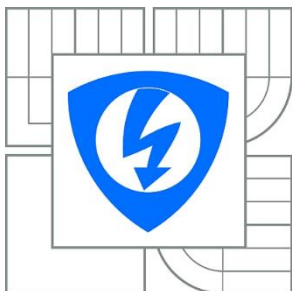


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH OPTOVLÁKNOVÉHO SENZOROVÉHO SYSTÉMU PRO MĚŘENÍ ZMĚN DĚLKY

DESIGN OF THE OPTICAL FIBER SENSOR SYSTEM TO MONITORING CHANGE OF
LENGTH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

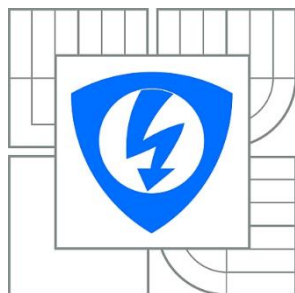
MICHAL JELÍNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. BŘETISLAV MIKEL, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Michal Jelínek

ID: 146028

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

**Návrh optovláknového senzorového systému pro měření
změn délky**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte systém pro měření délek s využitím optovláknových senzorů s Braggovými mřížkami. Návrh bude obsahovat kompletní zapojení systému, návrh a ověření metody měření a přípravu jednotlivých senzorů s optickými vlákny. Ověřte navržený systém a uveďte jeho výhody a nevýhody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady 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

Bakalářská práce se zabývá návrhem a ověřením optovláknového senzorového systému pro měření změn délky, který je určen pro monitorování stavu kontejnmentů v jaderné elektrárně. Je zde popsán princip měření, jeho návrh a realizace první verze. Princip měření a funkčnost celého systému byla ověřena při měření speciálně připraveného železobetonového nosníku. Nosník byl připraven tak, aby simuloval chování kontejnmentu jaderné elektrárny. V rámci vývoje systému byly připraveny vláknové senzory s Braggovými mřížkami, které jsou pak využity pro měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vláknové Braggovy mřížky, měření optických spekter, optovláknové senzory.

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with design and verification of optical fiber sensor system for measuring changes of length. This system is designed to shape monitoring of the nuclear power plant containment. The principle of measurement, design and realization of the first version is described in the work. Principle of measurement and functionality of the whole system was verified by measurement of specially prepared reinforced concrete console. The console was prepared in the way to simulate behaviour of containment of the nuclear power plant. Within development of system there were prepared of optical fiber sensors with Bragg's gratings which are later used for measurement.

KEYWORDS

Fiber Bragg grating, measurement of optical spectrum, optical fiber sensors.

JELÍNEK, M. *Návrh optovláknového senzorového systému pro měření změn délky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 44 s. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Návrh optovláknového senzorového systému pro měření změn délky**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2014

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Břetislavu Mikelovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2014

.....
podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
ÚVOD	9
1 Metody sledování stavu budov.....	10
1.1 Systém senzorů s odporovými tenzometry	11
1.2 Systémy senzorů založeny na Brilluinovém rozptylu.....	11
1.3 Systém senzorů s Braggovou mřížkou.....	12
2 Braggovy mřížky.....	13
2.1 Typy Braggových mřížek	14
2.1.1 Uniformní mřížky	14
2.1.2 Apodizované mřížky	14
2.1.3 Chirped mřížky	15
2.1.4 Blazed mřížky.....	15
2.2 Výroba Braggových mřížek.....	16
3 Metody měření	17
4 Konstrukce senzoru s mřížkami	19
4.1 Citlivost senzoru	22
4.2 Maximální protažení senzoru.....	24
5 Realizace kontrolního měření	26
5.1 Návrh měřicího systému	26
5.2 Metoda měření vlnové délky	27
5.3 Řízení	31
5.4 Experimentální měření.....	37
Závěr	41
Literatura	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1.1	Zátěžové testování viaduktu na dálnici A8 v Cantabrii ve Španělsku. V konstrukci viaduktu je umístěno 42 vláknových Braggových mřížek s délkou 60 cm, které měří teplotu a protažení [3].	10
obr. 2.1	Princip Braggovy vláknové mřížky, průchod vlny Braggovou mřížkou [9].	13
obr. 2.2	Typy Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizovaná, c) Chirped, d) Blazed.	15
obr. 2.3	Spektrum jednotlivých typů Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizované, c) Chirped, d) Blazed mřížky [10].	16
obr. 3.1	Princip zapojení více Braggových mřížek přes optický přepínač.	17
obr. 3.2	Princip zapojení Braggových mřížek seriově bez optického přepínače.	18
obr. 3.3	Princip sériového zapojení Braggových mřížek s optickým přepínačem. ...	18
obr. 4.1	Návrh konstrukce senzoru se 2 optickými vláknovými mřížkami.	20
obr. 4.2	Vyrobený senzor se zafixovanými Braggovými mřížkami; vlákno v černé ochraně měří protažení senzoru, vlákno ve žluté ochraně je určeno pro teplotní kompenzaci.	21
obr. 4.3	Závislost změny vlnové délky odraženého záření z vláknové mřížky s délkou 20 mm, která je v senzoru s délkou vlákna 100 mm na protažení.	21
obr. 4.4	Závislost Braggovy vlnové délky na teplotě vláknové mřížky.	22
obr. 5.1	Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky Braggovy mřížky.	27
obr. 5.2	Rozložení intenzity záření v planparalelním Fabry – Perotově rezonátoru pro dvě různé vlnové délky; M_1, M_2 – zrcadla rezonátoru, q -počet podélních modů rezonátoru [16z].	28
obr. 5.3	Rezonanční frekvence rezonátoru s rovinnými zrcadly.	29
obr. 5.4	Ladění optického filtru založeného na F-P rezonátoru. Plná křivka označuje rozložení vlny v rezonátoru při nejnižším napětí, přerušovaná křivka při nejvyšším napětí, kdy je zrcadlo M_2 posunuto z polohy M_2 na M_2' . Změní se tím vlnová délka splňující rezonanční podmínku (5.3).	30
obr. 5.5	Optický filtr Lightwaves2020 a jeho řídicí jednotka.	31
obr. 5.6	Vývojový diagram programu pro řízení měření.	32
obr. 5.7	Vývojový diagram programu pro řízení měření - část měření.	33
obr. 5.8	Ukázka části řídicího programu vytvořeného v LabVIEW.	34

obr. 5.9	Modulační trojúhelníkový signál se zobrazeným signálem z optického filtru – bílá čára.....	35
obr. 5.10	Přední ovládací panel řídicího programu v LabVIEW.....	36
obr. 5.11	Naměřené hodnoty časové stálosti filtru při zkouškách systému.	36
obr. 5.12	Blokové schéma měření změn délky na betonovém nosníku v ÚJV Řež. ...	37
obr. 5.13	Experimentální ověření optického senzorového systému v ÚJV Řež.....	38
obr. 5.14	Časový graf zobrazující pnutí na betonovém nosníku při krokovém zatížení od 0 do 20 kN s krokem 5 kN. Modrá barva zobrazuje výsledek senzoru umístěného pod nosníkem, červená barva zobrazuje výsledek senzoru umístěného na horní straně nosníku.	38
obr. 5.15	Fotografie z přípravy systému pro měření v ÚJV Řež.	39
obr. 5.16	Rack s SLED diodou, tepotním a proudovým kontrolorem.	39
obr. 5.17	Fixování Braggových mřížek do konstrukce senzoru.	40

ÚVOD

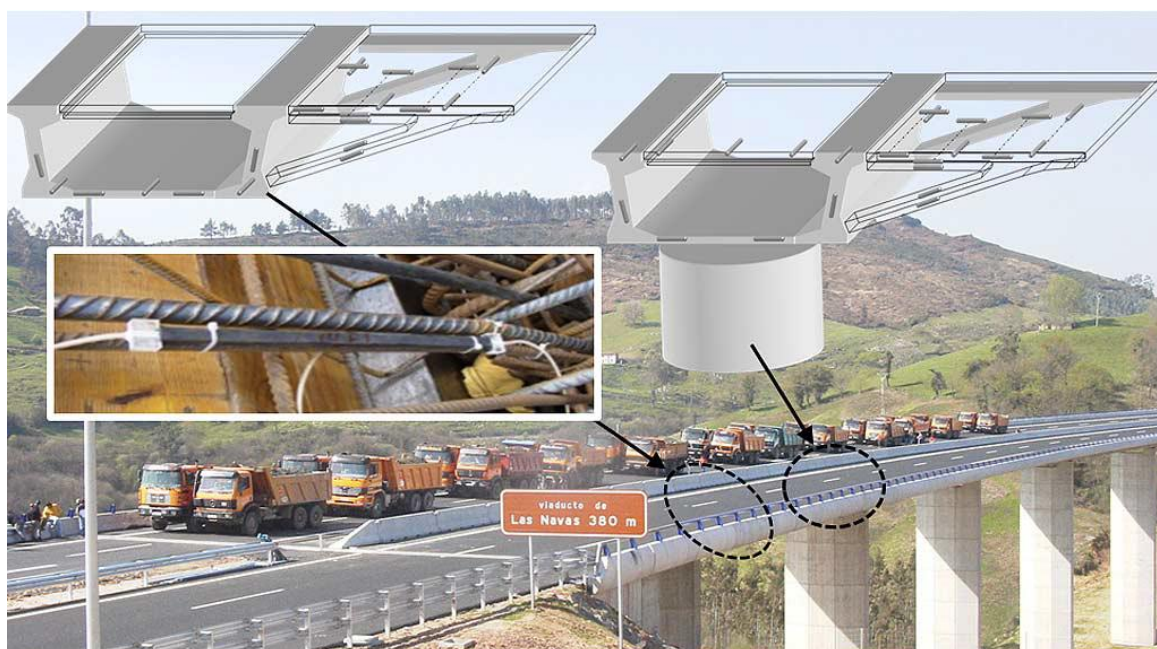
Optická vlákna, která jsou známa již od 60-tých let minulého století, zaznamenala prudký rozvoj v posledních 20 letech především v oblasti telekomunikací. Ve srovnání s běžnými metalickými kabely mají vyšší rychlost přenosu, malý útlum, nízkou hmotnost a jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení. Současně s rozvojem jejich využití v telekomunikacích se optická vlákna stále více využívají zejména v senzorové technice. Jednou z nejvyužívanějších metod měření v oblasti senzorové techniky je metoda měření optického spektra odraženého z vláknových Braggových mřížek [1]. Tyto Braggovy mřížky jsou zapisovány do optických vláken, kde pak tvoří samotný senzor/měřicí úsek vlákna. Zápis se provádí nejčastěji UV laserem, kdy se využívá tzv. fotosenzivity optických vláken [2]. Braggova mřížka v optickém vlákně má funkci optického frekvenčního filtru. Parametry filtru se pak mění s každou fyzikální změnou optického vlákna. Proto lze sledováním spektrálních vlastností Braggovy mřížky měřit teplotou, tlak, vibrace, protažení atd. [1].

Tato práce je zaměřena na návrh a realizaci pilotní verze systému pro měření tvarových změn kontejnmentů JE Temelín. Práce obsahuje možnosti zapojení optického senzoru s Braggovými mřížkami a návrh a popis konstrukce samotného senzoru a kompletní návrh elektroniky měřicího systému. V práci je dále popsán řídicí SW, který byl navržen v programovacím prostředí LabVIEW. Celý systém byl experimentálně ověřen na betonovém nosníku v ÚJV Řež a výsledky měření jsou zde uvedeny.

1 Metody sledování stavu budov

V práci se zaměřuji na návrh a realizaci optovláknového senzorového systému pro měření změn délky. Tento systém je první verzí systému, který bude využit pro měření stavu kontejnmentů v JE Temelín. Proto je princip i konstrukce systému zaměřena právě na sledování stavu budov. V současné době lze metody pro sledování stavu budov (Structure Health Monitoring – SHM) rozdělit na elektronické a v poslední době více využívané – optické. Systémy by měly být schopny automaticky detekovat poškození, charakterizovat jej (rozpoznat, lokalizovat, kvantifikovat) a podat hlášení. Výsledná data z monitorovacího programu mohou být použita pro optimalizaci pracovního úkonu, údržby, opravy a výměny konstrukce na základě spolehlivých a objektivních dat. Hlavním cílem SHM systémů je detekovat neobvyklé chování konstrukce, které může indikovat její selhání [3], [4], [5], [6].

Elektronické senzory, které se využívaly zejména v minulosti pro monitorování stavu staveb a jiných objektů, využívaly zejména tenzometry.



obr. 1.1 Zátěžové testování viaduktu na dálnici A8 v Cantabrii ve Španělsku. V konstrukci viaduktu je umístěno 42 vláknových Braggových mřížek s délkou 60 cm, které měří teplotu a protažení [3].

1.1 Systém senzorů s odporovými tenzometry

Jedná se o senzorový systém založený na sledování změny elektrického odporu v závislosti na deformaci tenzometru – změně geometrických rozměrů, a změně krystalografické orientace tenzometru. Tenzometry lze rozdělit dle materiálu na tenzometry kovové a polovodičové. Tenzometrický rezistor se skládá z vlastního snímače a podložky, která zajišťuje elektrickou izolaci od měřeného objektu a současně přenos deformace z povrchu měřeného objektu na vlastní snímač[7].

Ve srovnání s těmito elektronickými senzory mají optické senzory řady výhod. Mezi hlavní výhody lze zařadit především kompaktní rozměry, chemickou odolnost a imunitu vůči elektromagnetickému rušení. Rozvody jsou u optického senzorového typu realizovány pomocí optických kabelů, které mají nízkou hmotnost, malé rozměry a umožňují mít vyhodnocovací jednotku až několik kilometrů od senzorů. V současnosti mezi nejvyužívanější principy optických senzorů pro měření sledování stavu budov můžeme zařadit senzory založené na využití principu Brilluionova rozptylu a Braggových mřížkách.

