



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

METODA PRO ZVÝŠENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ OPTICKÉHO FREKVENČNÍHO SPEKTRA LADITELNÝMI OPTICKÝMI FILTRY

DESIGN OF THE METHOD TO INCREASING OF ACCURACY OF THE
TUNABLE OPTICAL FILTER OPTICAL SPECTRA MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Jelínek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor

Mikroelektronika

Student: Bc. Michal Jelínek

ID: 146028

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/2016

NÁZEV TÉMATU:

NÁVRH METODY PRO ZVÝŠENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ OPTICKÉHO FREKVENČNÍHO SPEKTRA LADITELNÝMI OPTICKÝMI FILTRY

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a sestavte měřicí systém pro měření změn délky. Sensory pro měření změn délky budou realizovány optickými vlákny s Braggovými mřížkami. Pro měřicí systém zpracujte vhodné metody detekce optického frekvenčního spektra a vybranou implementujte do měřicího systému. Proveďte analýzu systému a navrhněte a příp. realizujte metody pro zvýšení přesnosti a rozlišení měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce, převážně v angličtině

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

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

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá metodou pro zvýšení přesnosti měření optického frekvenčního spektra laditelnými optickými filtry. V práci je popsán výběr optického frekvenčního filtru pro měření spektra světla a návrh systému pro měření s Braggovými vláknovými mřížkami, který je rozšířen o referenční a interferenční blok. Celý systém je řízen programem realizovaným v LabView. Princip měření byl ověřen v ÚJV Řež na speciálním betonovém nosníku a v JE Temelín při měření tvarových změn kontejnmentu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Braggova mřížka, měření optických spekter, optický filtr, vláknové senzory.

ABSTRACT

The thesis deals with the method for the improvement of the measurement accuracy in the optical frequency spectra measurements based on tunable optical filters. The thesis starts with the selection of the proper optical filter that is suitable for accurate light spectrum measurement. The selected filter was then used for the design and realization of the measurement system for the inspection of the fibre Bragg gratings. The system incorporates a reference block for the compensation of environmental influences, an interferometric verification subsystem and a PC - based control software implemented in LabView. The preliminary experimental verification of the measurement principle and the measurement system functionality were carried out on a testing rig with a specially prepared concrete console in the UJV Řež. Advanced tests were conducted on nuclear power plant's containment shape deformation measurement in Temelin.

KEYWORDS

Bragg grating, measuring of optical spectrum, tunable optical filter, fiber sensors.

JELÍNEK, M. Návrh metody pro zvýšení přesnosti měření optického frekvenčního spektra laditelnými optickými filtry. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „**NÁVRH METODY PRO ZVÝŠENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ OPTICKÉHO FREKVENČNÍHO SPEKTRA LADITELNÝMI OPTICKÝMI FILTRY**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením 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 26. května 2016

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

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

V Brně dne 26. května 2016

.....
podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
ÚVOD	13
1 Měření s vláknovými Braggovými mřížkami	14
1.1 Senzory pro kontejnment JE Temelín	15
1.2 Spektrum Braggovy mřížky.....	16
1.3 Měření optického spektra	19
1.3.2 Křížený Czerny - Turner spektrometr	22
1.3.3 Rozložený Czerny - Turner spektrometr	23
1.3.4 Spektrometr s konkávní holografickou difrakční mřížkou	23
1.4 Vlnoměr	23
1.4.1 Skenovací vlnoměr s Michelsonovým interferometrem	24
1.4.2 Statický vlnoměr s Fizeau interferometrem	24
1.5 Fabry - Perotův rezonátor	25
2 Návrh a ověření systému měření s vláknovými Braggovými mřížkami	28
2.1 Teplotní stabilizace optického filtru	29
2.2 Komplexní schéma	31
2.2.2 Kalibrace s laserovým interferometrem	31
2.2.3 Blok řídicí a vyhodnocovací elektroniky	35
2.3 Konstrukce senzoru	38
2.4 Řídicí program	40
3 Měření	47
3.1 Měření stability optického filtru	47
3.2 Měření přesnosti a citlivosti senzoru	49
3.3 Měření nosníku v ÚJV Řež	51
3.4 Měření na kontejnmentu JE Temelín.....	53
3.4.1 Zkouška PERZIK	53
3.5 Vlastní přínos.....	59
ZÁVĚR	60
LITERATURA.....	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1.1	Princip Braggovy mřížky, průchod vlny Braggovou mřížkou [3]; λ_B je Braggova vlnová délka, Λ je perioda Braggovy mřížky.	14
obr. 1.2	Princip zapojení vláknových Braggových mřížek, SLED – širokospektrální LED dioda, OV je optické vlákno, FBG je vláknová Braggova mřížka.	14
obr. 1.3	Princip odrazu spektra světla na Braggových mřížkách a) světelné spektrum z SLED diody b) jednotlivé odrazy spektra světla od Braggových mřížek v počátečním stavu c) naznačena změna spektra vyvolaná změnou délky na jedné z Braggových mřížek; FBG je vláknová Braggova mřížka.	15
obr. 1.4	Nákres kontinentu JE s předběžnou ukázkou umístění senzorů s Braggovými mřížkami; FBG – senzory s vláknovou Braggovou mřížkou.	16
obr. 1.5	Odražené spektrum světla od uniformní Braggovy mřížky s konstantní periodou a hodnotou změny indexu lomu a úhlem mřížky kolmým na procházející světlo v jádře vlákna.	17
obr. 1.6	Odražené spektrum světla od Apodizované Braggovy mřížky s konstantní periodou změny indexu lomu mřížky a měnící se velikostí změny indexu lomu.	17
obr. 1.7	Odražené spektrum světla od Chirpované Braggovy mřížky se změnou periody indexu lomu mřížky a konstantní velikostí indexu lomu.	18
obr. 1.8	Odražené spektrum světla od nakloněné Braggovy mřížky s nakloněnou rovinou změny indexu lomu k ose šíření světla a konstantní periodou a hodnotou změny indexu lomu mřížky.	18
obr. 1.9	Základní princip optických spektrometrů ve složení z konvexního a konkávního zrcadla, difrakční mřížky a lineárního CCD detektoru [4].	19
obr. 1.10	Princip difrakční mřížky: 1) odrazné 2) průchozí [6].	20
obr. 1.11	Příklad lineárního CCD detektoru - Lineární CCD detektor Hamamatsu Photonics se spektrální šířkou snímání 200-1000 nm, 2048 aktivních pixelů [8].	22
obr. 1.12	Princip kříženého Czerny - Turner spektrometru [4].	22
obr. 1.13	Princip rozloženého Czerny-Turner spektrometru [4].	23
obr. 1.14	Princip spektrometru s holografickou difrakční mřížkou [4].	23
obr. 1.15	Princip skenovacího vlnoměru s Michelsonovým interferometrem.	24
obr. 1.16	Interferenční proužky superpozice dvou Gaussovských paprsků [12].	24
obr. 1.17	Princip statického vlnoměru s Fizeau interferometrem.	25

