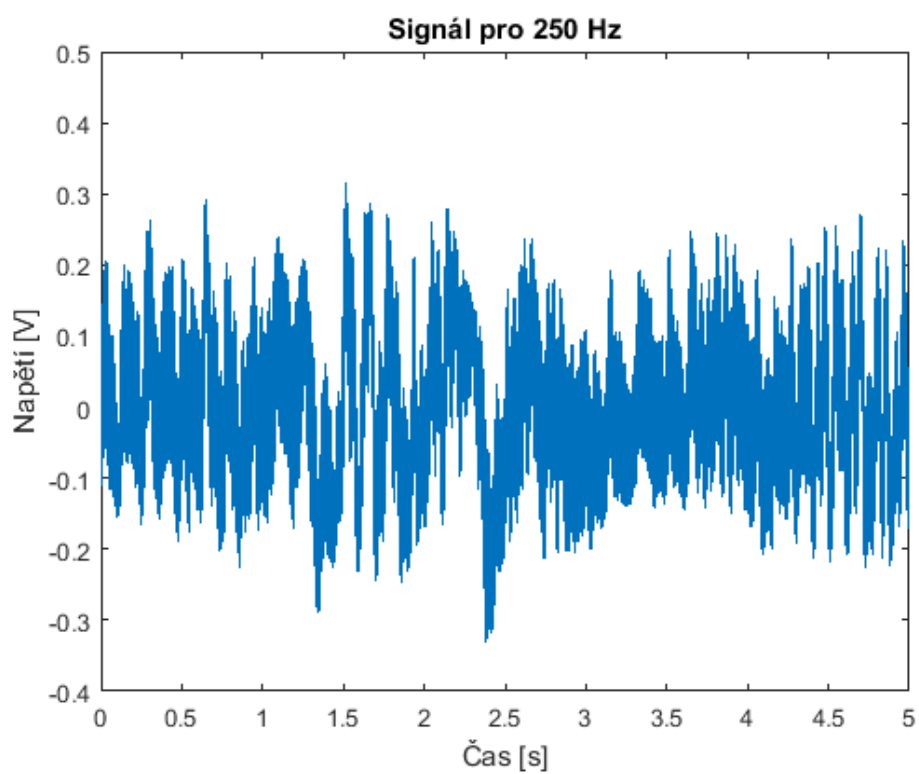
7.3 Grafy získané měřením



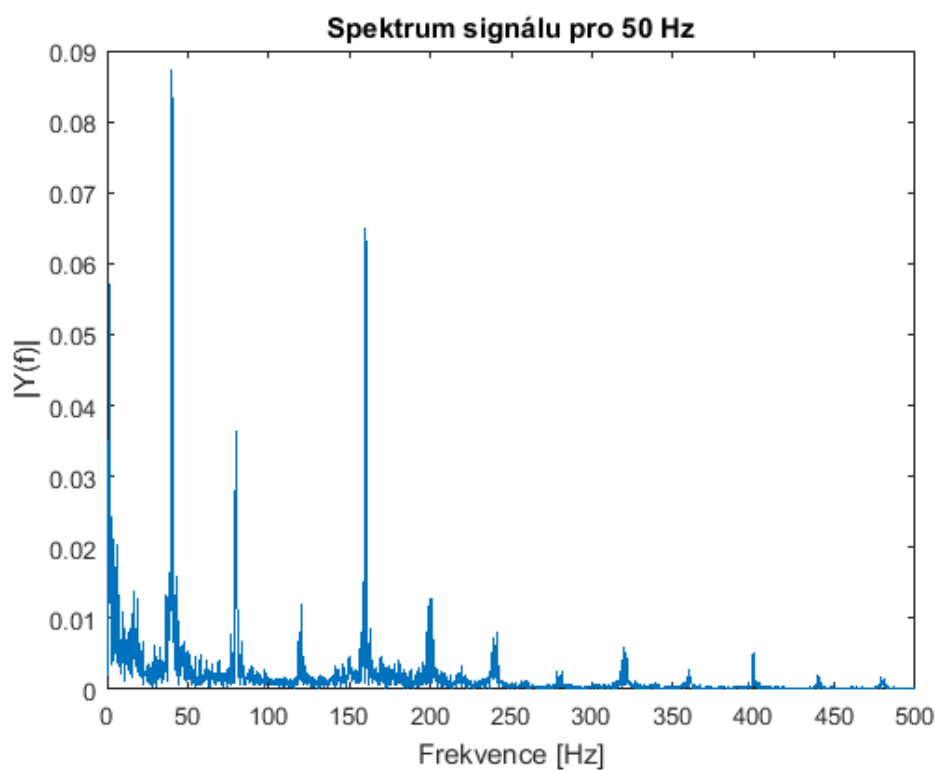
Obr. 7.2: Průběh signálu pro 50 Hz



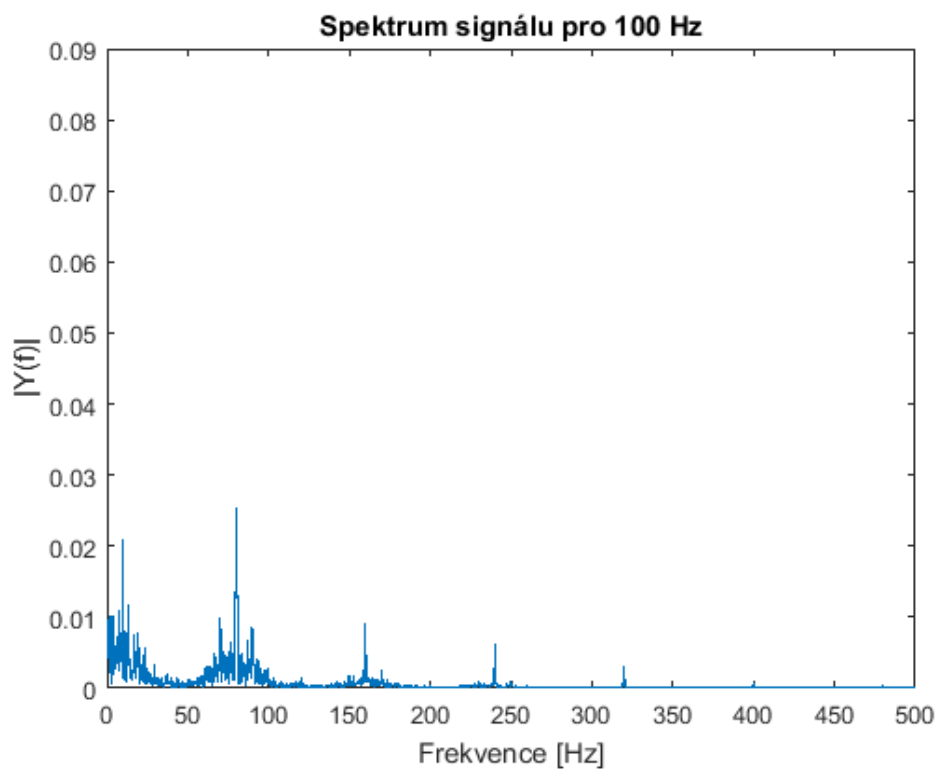
Obr. 7.3: Průběh signálu pro 100 Hz



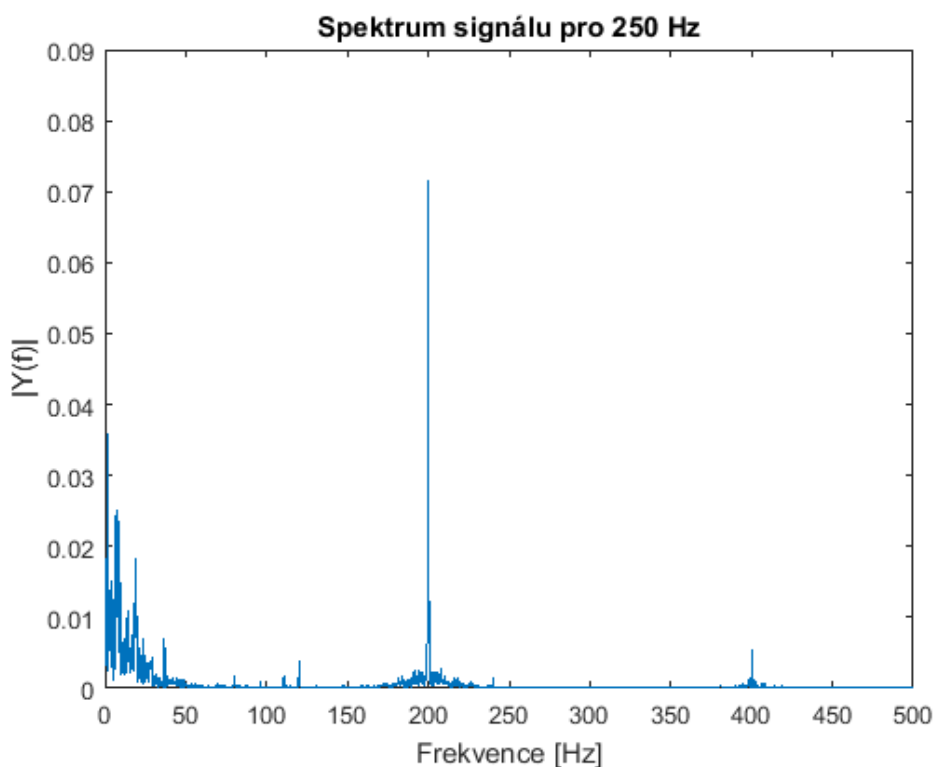
Obr. 7.4: Průběh signálu pro 250 Hz



Obr. 7.5: Spektrum signálu pro 50 Hz



Obr. 7.6: Spektrum signálu pro 100 Hz



Obr. 7.7: Spektrum signálu pro 250 Hz

7.4 Získané poznatky

Ze zobrazených grafů spekter signálu je zřejmá určitá odchylka od frekvence nastavené na generátoru. Pro signál z generátoru o frekvenci 50 Hz jsem pomocí Fourierovy transformace zjistil, že spektrum signálu neodpovídá úplně přesně, jak by mělo, jelikož jsem po Fourierově transformaci (spočítanou pomocí Matlabu) dostal frekvenci 39,7 Hz, která se poté periodicky opakuje (viz 7.5). Tato mírná odchylka se objevuje i u dalších měření. Např. u nastavené frekvence 100 Hz jsem dostal pomocí spektra frekvenci 80,3 Hz (obr. 7.6) a pro nastavenou frekvenci 250 Hz to bylo 200,1 Hz (obr. 7.7). Tyto odchylky mohou být dány tím, že optické vlákno i s reproduktorem bylo položeno na podlaze, v důsledku čehož mohly vznikat různé zázněje apod.

8 ZÁVĚR

Výsledkem této práce jsou, na základě získaných vědomostí, dva návrhy měřícího systému DTS. Jeden návrh využívá (pro zjištění teplotní změny) Ramanův rozptyl, který by měl být schopen měřit teplotu podél optického jednovidového vlákna. Druhý návrh využívá Machův-Zehnderův modulátor. Tento druhý návrh byl otestován a pomocí něj jsem měřil teplotní změnu.