1.2 Systémy senzorů založeny na Brilluionovém rozptylu

Systémy založeny na principu měření Brilluionova rozptylu v optických vláknech se obvykle nazývají DTSS senzory (Distributed Temperature and Strain Sensor). Senzory využívající tohoto jevu měří deformace optického vlákna. K vyhodnocení lze pak použít postranní pásma blíže k nosné vlně, tzv. Brillouinova pásma. K zajištění měření tvarových změn je nutné použít 2 optická vlákna, jedno optické vlákno je zafixováno ke struktuře, druhé optické vlákno je volné a má funkci teplotní kompenzace. Pro senzory DTSS se používá speciální vlákno z důvodu zvýšeného mechanického namáhání. DTSS senzory mají obvykle délku aktivní zóny $l_A = <0; 30>$ km, rozlišení teploty: $\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$ a rozlišení mechanického namáhání $\Delta l = 10 \mu\text{m}$. Tyto systémy jsou schopny v závislosti na kvalitě použité elektroniky určit místa změn teploty a mechanického namáhání s rozlišením cca 1m.

Senzory využívající Brillouinova rozptylu jsou poměrně nákladné, vzhledem k využití speciálního optického vlákna a zejména z důvodu nutnosti použít výkonový laserový zdroj. Ve srovnání s těmito senzorovými systémy, jsou systémy využívající Braggovy mřížky na mnoho aplikací vhodnější [8].

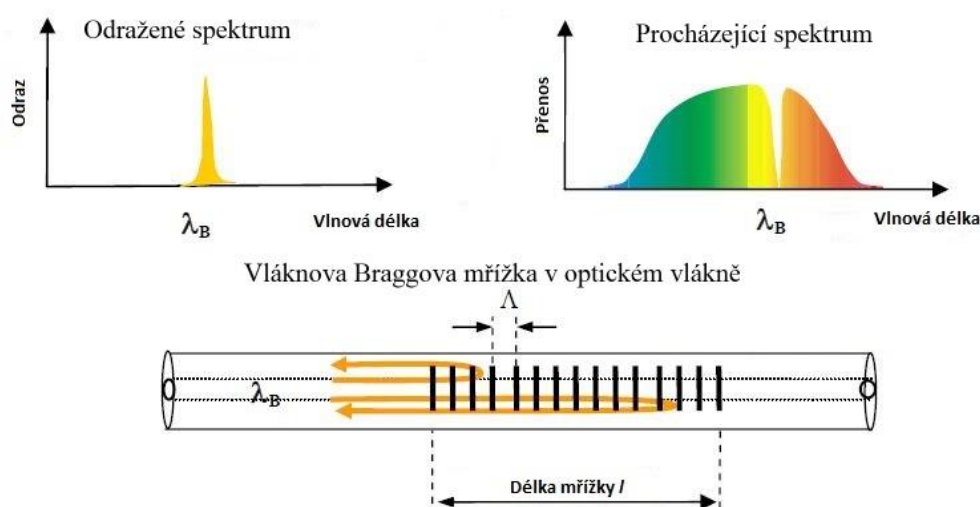
1.3 Systém senzorů s Braggovou mřížkou

Systém senzorů založený na měření vlnové délky odražené od Braggovy mřížky mají základní rozlišení senzoru 0,03% z rozsahu, při rozlišení 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ a rozsahu 3000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Senzor má velmi malou teplotní závislost a může být kombinovaný s měřením teploty se základní přesností $\Delta t = 0,2^\circ\text{C}$. Senzorový systém se realizuje v sériovo-paralelní topologii, kde je předpoklad umístění minimálně 20 senzorů na jednom průběžném optickém kabelu. Není tedy zapotřebí dělat rozvody typu hvězda ke každému měřicímu bodu. Na jednu vyhodnocovací jednotku je možné připojit v závislosti na použitém optovláknovém přepínači až 256 takových větví. Jedno měřicí stanoviště tak dokáže obsloužit 5120 senzorů (příp. 2560 senzorů kombinovaných s měřením teploty). Díky přenosu po optickém vlákne je možné umístění měřicího stanoviště i několik kilometrů od měřeného místa. Vzhledem k optickému principu měření samotné senzory neobsahují žádné elektronické části, optické senzory tak vykazují velmi dlouhou životnost a stálost měřených parametrů.

Ve srovnání se systémem, který je založen na principu Brilluina rozptylu se systémem s Braggovými mřížkami liší v několika ohledech. Hlavním rozdílem je aktivní délka senzoru, kdy se u systému s Brilluinovým rozptylem používá jako senzor celé vlákno, u systému s Braggovými mřížkami pouze části vlákna obsahující Braggovy mřížky. Dalším rozdílem je rozlišení senzoru, který lze u senzorů s Braggovými mřížkami měnit v závislosti na aplikaci a je obvykle větší než v případě systému s Brilluinovým rozptylem. Výhodou systému s Braggovými mřížkami je možnost uspořádání senzorů do hvězdy. Po srovnání předností jednotlivých senzorových systémů jsme se rozhodli použít senzorový systém založený na Braggových mřížkách, které splňují více kritérií pro naši aplikaci.

2 Braggovy mřížky

Optická vlákna s Braggovými mřížkami jsou tvořena periodickou změnou indexu lomu jádra podél osy šíření světla s periodou Λ a amplitudou δn . Odrazivost Braggovy mřížky je závislá na délce mřížky, rozdílu indexů lomu a vlnové délce světla. Část světla procházející optickým vláknem se na Braggově mřížce odrazí v závislosti na její periodě, viz obr. 2.1. Vlnová délka odraženého světla je pak závislá na Braggově vlnové délce mřížky. Narazí-li vlna na rozhraní Braggovy mřížky tzn. na změnu indexu lomu, odrazí se, pokud se vlnová délka vlny rovná Braggově vlnové délce. Nerovná-li se Braggově vlnové délce, projde vlna mřížkou nezměněná [1]. Na základě rozdílných struktur Braggových mřížek lze pak rozdělit Braggovy mřížky do několika základních typů.



obr. 2.1 Princip Braggovy vláknové mřížky, průchod vlny Braggovou mřížkou [9].

2.1 Typy Braggových mřížek

Braggovy mřížky se v závislosti na průběhu změny indexu lomu a změny struktury dělí na:

- uniformní mřížky,
- apodizované mřížky,
- chirped mřížky,
- blazed mřížky.

Jednotlivé typy mřížek se využívají v závislosti na požadovaných parametrech aplikace. Mřížky se liší v uspořádání změny indexu lomu např.: změna periody, náklonu, a hodnoty indexu lomu. Tyto odlišnosti dávají jednotlivým typům Braggových mřížek určité specifické vlastnosti, které se využívají v jednotlivých aplikacích.

2.1.1 Uniformní mřížky

Uniformní mřížky jsou základním a nejpoužívanějším typem mřížek. Mají stejnou periodu a velikost změny indexu lomu konstantní v celé délce mřížky, viz obr. 2.2a). Změny indexu lomu jsou kolmé k ose šíření světla. Velikost odrazu je pak závislá na délce mřížky, indexu lomu mřížky a vlnové délce procházejícího záření [1]. Každý Braggův odraz, viz obr. 2.3a), je určen svým rezonančním signálem, v případě existence více mřížek v jednom optickém vlákne lze využívat mřížku nezávisle na ostatních nebo všechny současně. Tuto konfiguraci lze využít při vlnovém multiplexování nebo např. distribuovaném snímání [3].

2.1.2 Apodizované mřížky

Apodizovaná mřížka je vylepšená uniformní mřížka, kterou lze také použít v aplikacích, kde se zapojuje více mřížek na jedno vlákno. V této mřížce se mění velikost změny indexu lomu, a perioda mřížky je konstantní, viz obr. 2.2b). Výhodou apodizované mřížky je výrazně lepší potlačení postranních pásem, viz obr. 2.3b), které jsou způsobeny odrazem od protějších konců mřížky. Tato mřížka se proto používá jako optický filtr ve speciálních aplikacích, kde je nutné zvýšit odstup signál-šum [1]. Apodizace se dosahuje v praxi tak, že se při výrobě méně ozáří části mřížky, kde je

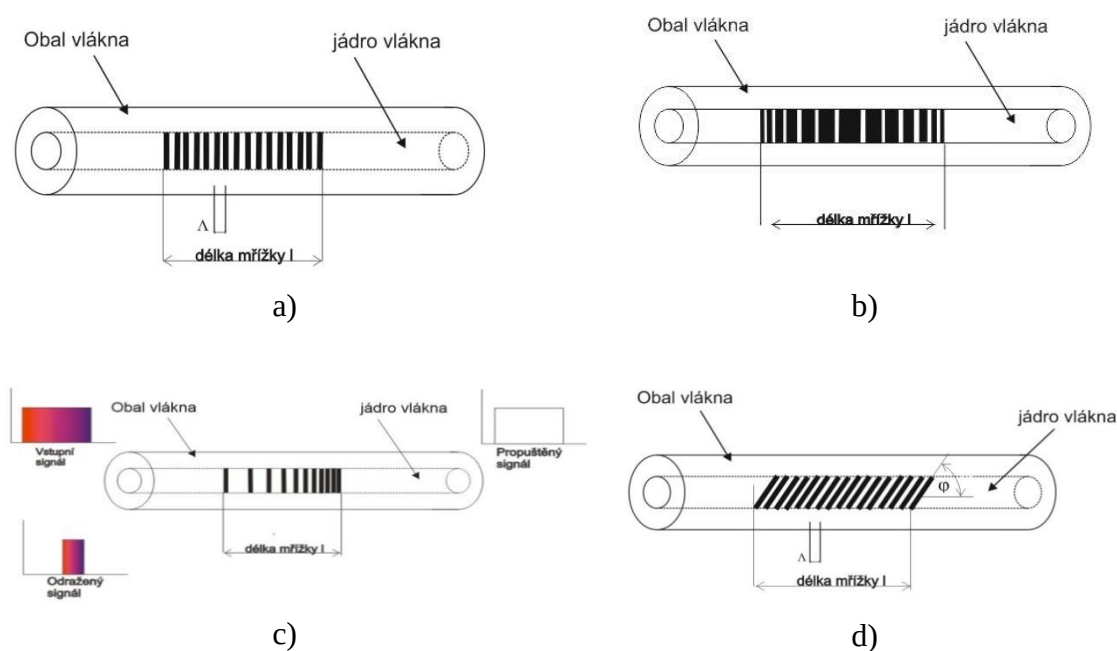
vyžadován menší index lomu mřížky. Apodizace má různé profily v závislosti na potřebném potlačení pásem. Nejčastěji používaný profil je Gaussovský, kde se největší hodnoty změny indexu lomu nacházejí uprostřed mřížky, a směrem ke stranám mřížky se změna indexu lomu zmenšuje [10], [11], [12].

2.1.3 Chirped mřížky

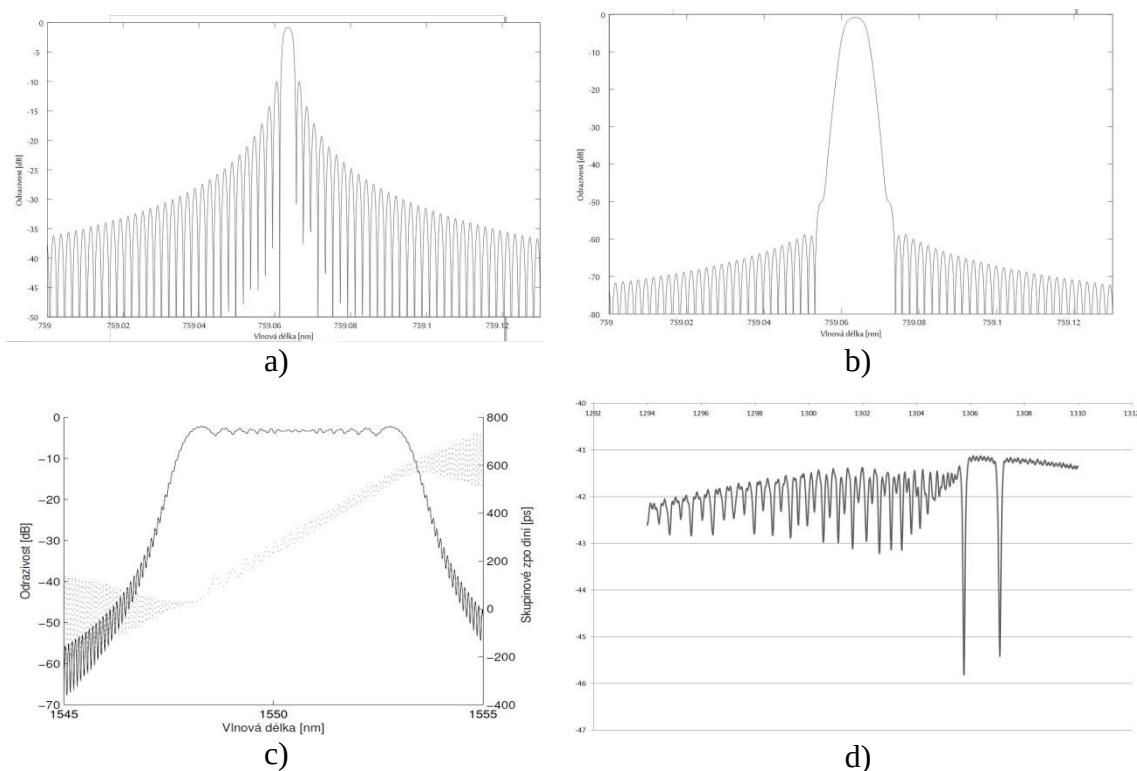
Vláknové mřížky, u kterých se mění perioda změny indexu lomu, se jmenují chirped mřížky, viz obr. 2.2c). Změna periody v chirped mřížce může být až v jednotkách nanometrů na cm. Mřížka o délce 2 cm tak může mít vlnovou délku na jednom konci 1550 nm a na druhém 1548 nm [1]. Typické spektrum chirped mřížky je na obr. 2.3c). Chirped mřížky se nejčastěji využívají při kompenzaci chromatické disperze v telekomunikačních aplikacích [13].

2.1.4 Blazed mřížky

Blazed mřížka je speciální vláknová mřížka, jejíž rovina změn indexu lomu mřížky je nakloněná k ose šíření světla pod úhlem φ , viz obr. 2.2d). To má za následek vyvážání světla z jádra optického vlákna. Velikost indexu lomu a perioda mřížky určuje spektrum odražené vlnové délky záření, viz obr. 2.3d). Úhel roviny mřížky pak určuje procentuální vyvážání odraženého záření z jádra vlákna do obalu vlákna [1].



obr. 2.2 Typy Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizovaná, c) Chirped, d) Blazed.



obr. 2.3 Spektrum jednotlivých typů Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizované, c) Chirped, d) Blazed mřížky[10].