obr. 1.18	Rozložení intenzity záření v planoparalelním Fabry – Perotově rezonátoru pro dvě různé vlnové délky; M1, M2 – zrcadla rezonátoru, q -počet podélních módů rezonátoru.....	26
obr. 1.19	Rezonanční frekvence rezonátoru s rovinnými zrcadly	26
obr. 2.1	Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky Braggovy mřížky. Vláknové mřížky v senzoru jsou přepínány optickým přepínačem a jejich odražené spektrum je detekováno ve spektrometru skládajícího se z optického filtru a fotodetektoru ; OV je optické vlákno, CAN je sběrnice Controller Area Network.	28
obr. 2.2	Zapojení sensorového systému pro měření délkových změn s rozšířením o kalibrační část odstraňující teplotní nestabilitu filtru. Kalibrační část obsahuje teplotně stabilizovanou mřížkou sloužící jako frekvenční etalon a vlnoměr pro kalibraci systému.....	29
obr. 2.3	Časový graf zobrazující měření délkové změny optickým filtrem před a po kompenzaci teplotní nestability; černá křivka - teplotně stabilizovaná mřížka, modrá křivka - měřící mřížka bez teplotní stabilizace; zelená křivka - kompenzovaná měřící mřížka.	30
obr. 2.4	Komplexní schéma měřícího systému obsahující 4 navzájem propojené bloky. Pro měření odraženého spektra světla od Braggových mřížek je měřící blok. Odstranění teplotní nestability je řešeno referenčním blokem. Určení přesnosti a citlivosti měření se provádí interferenčním blokem. Měřící systém je řízen a naměřená data jsou vyhodnocovány v bloku řídicí a vyhodnocovací elektroniky.	31
obr. 2.5	Konstrukce interferenčního bloku skládající se z titanového stolku, motorizovaného mikro-posuvného stolku, kompaktní interferometrické jednotky a kvadrurní detekční jednotky; OV – optické vlákno, FBG – vláknová Braggova mřížka.....	32
obr. 2.6	Princip kompaktní interferometrické jednotky; KO 1 - referenční koutový odražeč, KO - měřící koutový odražeč.....	33
obr. 2.7	Fotografie kompaktní interferometrické jednotky	33
obr. 2.8	Princip kvadrurní detekční jednotky; NP – nepolarizující dělič světla, PD1 a PD2 – polarizující dělič světla, D1 a D2 – detektory, S1 a S2 – sumátory.....	34
obr. 2.9	Interferometrická lavice s vlepenu vláknovou Braggovou mřížkou; FBG – vláknová Braggova mřížka.	35
obr. 2.10	Blok řídicí a vyhodnocovací elektroniky s moduly teplotního kontroleru, interferenční karty, AD/DA karty a proudového zdroje pro laserovou diodu.	35
obr. 2.11	Blokové schéma teplotního kontroleru.	36

obr. 2.12	Teplotní kontroler.	36
obr. 2.13	Blokové schéma interferometrické karty [19].	37
obr. 2.14	Fotografie interferometrické karty	37
obr. 2.15	AD/DA karta od National Instruments s maximální vzorkovací rychlostí 1,25 MS/s s 16 analogovými vstupy, 2 analogovými výstupy a 24 digitálními vstupy/výstupy s max. frekvencí 1 MHz.	38
obr. 2.16	Modulární AD/DA karta používaná v UPT AVČR.	38
obr. 2.17	Návrh konstrukce 1. generace senzoru s meandry umožňující změnu délky senzoru. V osách měřicího senzoru se nacházejí montážní otvory. Ve středu konstrukce se nacházejí otvory pro uchycení krytu senzoru.	39
obr. 2.18	Fotografie 1. generace senzoru s vloženými vláknovými Braggovými mřížkami. V černé trubičkové ochraně se nachází vláknová mřížka pro měření změn délky. V žluté trubičkové ochraně je vláknová mřížka pro kompenzaci teploty.	39
obr. 2.19	Model 2. generace senzoru s Braggovými mřížkami.	40
obr. 2.20	Fotografie 2. generace senzoru.	40
obr. 2.21	Část ovládacího panelu pro nastavení optického filtru a teplotního kontroleru. ...	41
obr. 2.22	Detekování maxima signálu napětí odražených od Braggových mřížek – bílá křivka, modulační napětí generované pro optický filtr – červená křivka.	41
obr. 2.23	Jeden z časových grafů zobrazující změny délky senzoru v reálném čase na předním panelu řídicího programu.	42
obr. 2.24	Grafický výstup z interferenční karty v podobě rotujícího fázoru.	42
obr. 2.25	Ovládací panel pro řízení mikro-posuvného stolku.	43
obr. 2.26	Vývojový diagram řídicího programu – část 1.	43
obr. 2.27	Vývojové diagramy řídicího programu – část 2; a) vývojový diagram měření vláknové Braggovy mřížky, b) vývojový diagram měření interferometru, c) vývojový diagram měření teploty, d) vývojový diagram měření mikro-posuvného stolku.	44
obr. 2.28	Ukázka části programu vytvořeného v LabView.	45
obr. 2.29	Přední ovládací panel řídicího programu v LabView.	46
obr. 3.1	Interferenční blok skládající se z kompaktní interferometrické jednotky, kvadrurní detekční jednotky, mikroposuvného stolku a přilepené vláknové Braggovy mřížky – FBG.	47
obr. 3.2	Záznam z 60 hodinového měření stability optického filtru; modrá křivka jsou data ze stabilní polohy mikro-posuvného stolku, zelená křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřicí vláknové Braggovy mřížky. ...	48