V práci byly postupně probrány optické vláknové senzory, rozptyly světelného záření, které se využívají k měření teploty, a DTS systémy. Mezi rozptyly záření, pomocí kterých se dá změřit teplota podél optického vlákna patří: Rayleighův rozptyl, Ramanův rozptyl a Brillouinův rozptyl. Na základě dosažených znalostí jednotlivých rozptylů jsem se dozvěděl, že pro měření teploty se nejčastěji využívá Brillouinův rozptyl, je nejstabilnější a nejpřesnější.

Pro navržený systém DTS (obr. 4.1, využívající Ramanův rozptyl ke zjištění teplotní změny) nebylo měření provedeno z důvodu finanční náročnosti na sestavení systému a také z důvodu toho, že škola měla Machův-Zehnderův modulátor již sestrojený, jelikož na něm měřili i další kolegové. Velkou roli hrálo i to, že interferometrická metoda je považována za jednu z nejpřesnějších metod měření. Měřící systém využívající Ramanův rozptyl má dvě složky: Stokesovu složku a Anti-Stokesovu složku. Teplotu měřenou v optickém vlákne získáme porovnáním intenzit těchto dvou složek na správných vlnových délkách. Základem návrhu měření je světelný signál o vlnové délce 1530 nm vyslaný do optického vlákna. Potřebnou Anti-Stokesovu a Stokesovu složku bychom měli, dle