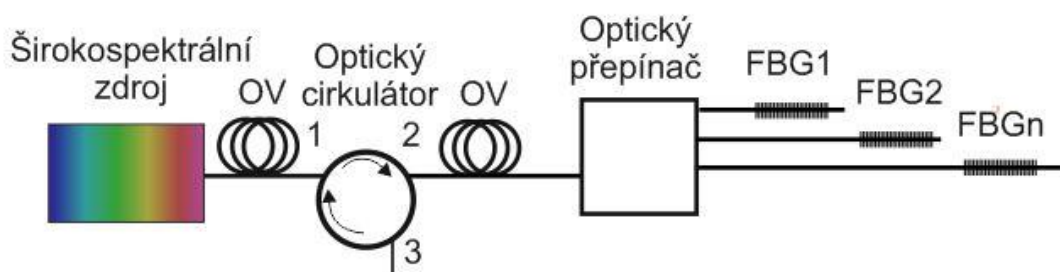
2.2 Výroba Braggových mřížek

Při výrobě Braggových mřížek jsou používána optická vlákna s vysokou koncentrací dopantů, které zvyšují fotosenzitivitu vláken [2]. V současnosti se nejvíce využívají optická vlákna dopovaná germaniem a vodíkem, které zvyšují právě fotocitlivost. Vláknem dopované germaniem je nutné koupit již připravené. Vodíkem lze naopak dopovat jakékoliv vlákno, do kterého chceme zapsat vláknovou mřížku. Takové vlákno se pak umístí do tlakové, vyhřívané komory s vodíkem. Tlak vodíku a teplota ovlivňují dobu, po kterou vlákno musí zůstat v komoře pro dosažení požadované fotosenzitivity. Teplota komory se nastavuje v rozsahu $T_K < 20; 75 > ^\circ\text{C}$ a tlak v rozsahu $P_K < 20; 750 > \text{atm}$, typicky $P_K = 150 \text{ atm}$ [1]. Výsledkem je difuze vodíkových molekul do jádra vlákna. Při nadopování vlákna vodíkem lze při zápisu mřížky dosáhnout trvalé změny indexu lomu $\Delta n_{\text{eff}} = 10^{-2}$ [10]. Při použití germaniem dopovaného vlákna je dosažitelná změna indexu lomu pouze $\Delta n_{\text{eff}} = 10^{-3}$ [14], [15].

3 Metody měření

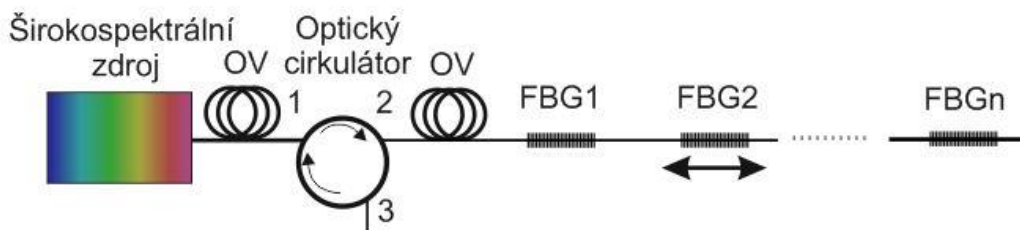
Vláknové Braggovy mřížky pro měření stavu budov lze využívat v mnoha uspořádáních. V závislosti na jednotlivých aplikacích lze Braggovy mřížky do měřicího systému zapojit více způsoby a jejich spektrum měřit v propustném nebo reflexním směru. V propustném směru je detekční systém zapojen na opačném konci vláken, než optický zdroj. V našem případě jsme zvolili měření v reflexním režimu, kdy je laserový zdroj i detekční systém na stejném konci optických vláken se senzory. Jedná se o používanější metodu měření. Její nevýhodou je nutnost použití optického cirkulátoru a výhodou naopak právě umístění zdrojové i detekční části v jednom místě.

Základním principem měření je detekce vlnové délky odražené od vláknové Braggovy mřížky. Odražené světlo se šíří zpět po stejném vlákně do cirkulátoru, kde je nasměrováno do optického filtru a detektoru. V aplikacích, kde je nutné měřit více bodů současně, lze zapojit senzory s Braggovými mřížkami např. přes optický přepínač (obr. 3.1). Pouhým přepnutím lze pak měřit jednotlivé senzory dle potřeby, příp. kontinuálně přepínat mezi všemi v závislosti na parametrech měřicího systému.



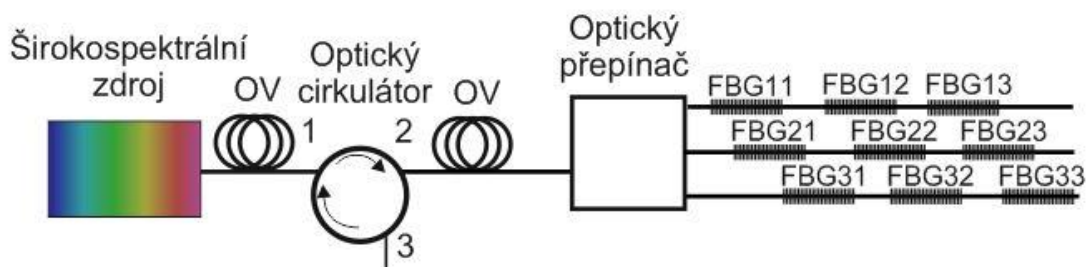
obr. 3.1 Princip zapojení více Braggových mřížek přes optický přepínač.

Dalším způsobem zapojení systému s měřením více senzorů současně je připojení optického vlákna s více Braggovými mřížkami (obr. 3.2). V tomto zapojení musí mít mřížky počáteční vlnovou délku odrazu světelného spektra dostatečně vzdálenou od sebe tak, aby nedocházelo k překryvu spekter mřížek ani při dosažení hraničních hodnot měření a zdroj musí mít dostatečně široké spektrum pro pokrytí všech mřížek.



obr. 3.2 Princip zapojení Braggových mřížek seriově bez optického přepínače.

V nejnáročnějších aplikacích lze pak použít modifikaci obou zapojení, kdy jsou k optickému přepínači připojena optická vlákna s více Braggovými mřížkami (obr. 3.3).



obr. 3.3 Princip sériového zapojení Braggových mřížek s optickým přepínačem.

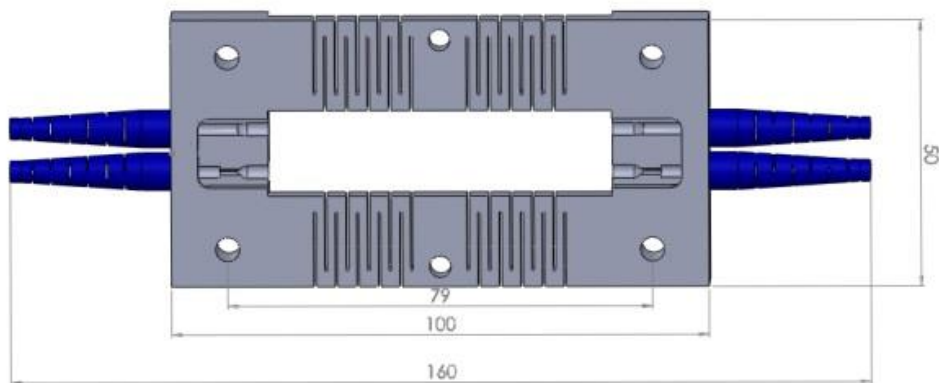
V našem případě jsme v první verzi systému, kde jsme chtěli ověřit principy a funkčnost navržených bloků řídicí elektroniky, přikročili k variantě s optickým přepínačem a vlákny s jednou Braggovou mřížkou. Tento systém do budoucna umožňuje snadné rozšíření pouhou výměnou senzorových vláken za vlákna s více Braggovými mřížkami.

4 Konstrukce senzoru s mřížkami

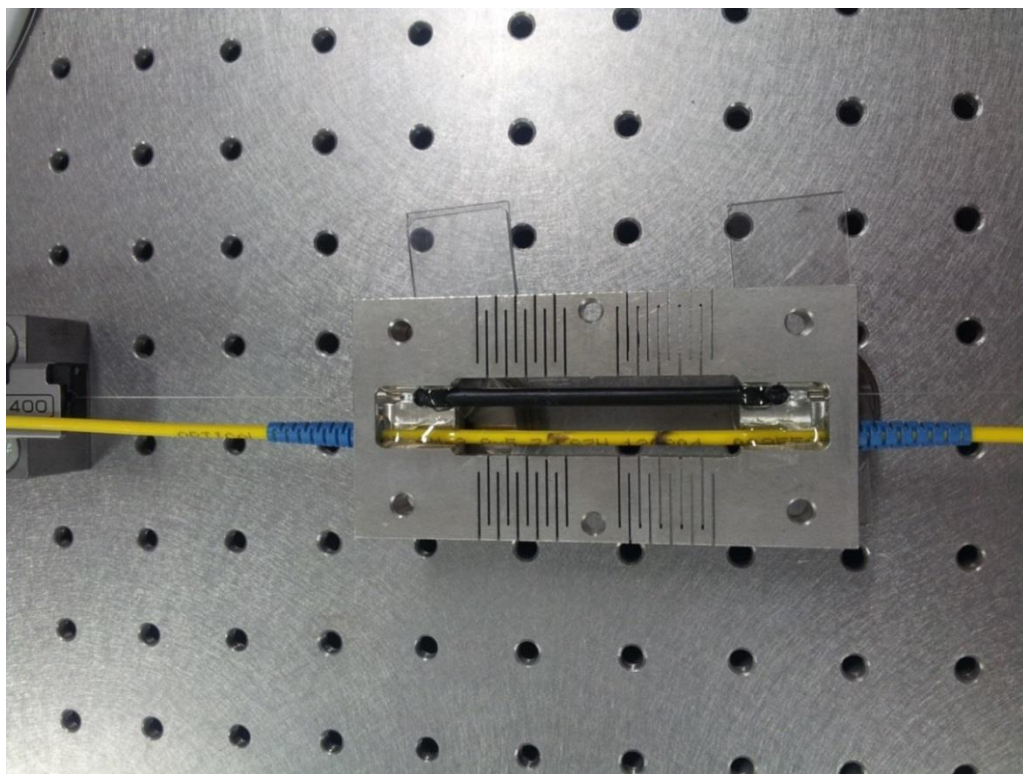
Návrh měřicího systému jsme začali návrhem konstrukce senzoru, kde bylo nutné nejdříve vypočítat požadovanou citlivost senzoru (kap. 4.1) a určit maximální rozsah měření (kap. 4.2) vzhledem k aplikaci. Běžně dostupné Braggovy mřížky se vyrábí s délkou maximálně do $l_M = 20\text{mm}$. Délka mřížky určuje zejména šířku odraženého pásma. Delší Braggovy mřížky tj. s menší šířkou odraženého pásma, se vyrábí jen v laboratorních podmínkách na zakázku a jejich cena je, vzhledem k předpokládanému využití až několika set mřížek, příliš velká. Naopak nevýhoda v menší šířce odraženého pásma je pro naši aplikaci zanedbatelná. Vzhledem ke spolupráci s firmou NWG s.r.o. jsme se rozhodli využívat v naší aplikaci mřížky, které jsou ve firmě NWG schopni vyrobit na základě našich požadavků. Firma NWG vyrábí mřížky metodou osvitů přes fázovou masku a jejich délka je maximálně $l_M = 20\text{ mm}$. Fázové masky jsou pak připravovány na pracovišti elektronové litografie v ÚPT AVČR. Experimentálně jsme zjistili maximální změnu vlnové délky při natahování senzoru pro délku senzoru i mřížky $l = 20\text{ mm}$, která je $\lambda_{MAX} = 6\text{ nm}$. Při dalším natahování vlákna pak dochází k nevratným změnám v jeho struktuře. Uvedená změna vlnové délky odpovídá protažení senzoru o $\Delta l_{20\text{mm}} \cong 100\text{ }\mu\text{m}$. Závislost změny vlnové délky na protažení sensorového vlákna pro vlákno s délkou $l = 100\text{mm}$ je na obr. 4.3. Závislost vlnové délky odraženého světla na teplotě vláknové mřížky je pak na obr. 4.4.

Senzor je vyroben z hliníku 60/61 a jsou v něm 2 vláknové Braggovy mřížky (obr. 4.1). Jedna vláknová mřížka je zafixována pevně v osách montážních otvorů senzoru, druhá je uložena volně. Volná mřížka není závislá na změně délky senzoru, a slouží pro kompenzaci teploty. Na krajích senzoru se nacházejí montážní otvory k připevnění senzoru na měřený objekt. Otvory uprostřed slouží pro připevnění krytu vláknových mřížek. Konstrukce senzoru je navržena tak, aby při maximálním protažení vlákna nedošlo k nevratnému poškození konstrukce senzoru. Na obr. 4.2 je vyrobený senzor s umístěnými optickými mřížkami. V černé ochraně se nachází vláknová mřížka pro měření délkové změny. Ve žluté ochraně se nachází vláknová mřížka pro kompenzaci teploty. Tato mřížka se nachází přibližně v polovině délky senzoru. Celý senzor je zakrytý pouzdrem, a proto odlišná barva ochrany nemá vliv na výslednou teplotu vláknové mřížky. Před zafixováním optického vlákna s Braggovou mřížkou určenou k měření změn délky, bylo nutné natáhnout vlákno s Braggovou mřížkou do poloviny

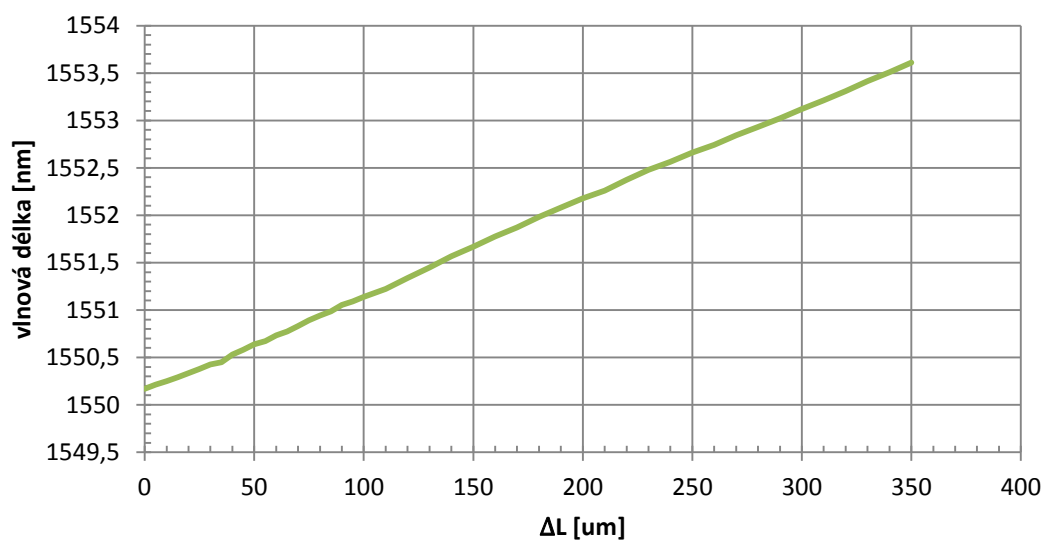
jeho měřicího rozsahu a zafixovat jej ke konstrukci. Délka optického vlákna s Braggovou mřížkou připevněného k senzoru je $l = 79$ mm. Maximální délka protažení pro tuto délku senzoru je $\Delta l_{79} = 400$ μm , proto bylo vlákno předepnuto o $l_p = 200$ μm .