obr. 3.3	Záznam z měření stability optického filtru bez klimatizace v laboratoři; zelená křivka jsou data z teplotního senzoru umístěné na intererometru, modrá křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřící vláknové Braggovy mřížky.	48
obr. 3.4	Záznam z měření stability optického filtru bez klimatizace a vypnutého topení v laboratoři; zelená křivka jsou data z teplotního senzoru umístěné na intererometru, modrá křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřící vláknové Braggovy mřížky.	49
obr. 3.5	Zánam z měření krokových změn s délkou kroku 10 μm a s ustálením po dobu 1 min.; modrá křivka jsou data záznamu z interferometru, zelená křivka jsou data měřící vláknové Braggovy mřížky.	49
obr. 3.6	Část záznamu z měření krokových změn s krokem 1 μm a s ustálením po dobu 1 min; modrá křivka je záznam z mikro-posuvného stolku, zelená křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřící vláknovy Braggovy mřížky.	50
obr. 3.7	Blokové schéma měření změn délky na betonovém nosníku v ÚJV Řež; OV – optické vlákno.	51
obr. 3.8	Experimentální ověření optického sensorového systému v ÚJV Řež.	52
obr. 3.9	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.	52
obr. 3.10	Umístění vertikálního a horizontálního senzoru bez ochranného krytu pro měření tvarových změn na kontejnmentu jaderné elektrárny Temelín.	53
obr. 3.11	Umístění vertikálního a horizontálního senzoru pro měření tvarových změn na kontejnmentu jaderné elektrárny Temelín.	54
obr. 3.12	Část záznamu naměřených hodnot protažení senzorů při odstávce a zkoušce PERZIK jaderného reaktoru v JE Temelín.	54
obr. 3.13	Část záznamu naměřených hodnot teploty při odstávce a zkoušky PERZIK jaderného reaktoru v JE Temelín.	55
obr. 3.14	Záznam protažení senzorů během periodické zkoušky integrity kontejnmentu PERZIK.	56
obr. 3.15	Teplotní záznam z periodické zkoušky integrity kontejnmentu PERZIK.	56
obr. 3.16	Porovnání naměřených hodnot při zkoušce PERZIK – horizontální senzory; šedivé křivky jsou tenzometrické senzory, červená křivka je průměr	

	tenzometrických senzorů, modrá křivka je záznam ze senzoru s vláknovou Braggovou mřížkou.....	57
obr. 3.17	Porovnání naměřených hodnot při zkoušce PERZIK – vertikální senzory; šedivé křivky jsou tenzometrické senzory, červená křivka je průměr tenzometrických senzorů, modrá křivka je záznam ze senzoru s vláknovou Braggovou mřížkou. ..	57
obr. 3.18	Záznam kompenzační mřížky z teplotního testu prováděného v prostorách obklopující kontejnment.	58
obr. 3.19	Záznam měřicí mřížky z teplotního testu prováděného v prostorách obklopující kontejnment.....	58

ÚVOD

V současné době se pro přesná měření délkových změn stále více využívá optovláknových senzorů. V těchto optovláknových senzorech se nejčastěji využívá Brillouinova rozptylu nebo se do optických vláken zapisují tzv. Braggovy mřížky. Optické senzory mají oproti běžným senzorům např. odporovým tenzometrům mnoho výhod. Mezi největší výhody patří jejich odolnost elektromagnetickému záření, chemická odolnost a mj. kompaktní rozměry.

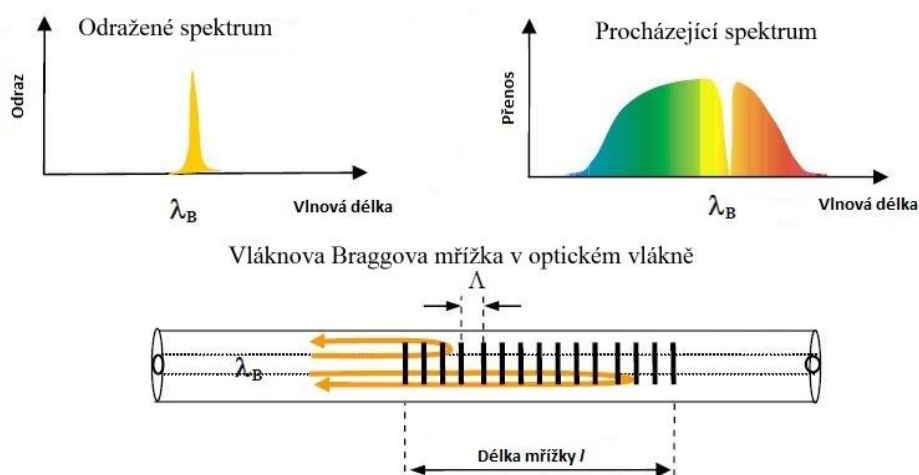
Senzory využívající Brillouinova rozptylu, známé jako DTSS senzory (Distributed Temperature and Strain Sensor) se využívají v aplikacích kde je potřeba měřit mechanické namáhání a změnu teploty na velké vzdálenosti $l = (0-30)$ km. Jejich rozlišení mechanického namáhání a teploty je běžně $\Delta l = 1 \mu\text{m}$ a $\Delta t = 0,1^\circ\text{C}$ na 1 cm délky optického vlákna. Přesnost určení místa těchto změn je cca 1m. Senzory DTSS používají standardní gradientní telekomunikační vlákno. Hlavní nevýhodou senzoru využívající Brillouinův rozptyl je nutnost použití výkonového laserového zdroje.

Pro měření mechanického namáhání s větší přesností se používají optické senzory s Braggovou mřížkou. Měřicí systémy se senzory s Braggovou mřížkou mají obvykle základní rozlišení 0,1 % z poměrného rozsahu měření. Senzor může být kombinovaný s měřením teploty, kdy se v jednom senzoru nachází 2 Braggovy mřížky, jedna se používá na měření mechanického namáhání, druhá slouží k určení změn teploty. Braggovy mřížky se používají v sensorové technice při měření mechanického namáhání, zejména pak pro měření změn délky, vibrací, tlaku a teploty i v místech, kde je použití standardních elektrických senzorů komplikované.

Tato práce je zaměřena na návrh měřicího systému délkových změn s Braggovou vláknovou mřížkou. První část práce se věnuje základním principům měření změn délky s vláknovou Braggovou mřížkou a výběru nejvhodnější metody pro měření spektra. Druhá část práce je zaměřena na návrh konstrukce senzoru s Braggovými mřížkami a na návrh systému pro ověření stability a přesnosti měření v laboratorních podmínkách. Součástí práce je také experimentální měření na speciálním nosníku v ÚJV Řež a měření tvarových změn kontejnmentu v JE Temelín.