teoretického předpokladu, nalézt na vlnových délkách 1460 nm až 1490 nm (Anti-Stokesova složka) a 1570 nm až 1625 nm (Stokesova složka). Součástí návrhu je i výpočet předpokládaného výkonu zpětně odražených signálů s různými délkami optického vlákna (tab. 4.1). Jednotlivé části navrženého systému jsou popsány v kapitole 4 (Vlastní návrh systému DTS).

Výslednou částí této práce je změření teploty pomocí Machova-Zehnderova modulátoru, přesněji, měření teploty prováděné pomocí Machova-Zehnderova interferometru je měření relativní, což znamená, že nelze změřit přesnou teplotu, nýbrž měří se pouze teplotní změna. Měření byla provedena dvojnásobně, měření ustálené nastavené teploty a měření s rychlou změnou teploty. Porovnáním těchto dvou měření bylo zjištěno, že změna teploty se projevuje ve frekvenčních rozmezích mezi 40 až 60 Hz a 80 až 100 Hz. Z toho vyplývá: teplotní změna ovlivňuje frekvenci právě v těchto dvou rozmezích. Dalším výsledkem, ačkoli to není cílem práce, je proměření akustických vibrací pomocí optického vlákna. Měření bylo provedeno i z toho důvodu, abych zjistil do jaké míry může být ovlivněno měření teploty akustickými vibracemi. Zjistil jsem, že při měření teploty pomocí interferometru v místnosti, kde se měří, musí být absolutní klid a žádný pohyb, jinak dochází k zaznamenání těchto pohybů

a dochází tak ke zkreslenému výsledku měření.