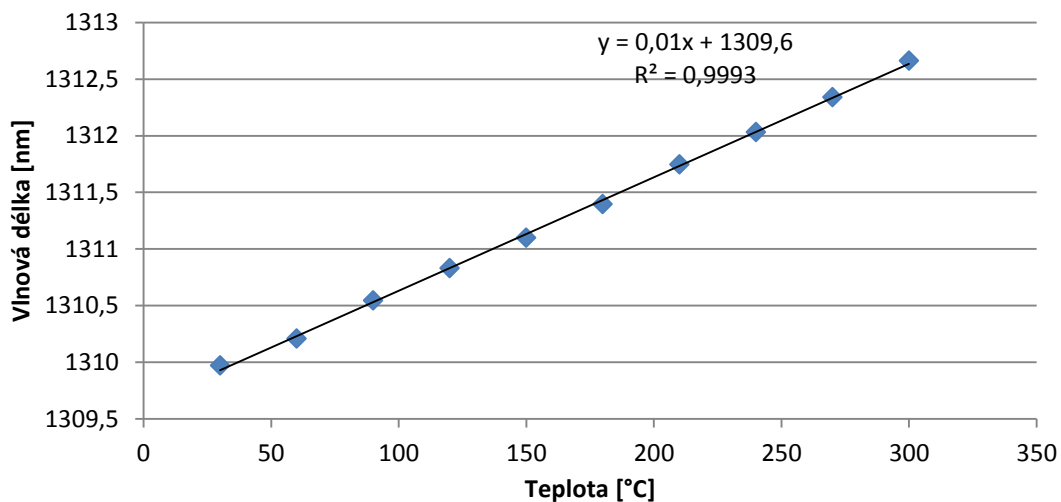
obr. 4.1 Návrh konstrukce senzoru se 2 optickými vláknovými mřížkami.



obr. 4.2 Vyrobený senzor se zafixovanými Braggovými mřížkami; vlákno v černé ochraně měří protažení senzoru, vlákno ve žluté ochraně je určeno pro teplotní kompenzaci.



obr. 4.3 Závislost změny vlnové délky odraženého záření z vláknové mřížky s délkou 20 mm, která je v senzoru s délkou vlákna 100 mm na protažení.



obr. 4.4 Závislost Braggovy vlnové délky na teplotě vláknové mřížky.

4.1 Citlivost senzoru

Citlivost senzoru a jeho maximální měřitelný rozsah je ovlivněn délkou senzoru a délkou Braggovy mřížky. Také mj. závisí na mechanických vlastnostech vlákna. Při výpočtu citlivosti se vychází ze vzorce pro výpočet Braggovy vlnové délky λ_B (4.1)

$$\lambda_B = 2n_{eff}A, \quad 4.1$$

kde n_{eff} je efektivní index lomu, zde je 1,46, A je perioda změn efektivního indexu lomu.

Pro zjištění změn citlivosti senzoru jsem zvolil konstantní protažení o 40 μm a Braggova vlnová délka byla zvolena na základě předběžných údajů o vlnové délce navrhovaného zdroje 1300 nm. Délka Braggovy mřížky se mění v závislosti na poměru mezi délkou senzoru a samotnou délkou Braggovy mřížky. Změnou délky mřížky se mění perioda změn efektivního indexu lomu A . Novou periodu změn efektivního indexu lomu A_n lze vypočítat dle vztahu (4.2):

$$A_n = d_n(A/d), \quad 4.2$$

kde d_n je délka Braggovy mřížky v novém poměru k celkové délce senzoru, A je perioda původní Braggovy mřížky, d je délka původní Braggovy mřížky.

Novou Braggovu vlnovou délku λ_{Bn} lze pak vypočítat (4.3):

$$\lambda_{Bn} = 2n_{eff}A_n, \quad 4.3$$

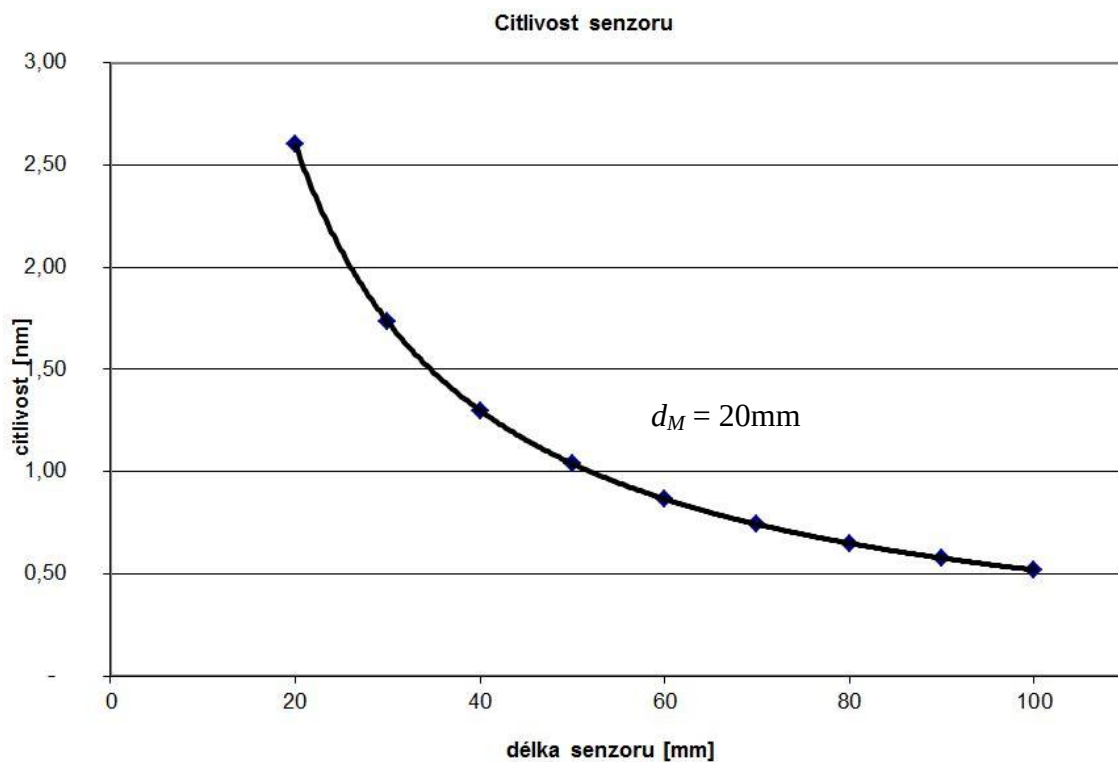
kde: n_{eff} je efektivní index lomu, A_n je nová perioda efektivního indexu lomu.

Citlivost senzorů λ_0 lze pak vypočítat (4.4):

$$\lambda_0 = \lambda_{Bn} - \lambda_B, \quad 4.4$$

kde λ_{Bn} je nová Braggova vlnová délka, λ_B je původní Braggova vlnová délka.

V grafu 4.1 je znázorněna závislost citlivosti senzoru na délce senzoru s konstantní délkou Braggovy mřížky. Citlivost senzoru klesá s délkou vlákna připevněného ke konstantní délce Braggovy mřížky d_M (20mm).



4.1 Závislost citlivosti senzoru na délce senzoru s konstantní délkou Braggovy mřížky.

4.2 Maximální protažení senzoru

Maximální protažení senzoru je závislé na délce samotného senzoru. Hlavním mezním parametrem je maximální změna vlnové délky spektra vlákna pro Braggovu mřížku s délkou 20mm $\lambda_{MAX} = 6\text{nm}$. Překročí-li se tato hranice, může dojít k přetržení optického vlákna. Při výpočtu maximálního protažení senzoru se postupuje obdobně jako u výpočtu citlivosti senzoru. Nejprve určíme novou Braggovu vlnovou délku λ_{BN} s maximální změnou spektra vlákna (4.5).

$$\lambda_{BN} = \lambda_B + \lambda_{MAX}, \quad 4.5$$

kde λ_B je původní Braggova vlnová délka, λ_{MAX} je maximální délková roztažnost senzoru.

S novou Braggovou vlnovou délkou se změní perioda efektivního indexu lomu Λ_N (4.6):

$$\Lambda_N = \lambda_{BN} / (2 * n_{eff}), \quad 4.6$$

kde λ_{BN} je nová Braggova vlnová délka, n_{eff} je efektivní index lomu.

Délka samotné mřížky d_M po protažení senzoru se pak vypočítá (4.7):

$$d_M = d_{PM} * (\Lambda_N / \Lambda), \quad 4.7$$

kde Λ_N je nová perioda efektivního indexu lomu, Λ je perioda původní Braggovy mřížky, d_{PM} je délka původní Braggovy mřížky.

Velikost senzoru d_{PS} zvětšená o maximální změnu spektra vlákna do 6nm lze pak vypočítat (4.8):

$$d_{PS} = (d_M / d_{PM}) * d_S, \quad 4.8$$

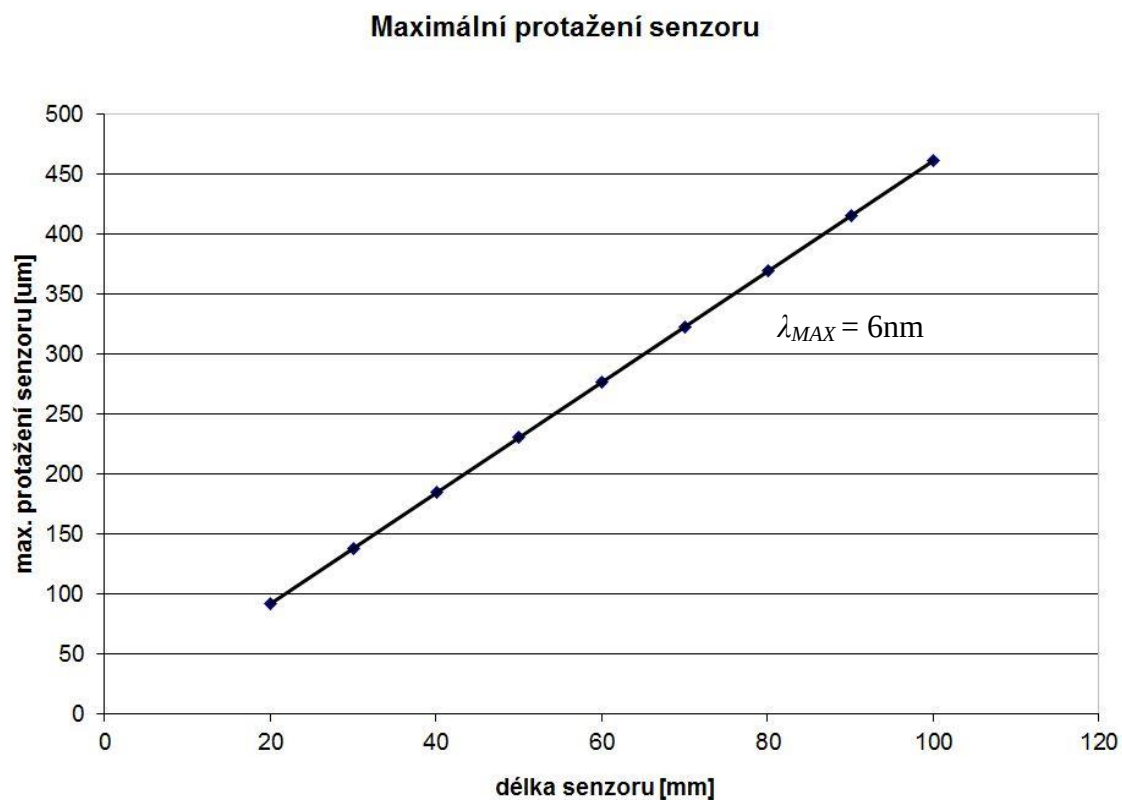
kde d_M / d_{PM} je poměr mezi novou délkou mřížky a původní délkou mřížky, d_S je velikost senzoru před protažením.

Maximální protažení senzoru d_{MAX} lze pak vypočítat (4.9)

$$d_{MAX} = d_{PS} - d_S, \quad 4.9$$

kde d_{PS} je velikost senzoru po protažení, d_S je velikost senzoru před protažením.

Z grafu 4.2 odečteme, že maximální protažení senzoru je závislé na délce senzoru lineárně a roste s délkou senzoru.



4.2 Závislost maximálního protažení senzoru na délce senzoru.

5 Realizace kontrolního měření

Popsané principy měření a navržené senzory jsme ověřili na speciálně připraveném železobetonovém nosníku. Pro tato měření jsme připravili kompletní realizaci měřicího systému, který lze ovládat z počítače v programu vytvořeném v LabVIEW.