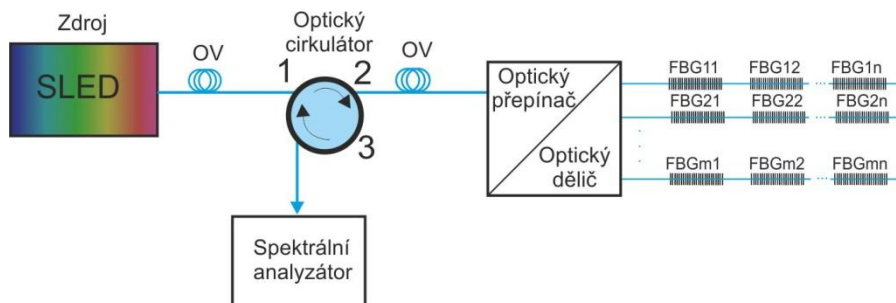
1 Měření s vláknovými Braggovými mřížkami

Braggova mřížka v optickém vlákně má funkci optického frekvenčního filtru (obr. 1.1). Parametry filtru se mění s fyzikálními změnami optického vlákna, které pak způsobují změny v parametrech Braggovy mřížky. Vlnová délka a odrazivost Braggovy mřížky je závislá na rozdílu a periodě indexu lomu v jádře vlákna, délce mřížky a vlnové délce procházejícího světla [2].



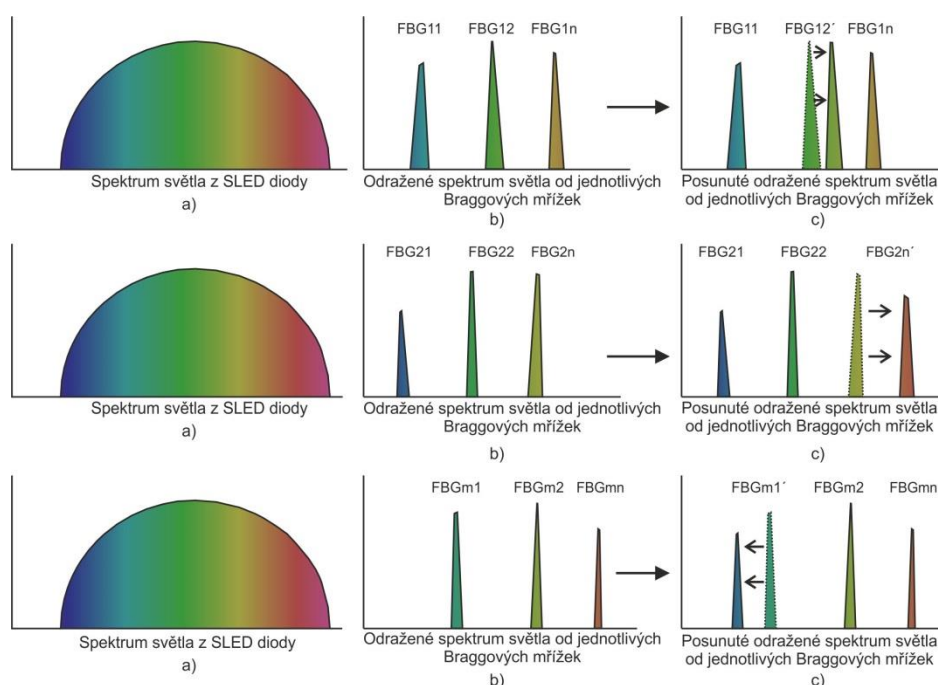
obr. 1.1 Princip Braggovy mřížky, průchod vlny Braggovou mřížkou [3]; λ_B je Braggova vlnová délka, Λ je perioda Braggovy mřížky.

Pro měření délkových změn Braggovými mřížkami se může spektrum měřit v propustném nebo reflexním směru. V našem případě jsme zvolili uspořádání v reflexním směru, které lze vidět na (obr. 1.2). V tomto směru se nachází zdroj širokospektrálního světla a detektor odraženého světla na stejném konci optického vlákna. Světlo vycházející ze zdroje širokospektrální LED diody je navázáno do optického vlákna a přivedeno na optický cirkulátor. Z optického cirkulátoru směřuje do optického přepínače, nebo optického děliče v závislosti na potřebném počtu měřených senzorů. Poté je záření rozděleno nebo přepínáno do jednotlivých optických vláken s jednou nebo více Braggovými mřížkami. Odražené spektrum se šíří zpět v optickém vlákně do optického cirkulátoru, kde je přeměřováno do spektrálního analyzátoru. Spektrální analyzátor změří změnu odraženého spektra světla od Braggovy mřížky a na základě této změny vyhodnotí změnu délky senzoru.



obr. 1.2 Princip zapojení vláknových Braggových mřížek, SLED – širokospektrální LED dioda, OV je optické vlákno, FBG je vláknová Braggova mřížka.

Optickým přepínačem lze přepínat mezi jednotlivými optickými vlákny s několika Braggovými mřížkami. Podmínkou je, aby se jednotlivá odražená spektra světla na jednom optickém vlákne nepřekrývala v celém predikovaném rozsahu měření. V jednom optickém vlákne může být zapojeno až několik desítek senzorů v závislosti na spektrální šířce zdroje světla a spektrometru. V současnosti lze využít optovláknové přepínače až s 512 větvemi. Jedno měřicí pracoviště tedy dokáže potenciálně obsloužit až několik tisíc senzorů. S větším množstvím přepínaných vláken se však snižuje rychlost měření. Odražené spektrum světla od Braggových mřížek zapojených v sérii ve třech větvích lze vidět na obr. 1.3. Na vstup každé z větví optického vlákna přichází světelné spektrum z SLED diody, na počátku měření se odrazí vlnová délka od Braggových mřížek v závislosti na Braggově vlnové délce. Při změně protažení jednotlivých mřížek se odražené spektrum světla změní v závislosti na velikosti tohoto protažení.