Všechna měření, která byla provedena a jsou popsána v této práci, byla velmi náchylná na okolní vibrace. Jakýkoliv pohyb, či mírné otřesy způsobené chůzí člověka po chodbě byly ihned zaznamenány. Měření vyžadovalo absolutní ticho a klid.

LITERATURA

- [1] BEJČEK, L. *Optické vláknové snímače teploty* [online]. Praha: Automa, 2011, [cit. 2015-11-2]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1P0BWJP>>.
- [2] BEJČEK, L. *Optoelektronické snímače*. Brno: 2005. Skripta. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce: Doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.
- [3] BRÁZDIL, M. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [4] DUŠEK, M. – MAZANEC, M. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. Brno: 2012. Učební texty k semináři. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [6] HARUN, S. W. – YASIN, M. – RAHMAN, H. A. – AROF, H. – AHMAD, H. *Fiber Optic Temperature Sensors*, In *Optical Fiber Communications and Devices* [online]. Rijeka: InTech Europe, 2012. Kapitola 17. s. 361–380. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1j4TdT3>>.
- [7] HYNEK, J. *Rozprostřené optické vláknové senzory na dlouhé vzdálenosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2013. 95 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, PhD.
- [8] LÁTAL, J. – KOUDELKA, P. – HANÁČEK, F. *Využití distribuovaných optovláknových systémů při detekci průvanů v jeskynných systémech* [online]. Brno: Elektrově, 2010, [cit. 2015-10-15]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1N8p0AC>>.
- [9] MATĚJKA, P. *Ramanova spektrometrie* [online]. 2008, [cit. 2015-10-20]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1Vk9TX5>>.
- [10] PASCHOTTA, R. *Erbium-doped Fiber Amplifiers* [online]. Encyklopedie laserové techniky, 2008 [cit. 2015-12-8]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1NMrYJn>>.
- [11] PETERKA, P. *Vláknové lasery* [online]. Praha: 2014, [cit. 2015-12-8]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1J23TJc>>.

- [12] QUICK-OHM. *Component-Head Management-High Tech Ceramic* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1XVdQ1V>>.
- [13] ROGERS, A. *Polarization in Optical Fibers*. Artech House: 2008. 273 s. ISBN 9781596933491.
- [14] RŮŽIČKA, R. *Optická vlákna jako snímače teplot a deformací a jejich aplikace v chytrých konstrukcích*. Praha: 2006. Skripta. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce: Radek Růžička.
- [15] SMOLEN, J. J. *Distributed Temperature Sensing* [online]. Missouri City: 2003. [cit. 2015-11-21]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1TGUYE6>>.
- [16] UDD, E. – SPILLMAN, W. B. *Fiber optic sensors : an introduction for engineers and scientists–2nd ed..* New Jersey: Wiley and Sons, 2011, 506 s., ISBN 978-1-118-01408-0.
- [17] UKIL, A. – BRAENDLE, H. – KRIPPNER, P. *Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications* [online]. 2012, [cit. 2015-10-28]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1X4dIg2>>.
- [18] WANG, J. *Distributed Pressure and Temperature Sensing Based on Stimulated Brillouin Scattering* [online]. Blacksburg: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013, 56 s. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1QJ5UQY>>.
- [19] WAYNANT, R. W. – EDIGER, M. N. *Electro-Optics Handbook–2nd ed.* [online]. New York, 2000, [cit. 2015-11-10]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/1MyUR7Y>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DTS	distribuovaný teplotní senzor – Distributed Temperature Sensing
EOM	elektro optický modulátor – Electro Optic Modulator
OFDR	optická reflektometrie ve frekvenční oblasti – Optical Frequency Domain Reflectometry
OTDR	optická reflektometrie v časové oblasti – Optical Time Domain Reflectometry
OVS	optický vláknový senzor – Fiber Optic Sensor
WDM	vlnový multiplex – Wavelength Division Multiplexing
e	Eulerovo číslo
h	Planckova konstanta
k	Boltzmannova konstanta

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého média

81

A OBSAH PŘILOŽENÉHO MÉDIA

Příložené DVD obsahuje tyto složky:

1. grafy,
2. MATLAB,
3. náměry,
4. práce.

Složka grafy obsahuje:

- rychlá změna teploty – grafy pro rychlou změnu teploty.
- ustálená teplota – grafy pro ustálenou nastavenou teplotu.
- vibrace – grafy pro měření akustických vibrací.

Ve složce MATLAB je uložena funkce, pomocí které jsem nahrával data a vytvářel grafy. Verze Matlab 2015a.

Složka náměry obsahuje:

- rychlá změna teploty – naměřené hodnoty pro rychlou změnu teploty.
- ustálená teplota – naměřené hodnoty pro ustálenou nastavenou teplotu.
- vibrace – naměřené hodnoty pro měření akustických vibrací.

Složka práce obsahuje soubor .pdf s elektronickou verzí práce.