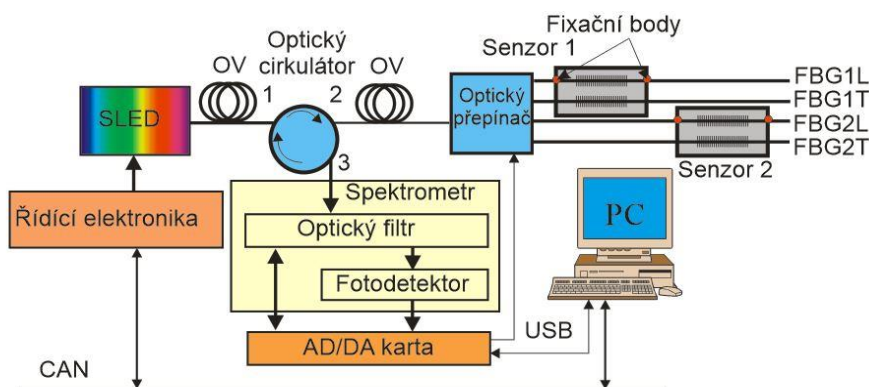
V rámci bakalářské práce jsem realizoval program, připravil části řídicí elektroniky, připravoval jsem jednotlivé bloky systému a postupně ověřoval jejich funkčnost. Na závěr jsem sestavil celý měřicí systém a ověřil jeho funkčnost v laboratorních podmínkách. Spolupracoval jsem na přípravě systému pro ÚJV (Ústav jaderného výzkumu Řež) a na vyhodnocení dat z měření délkové změny vláknových mřížek přes optický filtr.

Postup realizace spočíval v návrhu systému, návrhu a realizaci měření vlnové délky, návrhu a realizaci měření vlnové délky s více mřížkami přes optický přepínač a implementaci hotového měřicího systému na betonový nosník.

5.1 Návrh měřicího systému

Při návrhu měřicího systému se vycházelo z teoretických zapojení uvedených v kapitole 3. Jako zdroj širokospektrálního světla je použita dioda SLED o výkonu $P = 22,8 \text{ mW}$ a vlnové délce $\lambda = \langle 1530; 1570 \rangle \text{ nm}$ s centrální vlnovou délkou $\lambda_c = 1544,3 \text{ nm}$. Světlo ze SLED diody je vyvázáno do optického vlákna, které je připojeno na vstup č. 1 optického cirkulátoru. Na port č. 2 je připojen optický přepínač, který podle instrukcí z programu přepíná jednotlivé senzory s Braggovými mřížkami. Optický přepínač je řízen z počítače přes digitální výstupy AD/DA karty. Světlo z vybrané vláknové mřížky se stejnou Braggovou vlnovou délkou se odrazí a vrací se zpět do optického cirkulátoru, kde je z portu 2 přesměrováno na port 3. Na výstup optického cirkulátoru na portu č. 3 je zapojen optický filtr, který je využit pro měření vlnové délky. Za filtrem je pak detektor, který měří intenzitu světla. Filtr je laděn trojúhelníkovým signálem z AD/DA karty, která je využita i pro příjem dat z fotodetektoru a pro sledování teploty filtru. Program pro řízení jsem realizoval v LabVIEW. Komunikace s měřicí aparaturou byla realizována přes USB AD/DA kartu. Blokové schéma zapojení je na obr. 5.1. Optický filtr slouží jako náhrada spektrometru, který je pro danou aplikaci velmi drahý, velký a neumožňuje plnou komunikaci

s dalšími bloky elektroniky. Vhodným výběrem filtru lze pro konkrétní aplikaci zvolit měřený rozsah i rozlišení. V mém případě jsem použil filtr Lightwaves2020 s vlnovou délkou odpovídající telekomunikačním pásmům C + L, tj. $\lambda = <1530; 1625> \text{ nm}$, rozsahem snímání $\Delta\lambda = 80 \text{ nm}$ a rozlišením FWHM (Full Width in Half Maximum) $\Delta\lambda_{FWHM} = 0,1 \text{ nm}$.



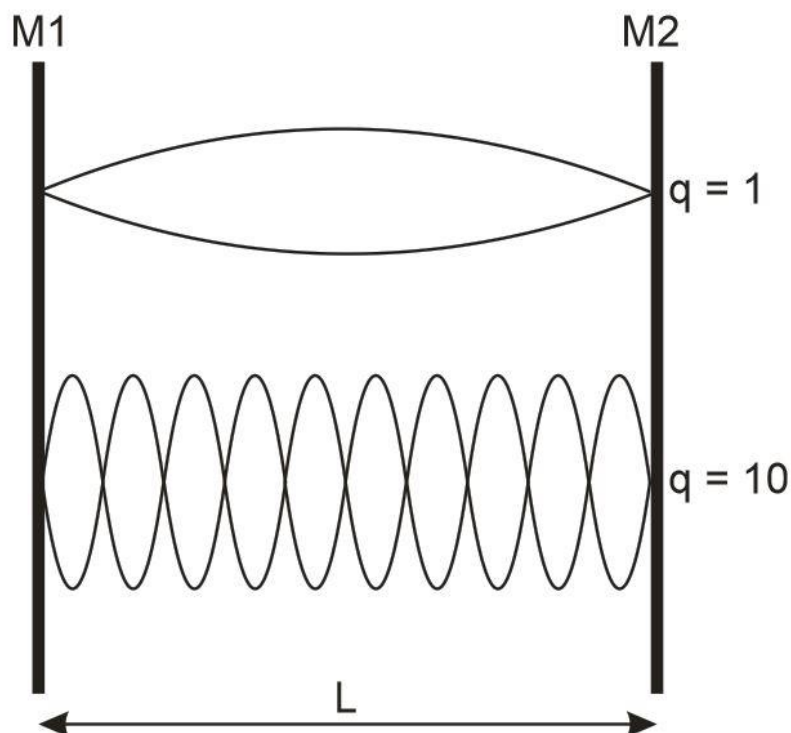
obr. 5.1 Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky Braggovy mřížky

5.2 Metoda měření vlnové délky

K detekci změny vlnové délky byl použit optický filtr Lightwaves2020, který je založen na principu Fabry-Perotova rezonátoru. Optický rezonátor je analogií elektronického rezonančního obvodu v optické oblasti. Rezonátor zachycuje a hromadí světelné záření o určitých rezonančních frekvencích. Nejjednodušší rezonátor se skládá ze dvou rovinných zrcadel, mezi kterými se světlo odráží s malými ztrátami. V rezonátoru se vytvoří stojaté vlny v závislosti na vlnové délce záření λ a vzdálenosti zrcadel L_n kterou lze vypočítat dle vztahu (5.1).

$$L_n = L \cdot n, \quad 5.1$$

kde L je geometrická vzdálenost zrcadel rezonátoru, n je index lomu prostředí mezi zrcadly rezonátoru.



obr. 5.2 Rozložení intenzity záření v planoparalelním Fabry – Perotově rezonátoru pro dvě různé vlnové délky; M1,M2 – zrcadla rezonátoru, q -počet podélních modů rezonátoru [16z].

Stojatá vlna v rezonátoru vzniká v případě splnění rezonanční podmínky rezonátoru, kdy délka rezonátoru L_n je celočíselným násobkem poloviny délky vlnové délky λ . Rozložení stojaté vlny (obr. 5.2) lze vypočítat ze vzdálenosti zrcadel L_n , vlnové délky λ a indexu lomu prostředí n . Rozložení stojaté vlny je definováno počtem axiálních módů q v rezonátoru: (5.2).

$$q = \frac{2L_n}{\lambda}. \quad 5.2$$

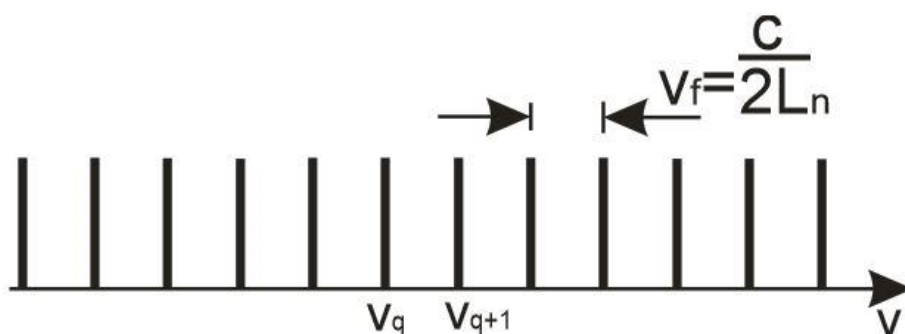
Rezananční frekvence může nabývat pouze diskrétních hodnot a lze jí pak vypočítat podle (5.3):

$$\nu_q = q \frac{c}{2L_n}, \quad 5.3$$

kde q je modové číslo, c je rychlost světla ve vakuu, L_n je vzdálenost mezi zrcadly rezonátoru.

Frekvenční vzdálenost sousedních modů rezonátoru (obr. 5.3) se pak vypočítá (5.4):

$$\nu_f = \Delta\nu = \nu_q - \nu_{q-1} = \frac{c}{2L_n}. \quad 5.4$$



obr. 5.3 Rezonanční frekvence rezonátoru s rovinnými zrcadly.

K rozšíření čáry rezonátoru dochází díky ztrátám, které jsou způsobeny absorpcí a rozptylem v prostředí mezi zrcadly a také nedokonalým odrazem na zrcadlech. Ke snížení odrazivosti zrcadel dochází z důvodů použití polopropustných zrcadel, aby světlo mohlo opustit rezonátor. Maximální propustnost rezonátoru nastává v okamžiku splnění rezonanční podmínky. Záření projde rezonátorem, je-li jeho frekvence v oblasti některé z rezonančních čar rezonátoru [16],[17],[18].

K popisu kvality rezonátoru se používá činitel jakosti Q (5.5) a selektivita F (5.6). Velké hodnoty kvality dosahují rezonátory s nízkými ztrátami. Kvalita souvisí s dobou života fotonu v rezonátoru τ .

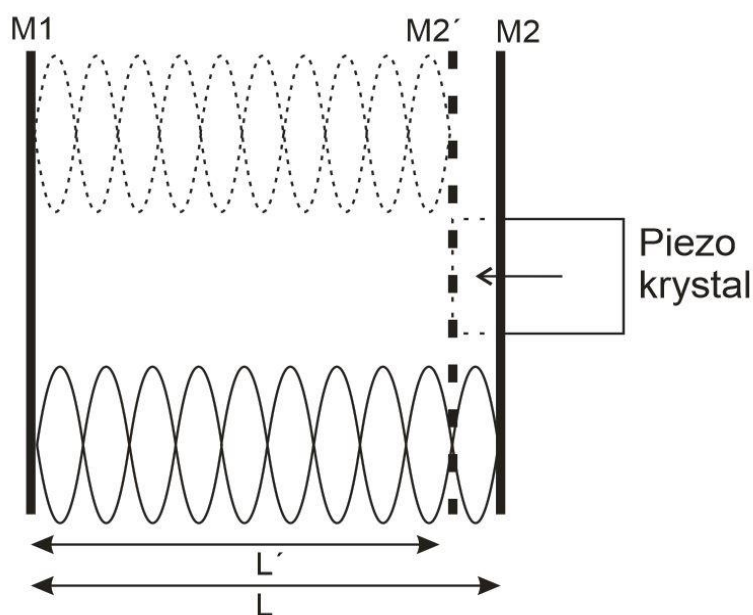
$$Q = 2\pi\Delta\nu\tau, \quad 5.5$$

kde $\Delta\nu$ je vzdálenost dvou rezonančních frekvencí v rezonátoru, τ je doba života fotonu v rezonátoru.

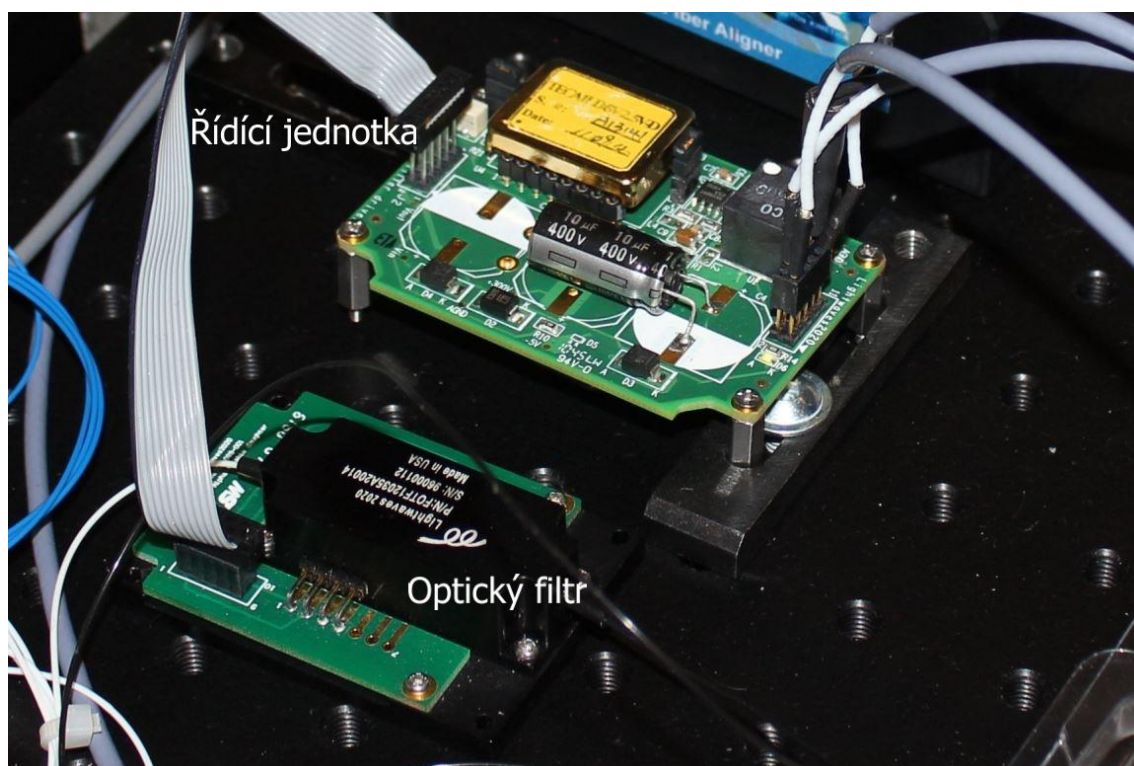
$$F = \frac{\pi}{|\ln(\sqrt{R_1 R_2} V)|}, \quad 5.6$$

kde R_1, R_2 jsou odrazivosti na zrcadlech, V je útlum rezonátoru pro jeden průchod záření [16], [17], [18].