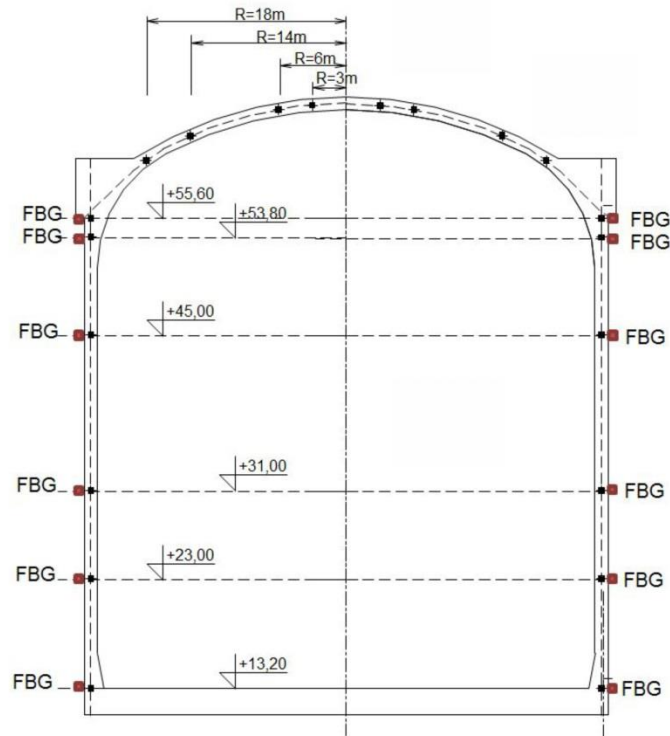
obr. 1.3 Princip odrazu spektra světla na Braggových mřížkách a) světelné spektrum z SLED diody b) jednotlivé odrazy spektra světla od Braggových mřížek v počátečním stavu c) naznačena změna spektra vyvolaná změnou délky na jedné z Braggových mřížek; FBG je vláknová Braggova mřížka.

1.1 Senzory pro kontejnment JE Temelín

Motivací diplomové práce byl projekt na zajištění měření tvarových změn kontejnmentu v JE Temelín. V současné době se nachází na kontejnmentu systém pro měření na principu tenzorového měření. Tenzometry jsou umístěny uvnitř stěny kontejnmentu, která je 1,2 m silná. Tyto senzory jsou však na hranici své životnosti a je nutné je nahradit novým systémem měření. Po analýze možných metod měření byl pro ověření zvolen systém s vláknovými Braggovými mřížkami.

Kontejnment má vnitřní průměr válcové části 45 m s výškou válcové části 38 m a tloušťkou stěny 1,2 m. Na vnější plochu kontejnmentu by měla být umístěna sada senzorů s vláknovými Braggovými mřížkami podle obr. 1.4. Senzory umístěné na povrchu

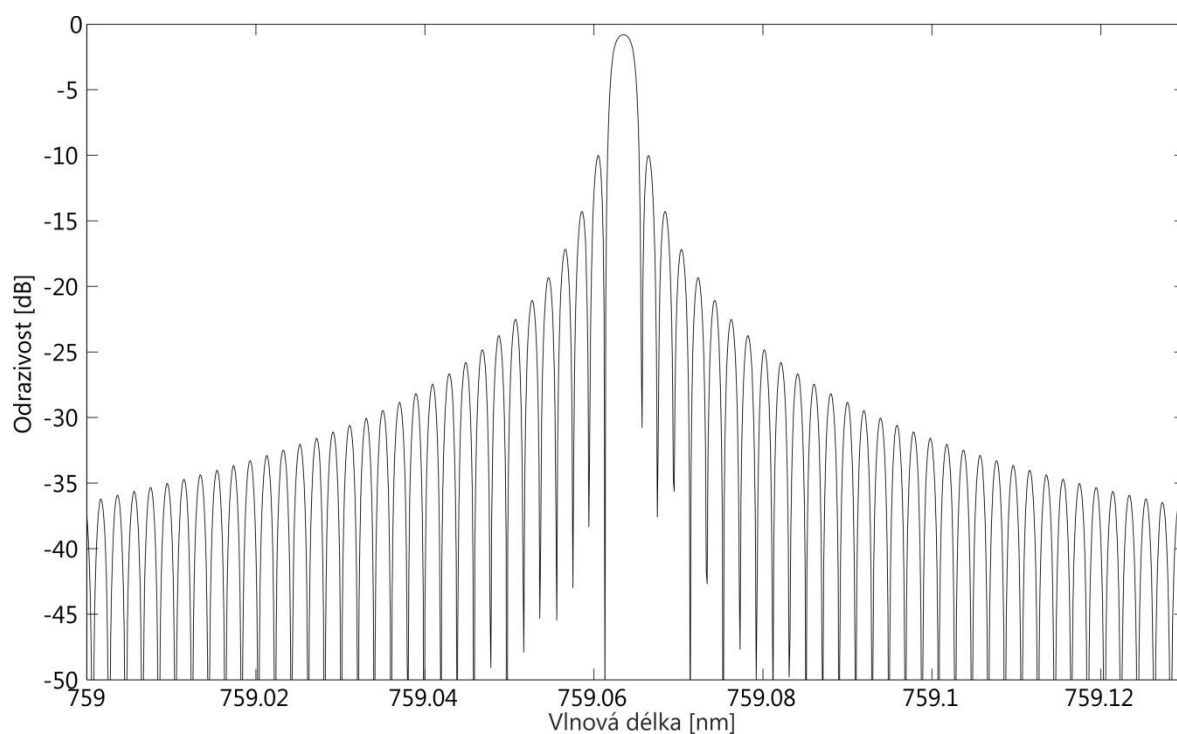
kontejnmentu ve vertikálním a horizontálním směru by v budoucnu měly pokrývat rovnoměrně celý povrch.



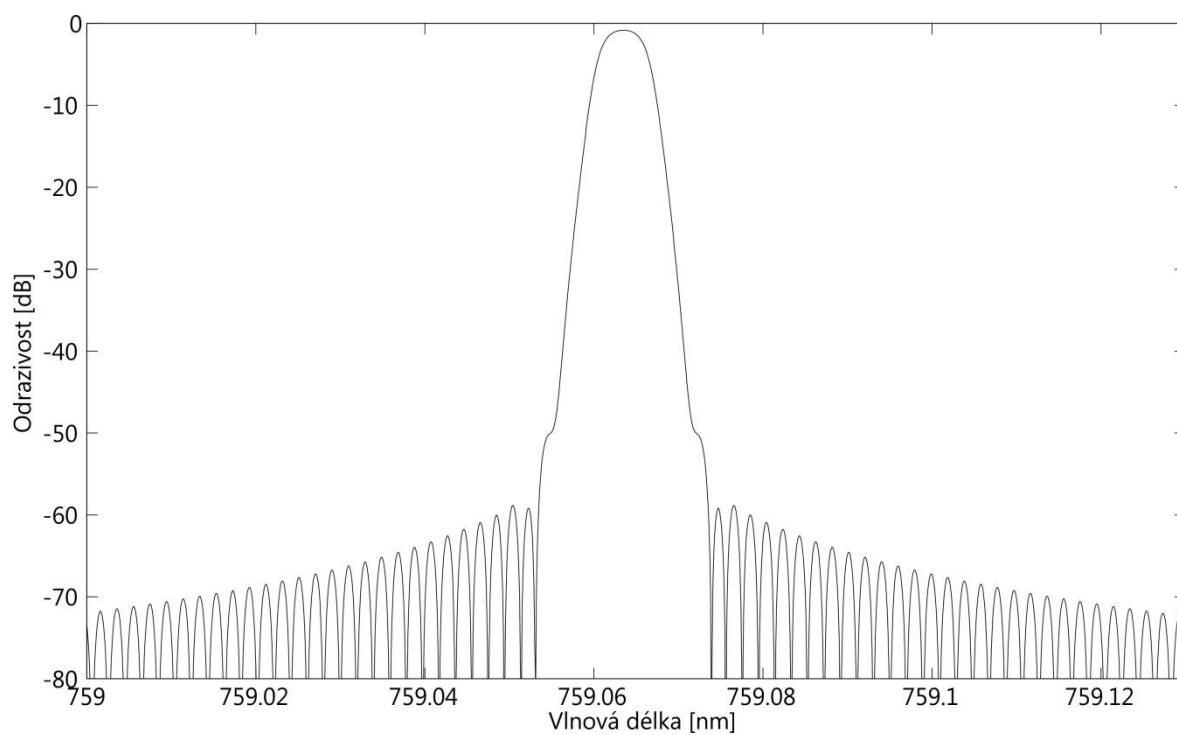
obr. 1.4 Náskres kontenmentu JE s předběžnou ukázkou umístění senzorů s Braggovými mřížkami;
FBG – senzory s vláknovou Braggovou mřížkou.