Mnou použitý vysokorychlostní filtr Lightwaves2020 je napájen napětím $U = \langle 4,8; 5 \rangle$ V a může být laděn trojúhelníkovým napětím v maximálním rozsahu $\Delta U = \langle 0; 5 \rangle$ V. Teplota filtru je udávána v rozsahu napětí $\Delta U = \langle 0; 3 \rangle$ V, napětí odpovídá lineárně teplotě $T = \langle 15; 35 \rangle$ °C. Modulační napětí pohybuje v optickém filtru jedním zrcadlem Fabry - Perotova rezonátoru. Pohyb zrcadla umožňuje piezo - keramický krystal, umístěný na zrcadlo viz obr. 5.4. Napětím trojúhelníku se piezo – krystal periodicky roztahuje a mění vzdálenost mezi zrcadly. Vzdálenost zrcadel ovlivňuje rezonanční vlnovou délku světla vycházejícího z filtru. Jedna perioda trojúhelníkového signálu najde vlnovou délku světla splňující rezonanční podmínku na náběžné a sestupné hraně trojúhelníku. Změníme-li vlnovou délku o $\Delta \nu$, změní se tím rezonanční vlnová délka, tzn. vzdálenost mezi zrcadly. Hodnota napětí na modulačním trojúhelníku ovládající piezo – krystal, při které se dosáhne rezonanční podmínky, bude jiná než před změnou vlnové délky.



obr. 5.4 Ladění optického filtru založeného na F-P rezonátoru. Plná křivka označuje rozložení vlny v rezonátoru při nejnižším napětí, přerušovaná křivka při nejvyšším napětí, kdy je zrcadlo M2 posunuto z polohy M2 na M2'. Změní se tím vlnová délka splňující rezonanční podmínku (5.3).

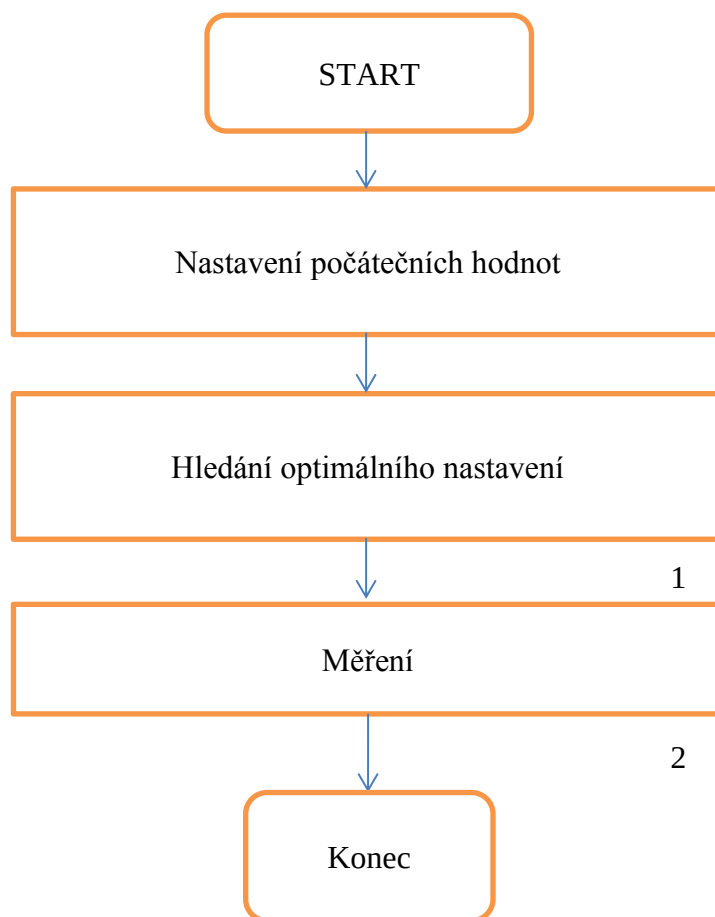


obr. 5.5 Optický filtr Lightwaves2020 a jeho řídicí jednotka.

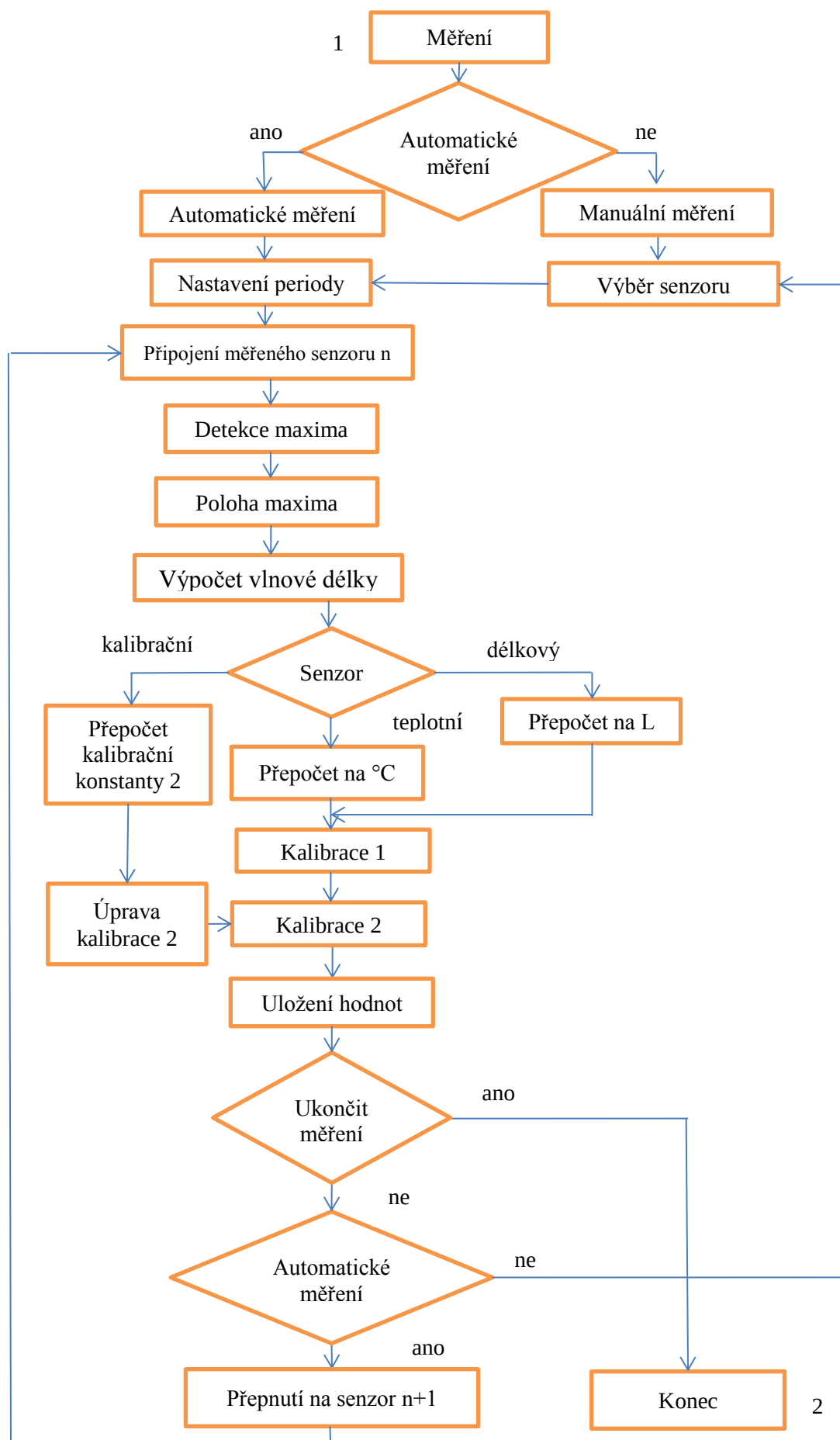
5.3 Řízení

Celý měřicí systém je řízen z připojeného PC přes AD/DA kartu od firmy National Instruments. Touto kartou jsou zpracovávány signály z detektoru a signály udávající teplotu filtru. Přes AD/DA kartu je řízen i optický filtr. Kartou je generován modulační trojúhelníkový signál a digitální signál pro přepínání senzorů optickým přepínačem. AD/DA karta je připojena do počítače přes rozhraní USB a je řízena programem vytvořeným v LabVIEW. Vývojový diagram programu je na obr. 5.6 a detailní postup měření je na obr. 5.7 Program, jehož část je na obr. 5.8, generuje modulační trojúhelníkový signál do optického filtru a digitální signál do optického přepínače. Lze nastavit offset, amplitudu modulačního signálu a periodu u signálu k přepínání senzorů. Modulační signál musí být v rozsahu $U = <0; 5> V$. Program snímá signál z fotodetektoru, teplotu filtru a trojúhelníkový modulační signál. Snímaný signál z detektoru je detekován funkcí „peak detect“, kde lze nastavit vyhledávání maxima, minima, šířky a výšky detekovaného signálu. Je-li maximum detekováno, určí se jeho amplituda a poloha maxima vzhledem k modulačnímu signálu. Poloha maxima je dále zapsána do indexového pole, které slouží pro výběr požadovaného maxima vzhledem k náběžné a sestupné hraně modulačního signálu. Snímaný trojúhelníkový signál je

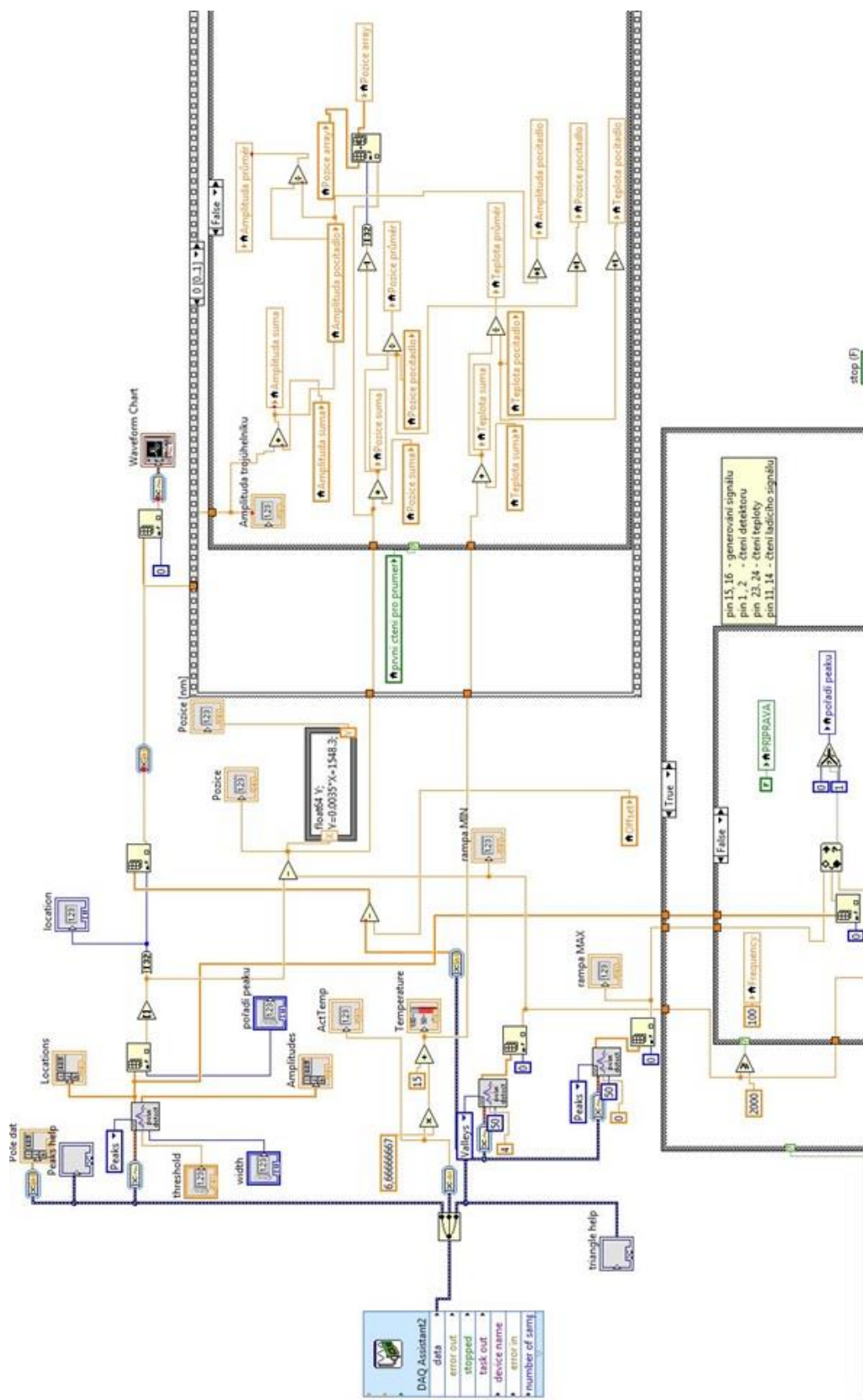
převeden do příslušného formátu a zapsán do indexového pole, společně s polohou maxima. Poloha maxima označí přesnou hodnotu napětí na modulačním trojúhelníku, viz obr. 5.9. Tato hodnota napětí pak odpovídá detekované vlnové délce v závislosti na ofsetu a rozsahu modulačního trojúhelníkového signálu.



obr. 5.6 Vývojový diagram programu pro řízení měření.

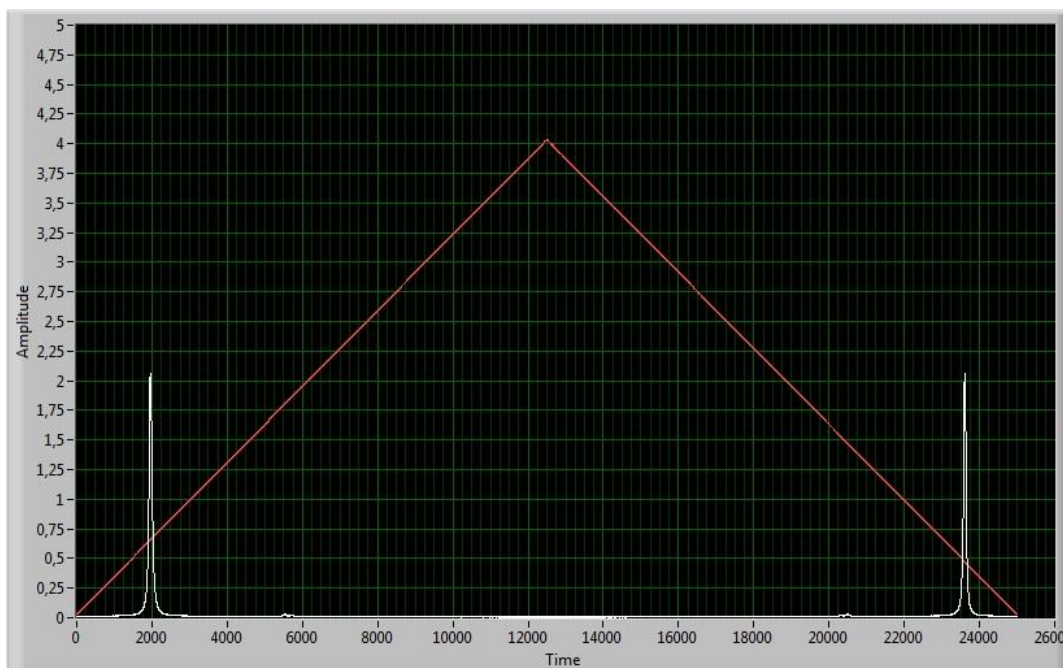


obr. 5.7 Vývojový diagram programu pro řízení měření - část měření.



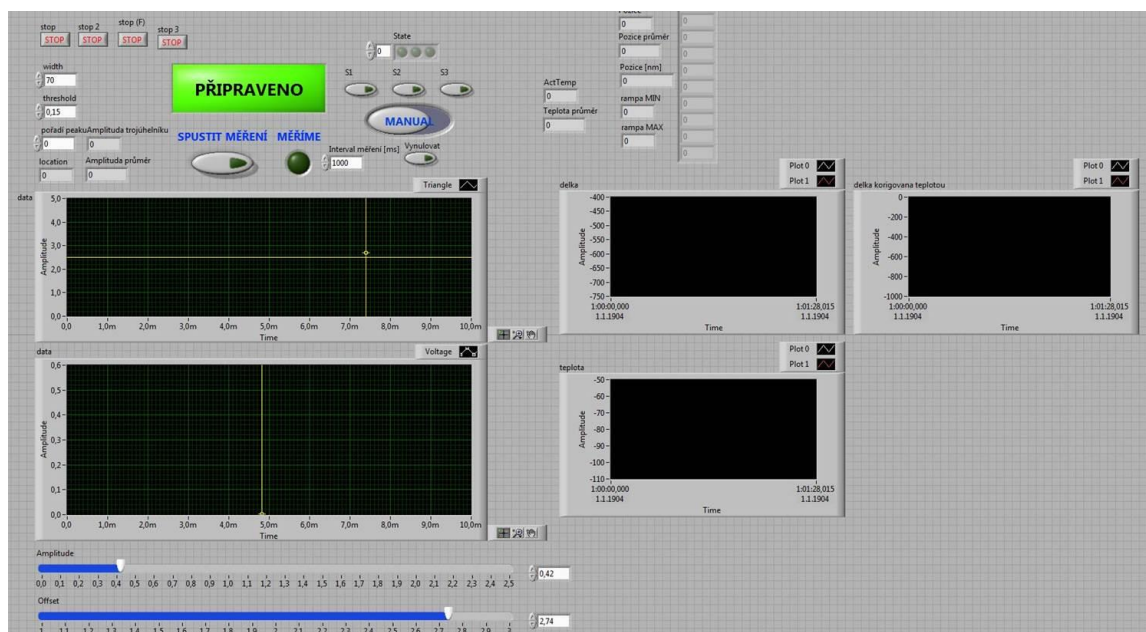
obr. 5.8 Ukázka části řídicího programu vytvořeného v LabVIEW.

Napětí odpovídající vlnové délce jsou pak zobrazována na časovém grafu, kde lze sledovat změny napětí, které jsou způsobeny změnou vlnové délky odražené na Braggově mřížce. Hodnoty napětí na modulačním signálu a teplota měřena na filtru jsou zapisovány do textového dokumentu a uloženy.



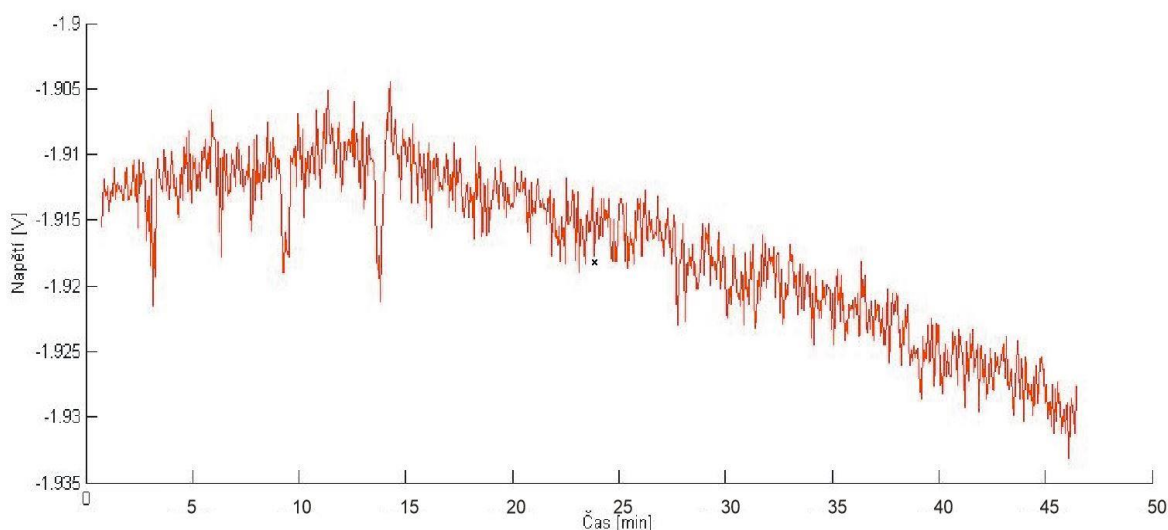
obr. 5.9 Modulační trojúhelníkový signál se zobrazeným signálem z optického filtru – bílá čára.

Ovládání programu je umožněno z předního panelu LabVIEW viz obr. 5.10. Na ovládacím panelu se nachází vlevo nahoře generovaný trojúhelníkový modulační signál, pod ním se nachází snímaný signál z fotodetektoru. Vlevo dole je ovládání modulačního signálu – offset a amplituda. Vpravo se nachází časové grafy zobrazující změny délky, teploty senzoru a délka korigovaná teplotou. V horní části předního panelu se nachází tlačítko pro nastavení automatického nebo manuálního přepínání senzorů.



obr. 5.10 Přední ovládací panel řídicího programu v LabVIEW.

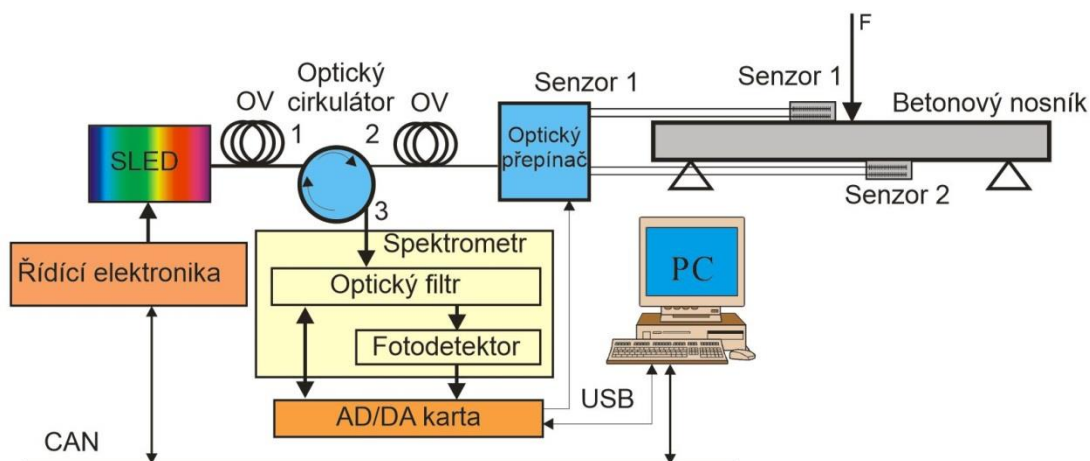
V průběhu realizace celého systému bylo nutné ověřit funkčnost jednotlivých prvků. Funkčnost systému jsem ověřoval na vláknu s jednou Braggovou mřížkou. Při měření vlnové délky odražené od Braggovy mřížky, která byla stabilizovaná, docházelo k poklesu napětí odečítaného z modulačního trojúhelníku, viz obr. 5.11. Tento pokles napětí byl způsoben nestabilitou optického filtru. Optický filtr, jak udává výrobce, by měl být teplotně stabilizovaný, ale při našem měření docházelo k posunu měřené vlnové délky, které si vysvětlujeme jediným možným způsobem a to zahříváním filtru. Tento problém jsme v první fázi vyřešili kalibrační křivkou, kterou jsme implementovali do programu. Po této úpravě už nedochází k nestabilitě v naměřených vlnových délkách.



obr. 5.11 Naměřené hodnoty časové stálosti filtru při zkouškách systému.

5.4 Experimentální měření

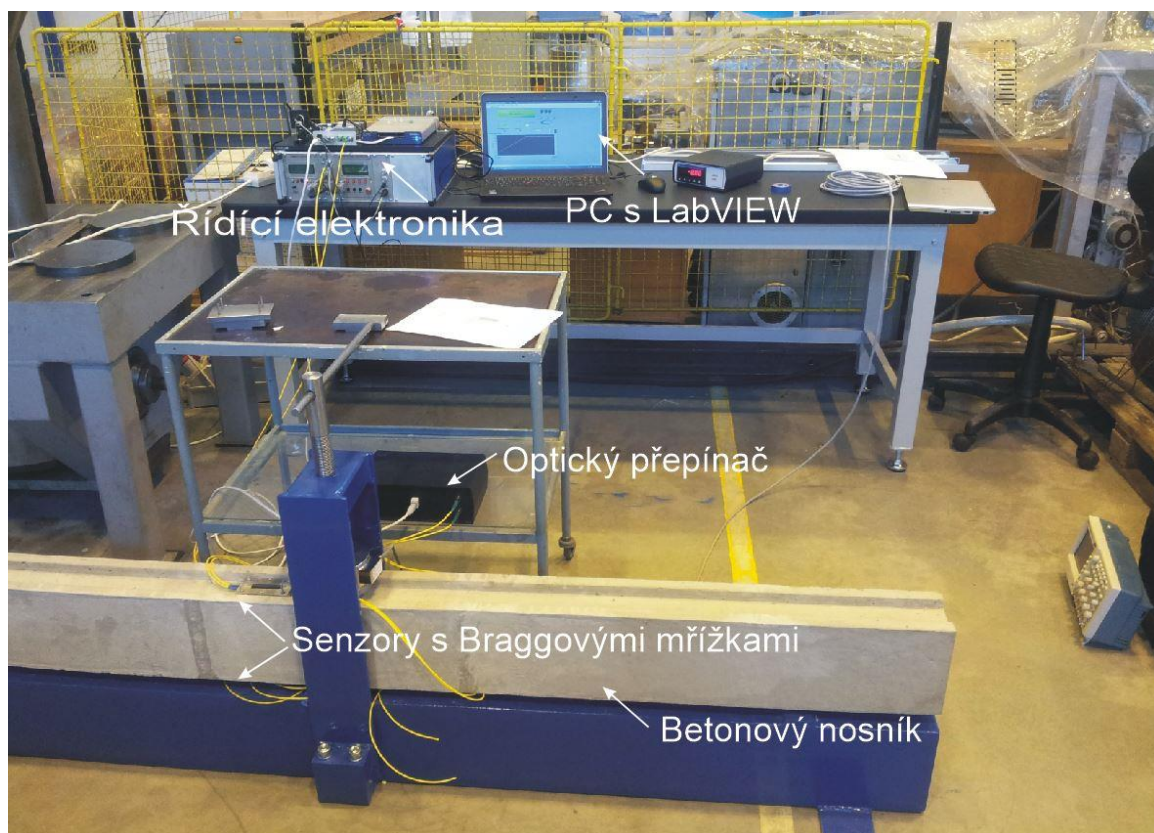
Tento systém měření délkové změny betonových staveb byl experimentálně ověřen v Centru jaderného výzkumu v Řeži. Schéma měření je na obr. 5.12.



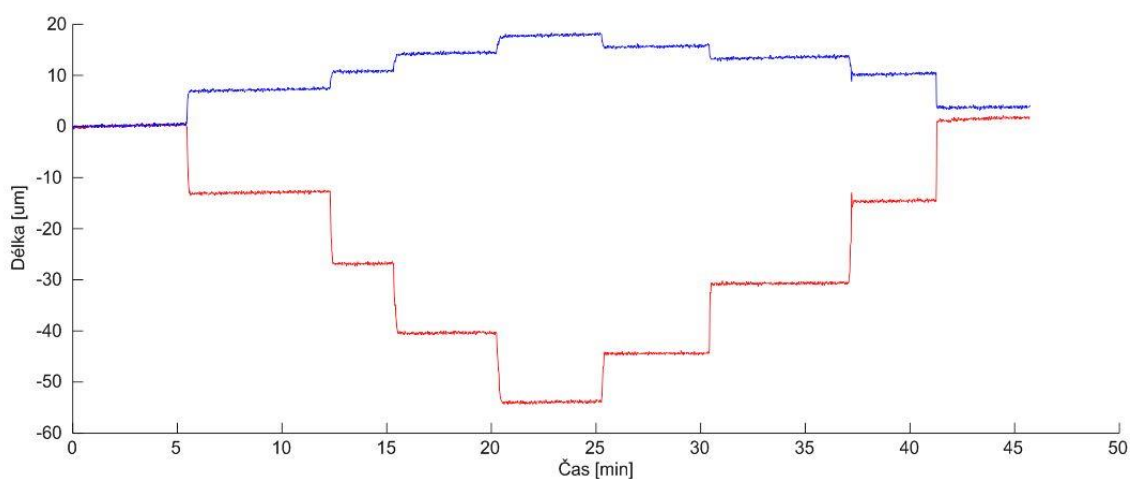
obr. 5.12 Blokové schéma měření změn délky na betonovém nosníku v ÚJV Řež.