1.2 Spektrum Braggovy mřížky

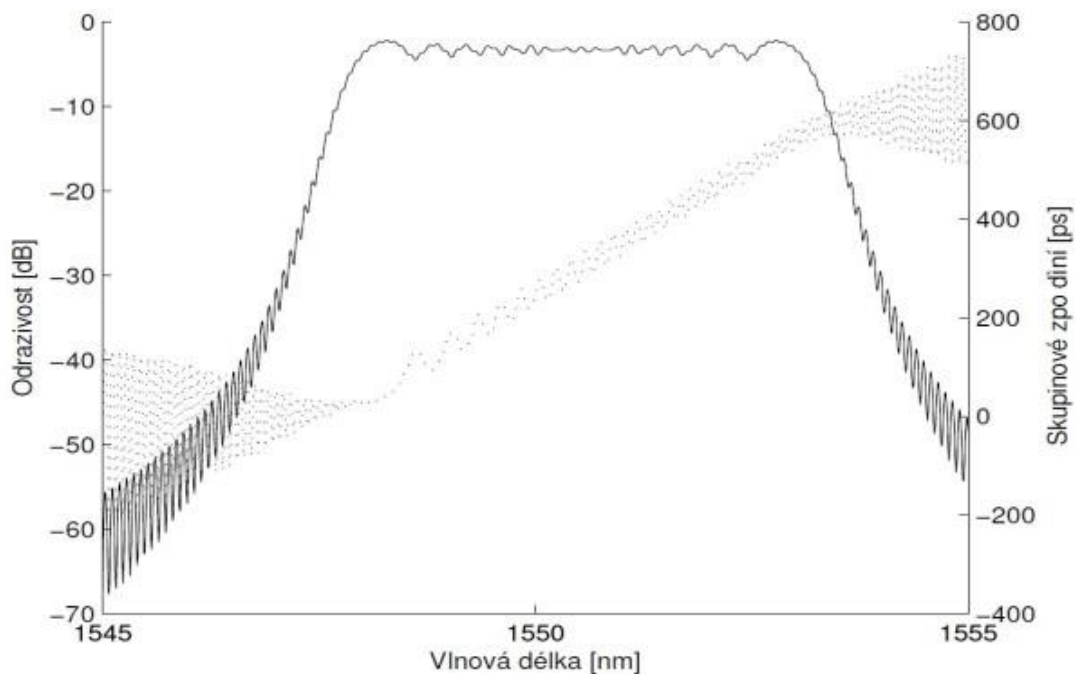
Základní částí systémů s Braggovými vláknovými mřížkami, který výrazně ovlivňuje přesnost a rozlišení měření, je optický spektrometr, který měří odražené spektrum od realizovaných senzorů. Odražené spektrum světla od Braggovy mřížky má různé tvary v závislosti na parametrech mřížky. Parametry, které mění vlastnosti odraženého spektra, jsou: délka a úhel mřížky a změna periody a hodnoty indexu lomu v jádře vlákna. Nejběžněji používanou mřížkou je mřížka uniformní, která má úhel mřížky kolmý k dopadu procházejícího světla jádrem vlákna a její perioda a hodnota indexu lomu je konstantní v celé své délce v optickém vlákně. Její odražené spektrum světla je na obr. 1.5. Standardní uniformní mřížka má malé potlačení postranních pásem, proto se používají mřížky s apodizací. Apodizace je konstantní periodická změna indexu lomu mřížky s měnící se velikostí změny indexu lomu v jádře optického vlákna. Odražené spektrum apodizované mřížky lze vidět na obr. 1.6. Mřížka se změnou periody indexu lomu v jádře vlákna se nazývá chirped mřížka. Chirped mřížka se nejčastěji používá při kompenzaci chromatické disperze v telekomunikačních aplikacích. Spektrum mřížky je na obr. 1.7.



obr. 1.5 Odražené spektrum světla od uniformní Braggovy mřížky s konstantní periodou a hodnotou změny indexu lomu a úhlem mřížky kolmým na procházející světlo v jádře vlákna.