Pro tento měřicí systém byl speciálně vyroben betonový nosník s ocelovou výztuží. Zabetonovaná výztuž se skládala ze 4 ocelových prutů, dolní pruty měly větší průměr, než pruty horní. Na betonový nosník se umístily dva senzory s Braggovou mřížkou, jeden na horní část nosníku, druhý na spodní část betonového nosníku. Senzor byl připevněn k betonovému nosníku ocelovými šrouby. Betonový nosník byl umístěn na kovové podložce, tak aby byl podepřen ze dvou stran (viz obr. 5.13). Na střed nosníku se tlačilo šroubem, který vyvíjel zatížení $F = \langle 0; 20 \rangle$ kN. Systém měřil kontinuálně během změny. Vždy po změně $\Delta F = 5$ kN, následovala pauza 5 minut, která sloužila ke stabilizaci nosníku a ustálení všech parametrů. Senzorový systém byl napojen k počítači, přes který se celý experiment ovládal. Na obr. 5.14 je zobrazen průběh měřené délky senzorů při zatěžování nosníku $F = \langle 0; 20 \rangle$ kN s krokem $\Delta F = 5$ kN. Ze záznamu je vidět, že senzor na horní straně nosníku zobrazuje větší změnu délky, než senzor na spodní straně nosníku. Důvodem byla konstrukce nosníku, kdy ocelové pruty v dolní části nosníku měly větší průměr než ocelové pruty v horní části nosníku. Z tohoto důvodu, když se nosník začal po zatížení deformovat, probíhala větší deformace senzoru v horní části nosníku, jak je zobrazeno na obrázku pod červenou křivkou. Při zatěžování nosníku došlo při větším zatížení k popraskání jeho spodní

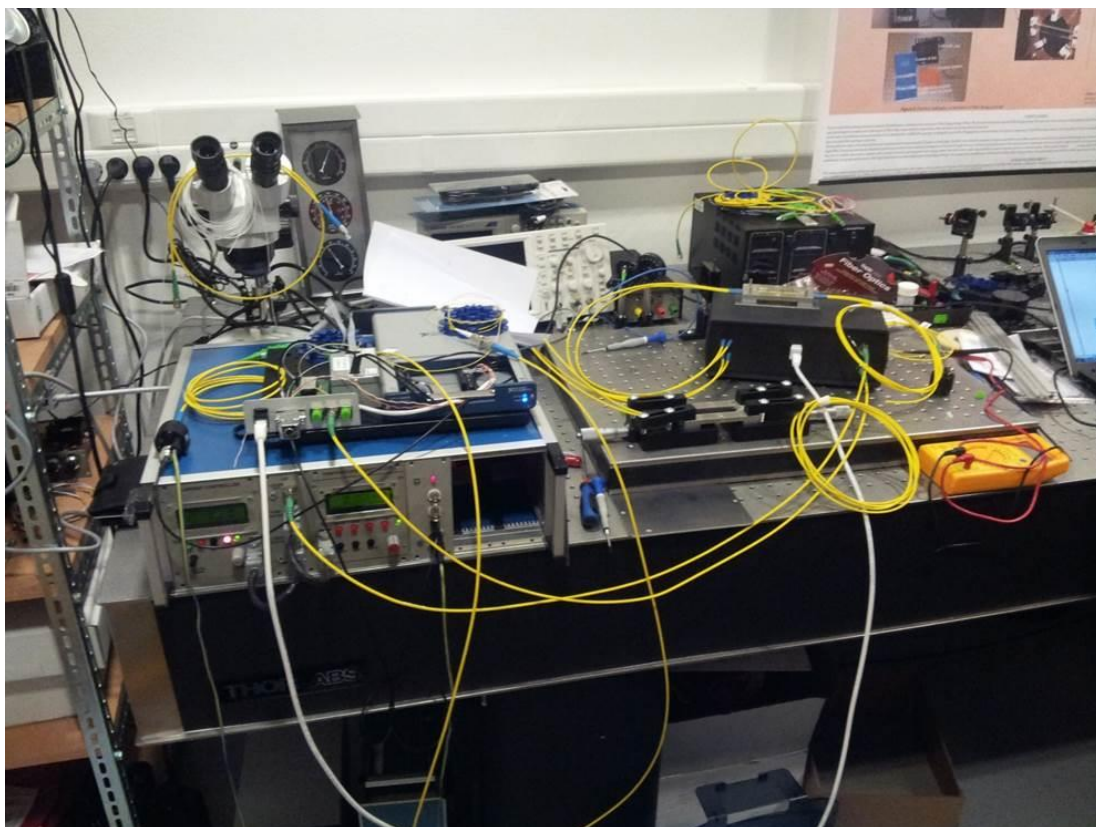
části [19]. Došlo tak k nepružné deformaci. To je vidět i na obrázku, kdy se délka senzorů nevrátila do původních hodnot.



obr. 5.13 Experimentální ověření optického sensorového systému v ÚJV Řež.



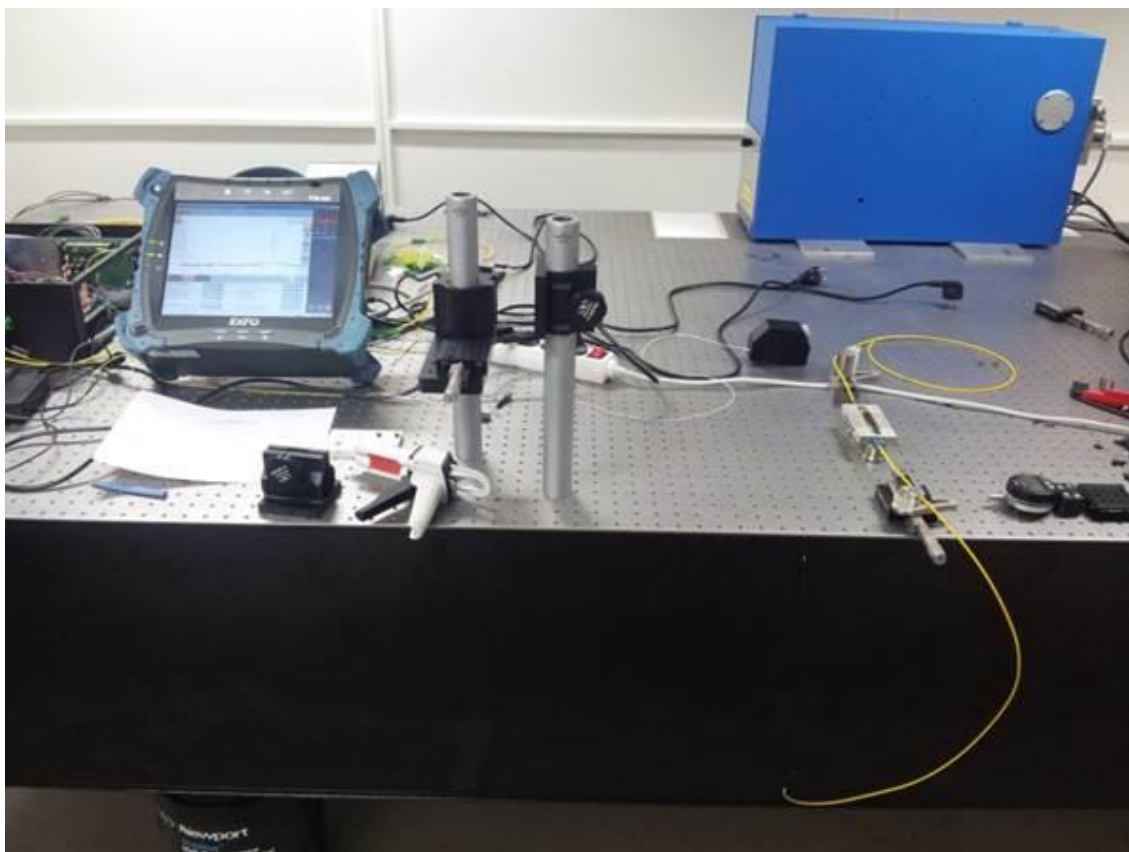
obr. 5.14 Časový graf zobrazující pnutí na betonovém nosníku při krokovém zatížení od 0 do 20 kN s krokem 5 kN. Modrá barva zobrazuje výsledek senzoru umístěného pod nosníkem, červená barva zobrazuje výsledek senzoru umístěného na horní straně nosníku.



obr. 5.15 Fotografie z přípravy systému pro měření v ÚJV Řež.



obr. 5.16 Rack s SLED diodou, tepotním a proudovým kontrolorem.



obr. 5.17 Fixování Braggových mřížek do konstrukce senzoru.

Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo sestavit měřicí pracoviště pro měření změn délky a realizovat řídicí program v LabVIEW, který měřicí systém ovládá prostřednictvím AD/DA karty. Jako zdroj světla pro měření je použita SLED dioda o výkonu $P_d = 20\text{mW}$, která je napájena proudovým zdrojem a její teplota je stabilizována teplotním kontrolorem pomocí kterého lze dosáhnout stability čipu diody $T = \pm 1\text{mK}$. Řídicí program přepíná optickým přepínačem jednotlivé mřížky podle nastavené periody. Mřížky odráží určité spektrum světla, které je pak zpracováno na spektrometru a intenzita světla zachycena na fotodetektoru. Spektrometr je realizován pomocí optického filtru na principu F-P rezonátoru. Snímaný signál z fotodetektoru, optický filtr i optický přepínač je ovládán přes AD/DA kartu, která je přes rozhraní USB připojena k PC s řídicím programem. V řídicím programu se určí vlnová délka světla detekovaná na fotodetektoru a optickém filtru a z ní se pak dopočítá změna délky zachycena na Braggově mřížce. Celý měřicí systém byl v první verzi experimentálně ověřen v ÚJV Řež na speciálně připraveném betonovém nosníku a výsledky měření jsou prezentovány v práci. Měřicí systém bude nadále rozvíjen a experimentálně ověřován.

Literatura

- [1] OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Boston, Mass.: Artech House, c1999, xiv, 422 p. ISBN 08-900-6344-3.
- [2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, *Photo-sensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication*, App. Phys. Lett., 32, 647-649, 1978.
- [3] LOPEZ-HIGUERA, José Miguel, Luis Rodriguez COBO, Antonio Quintela INCERA, Adolfo COBO, Alfredo GEMES a Jose Manuel MENENDEZ. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. *Journal of Lightwave Technology*. 2006, vol. 29, issue 4, s. 225-285. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470612071.ch3>.
- [4] YE, X. W., Y. Q. NI a J. H. YIN. Safety Monitoring of Railway Tunnel Construction Using FBG Sensing Technology. *Advances in Structural Engineering* [online]. 2013, vol. 16, issue 8, s. 1401-1410 [cit. 2014-05-26]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1260/1369-4332.16.8.1401>.
- [5] ANTUNES, Paulo, Hugo LIMA, Humberto VARUM a Paulo ANDRÉ. Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abo de wall case study. *Measurement* [online]. 2012, vol. 45, issue 7, s. 1695-1705 [cit. 2014-05-26]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.04.01>.
- [6] CHENG, L.K., W. VLIEGENHART a T. HABISREUTHER. Optical fiber grating based technologies and their applications: From nuclear fusion to medical. *2012 Photonics Global Conference (PGC)* [online]. [cit. 2014-05-26]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/pgc.2012.6457918>.
- [7] Mikrosenzory a mikromechanické systémy: Odporové tenzometry [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/themes.php?id=11&lang=cs>
- [8] Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů [online]. 2012 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z:

- [9] CHEUNG, Chi Shing. An investigation of chirped fibre Bragg gratings Fabry-Perot interferometer for sensing applications [Pdf]. Optical Sensors Group Centre for Photonics and Optical Engineering School of Engineering, 2005 [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/904/2/full%20thesis%20shing.pdf>. PhD Thesis. Cranfield University.
- [10] HELÁN, Radek. Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] MIKEL, Břetislav a Radek HELÁN. Design and fabrication of fiber Bragg gratings for vertical cavity surface emitting laser diodes. *Advanced Laser Technologies* 2006. April 25, 2007, č. 660607. DOI: 10.1117/12.729505.
- [12] OPTE.IMATTE.CZ: Optoelektronika v telekomunikacích a senzorce [online]. 2011 [cit. 2013-10-29]. Dostupné z: <http://opte.imatte.cz/teorie/fbg-mrizky/10-fbg-mrizky>
- [13] SHU, Xuewen a Kate SUGDEN. Transmissive in-fiber Fabry–Perot etalons as tunable dispersion compensators and dispersion-slope compensators. *Optics Letters*. 2003, vol. 28, issue 20. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/ol.28.001897>.
- [14] SWART, P.L. a A.A. CHTCHERBAKOV. Study of hydrogen diffusion in boron/germanium codoped optical fiber. *Journal of Lightwave Technology*. 2002, vol. 20, issue 11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/jlt.2002.806325>.
- [15] STARODUBOV*, D. S., V. GRUBSKY, Jack FEINBERG, B. KOBRIN a S. JUMA. Bragg grating fabrication in germanosilicate fibers by use of near-UV light: a new pathway for refractive-index changes. *Optics Letters*. 1997, vol. 22, issue 14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/ol.22.001086>.
- [16] HODGSON, Norman a Horst WEBER. *Optical resonators: fundamentals, advanced concepts, and applications*. New York: Springer, c1997, xxi, 659 p. ISBN 35-407-6137-3.

- [17] SALEH, Bahaa E. Základy fotoniky: fundamentals of photonics. Praha: Matfyzpress, 1994, xxii, 436 s. ISBN 80-858-6302-2.
- [18] MIKEL, Břetislav. Laserová interferometrie s přeladitelným polovodičovým laserem. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] Průběžná zpráva k projektu TA03010835 za rok 2013