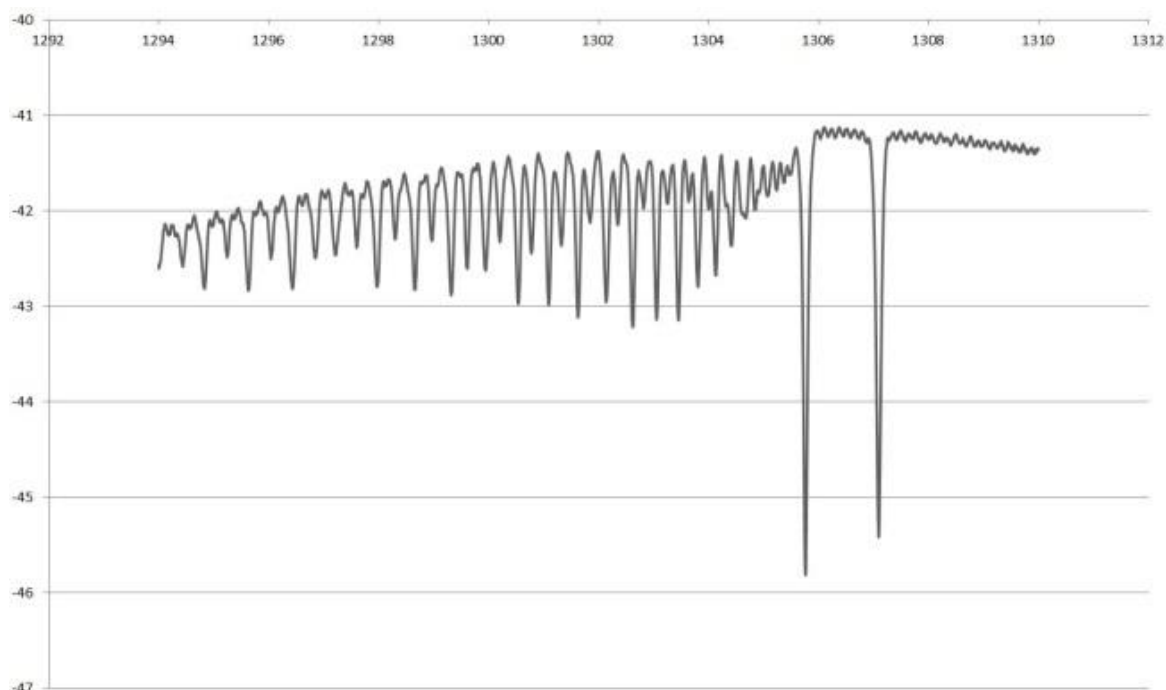


obr. 1.6 Odražené spektrum světla od Apodizované Braggovy mřížky s konstantní periodou změny indexu lomu mřížky a měnící se velikostí změny indexu lomu.



obr. 1.7 Odražené spektrum světla od Chirpované Braggovy mřížky se změnou periody indexu lomu mřížky a konstantní velikostí indexu lomu.

Mřížka, jejíž rovina změny indexu lomu je nakloněna k ose šíření světla pod úhlem φ se nazývá nakloněná mřížka. Úhel roviny mřížky pak určuje procentuální vyvázání světla z jádra vlákna do obalu vlákna. Spektrum nakloněné mřížky je na obr. 1.8.



obr. 1.8 Odražené spektrum světla od nakloněné Braggovy mřížky s nakloněnou rovinou změny indexu lomu k ose šíření světla a konstantní periodou a hodnotou změny indexu lomu mřížky.

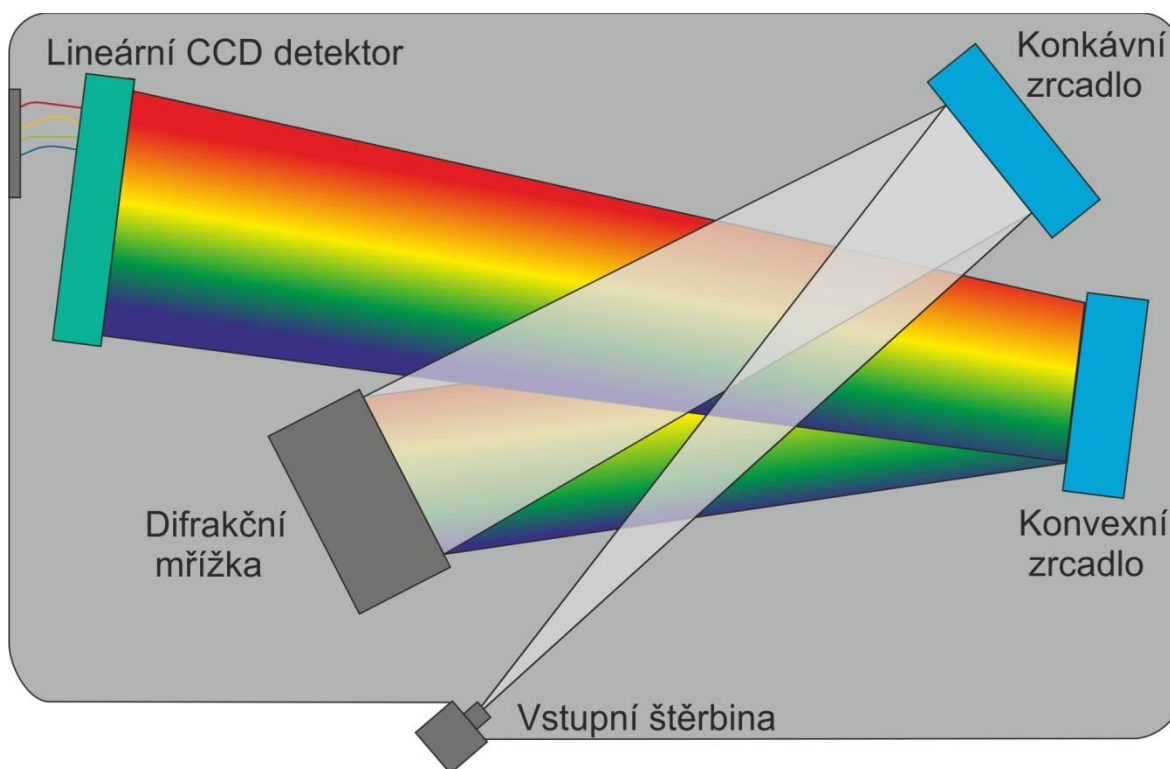
Pro měření změn délky vláknovými Braggovými mřížkami jsou vhodné mřížky uniformní, je-li potřeba získat odražené spektrum s větším potlačením postranních pásem, lze použít i mřížky apodizované.

Aby bylo možné měřit odražené spektrum světla od Braggovy mřížky, bylo nutné udělat analýzu metod měření optického spektra a vybrat nejvhodnější spektrální analyzátor s ohledem na jeho parametry a aplikaci ve které se bude používat.

1.3 Měření optického spektra

Měření optického spektra světla se realizuje optickými spektrometry, které se liší způsobem zaznamenání vlnové délky, uspořádáním optických součástí uvnitř spektrometru, citlivostí, rozlišením, velikostí a samozřejmě cenou.

Základním principem obecně používaných spektrometrů je rozložení přivedeného světla na části v závislosti na jeho vlnové délce a přeložit tyto signály do požadované podoby. Základní sestava spektrometru je na obr. 1.9. V první fázi se přivede světlo do spektrometru úzkým otvorem, kterému se říká vstupní štěrbinou. Světlo procházející vstupní štěrbinou se odráží na konkávním zrcadle a dopadá na difrakční mřížku. Na difrakční mřížce se světlo prostorově rozloží na jednotlivé vlnové délky, které pak snímá CCD detektor umístěný před difrakční mřížkou v dráze odraženého rozloženého světla. Vlnová délka záření se určí podle polohy snímaného záření na tomto detektoru [4]. Tyto tři součásti (vstupní štěrbinu, difrakční mřížku a detektor) jsou klíčovými součástmi všech spektrometrů.



obr. 1.9 Základní princip optických spektrometrů ve složení z konvexního a konkávního zrcadla, difrakční mřížky a lineárního CCD detektoru [4].

Vstupní štěrbinina

Vstupní štěrbinina je jedním z hlavních rozhodujících prvků ovlivňující výslednou citlivost spektrometru. Štěrbínou se určuje množství světla, které vstoupí do spektrometru. Vytváří se tak bodový zdroj pro konkávní zrcadlo. Rozměry štěrbininy jsou obvykle:

- šířky štěrbininy $d = \langle 5; 800 \rangle \mu m$,
- výška štěrbininy $h = \langle 1; 2 \rangle mm$.

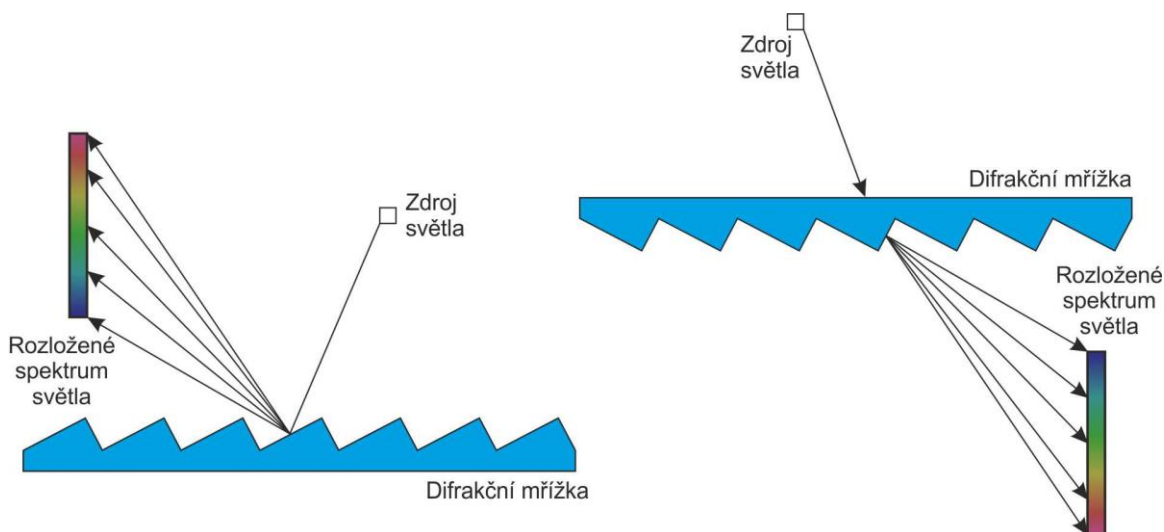
Nejběžněji jsou používány štěrbininy s šířkou $d = 10, 25, 50, 100$ a $200 \mu m$. Světlo procházející štěrbinou dopadá na konkávní zrcadlo, kde se rozbíhavé světlo odrazí, tak aby jednotlivé složky světla byly navzájem rovnoběžné. Rovnoběžné světlo pak dopadá na difrakční mřížku [4].

Difrakční mřížka

Difrakční mřížka je optický prvek, u kterého se periodicky mění jeho tloušťka, nebo index lomu. Difrakční mřížka využívá jevu difrakce, který rozkládá dopadající světlo na vrypoch mřížky, viz obr. 1.10. Světlo se rozkládá na jednotlivé spektrální složky podle vlnových délek a ty se odrazí nebo projdou difrakční mřížkou pod určitým úhlem. Světlo rozložené na difrakční mřížce dopadá na stínítko, kde vzniknou úzká interferenční maxima a minima [5]. Soustavě těchto interferenčních maxim a minim se říká interferenční obrazec. Maximum interferenční intenzity m -tého řádu pro vlnovou délku světla λ nastane pro úhel θ , který lze vyjádřit ze vztahu (1.1).

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{m \cdot \lambda}{d}\right), \quad 1.1$$

kde m je řád difrakce, λ je vlnová délka světla, d je mřížková konstanta.



obr. 1.10 Princip difrakční mřížky: 1) odrazné 2) průchozí [6].

Difrakční mřížka spektrometru určuje rozsah vlnových délek a optické rozlišení, které spektrometr dosáhne. Mřížku lze popsat frekvencí resp. mřížkovou konstantou a úhlem vrypů či úhlem změny indexu lomu. Jsou 2 typy mřížek: reliéfní mřížky a mřížky holografické. Reliéfní mřížky jsou vytvořeny velkým počtem paralelních vrypů na povrchu substrátu, který je pokryt vysoce reflexní vrstvou. Holografické mřížky jsou vytvořeny

interferencí dvou UV paprsků laseru, které vytvoří na substrátu sinusoidní změnu indexu lomu. Výroba reliéfních mřížek je levnější, ale vykazuje větší počet chyb v opakovatelnosti periody mřížky, které snižují optické rozlišení spektrometru. Výhodou holografických mřížek je možnost jejich výroby přímo na konkávním zrcadle, čímž se sníží počet optických prvků ve spektrometru. Nevýhodou holografických mřížek je však menší odrazivost. Rozklad světla - velikost disperze, je určena množstvím vrypů na 1 mm mřížky. Množství vrypů na 1 mm tak určuje spektrální rozsah vlnových délek, které mřížka rozloží a je hlavním faktorem ve spektrálním rozlišení.

Rozložené světlo se v závislosti na vlnové délce odrazí od difrakční mřížky a je nasměrováno na konvexní zrcadlo, kde se odrazí do rozbíhavého světla a směřuje na detekční zařízení.

Detektor

V tradičních spektrometrech je v obrazové rovině umístěna druhá - výstupní štěrbinou, která má stejnou šířku jako vstupní štěrbinou. Za výstupní štěrbinou se nachází optický detektor. V této konfiguraci detektor snímá intenzitu světla procházející výstupní štěrbinou od otáčející se difrakční mřížky.

V moderních spektrometrech se používají lineární CCD detektory, které umožnily vývoj spektrometrů s pevnou difrakční mřížkou. Světlo odrážející se od difrakční mřížky dopadá na jednotlivé pixely lineárního CCD detektoru. Každý pixel CCD detektoru pak představuje část světelného spektra s určitou intenzitou.

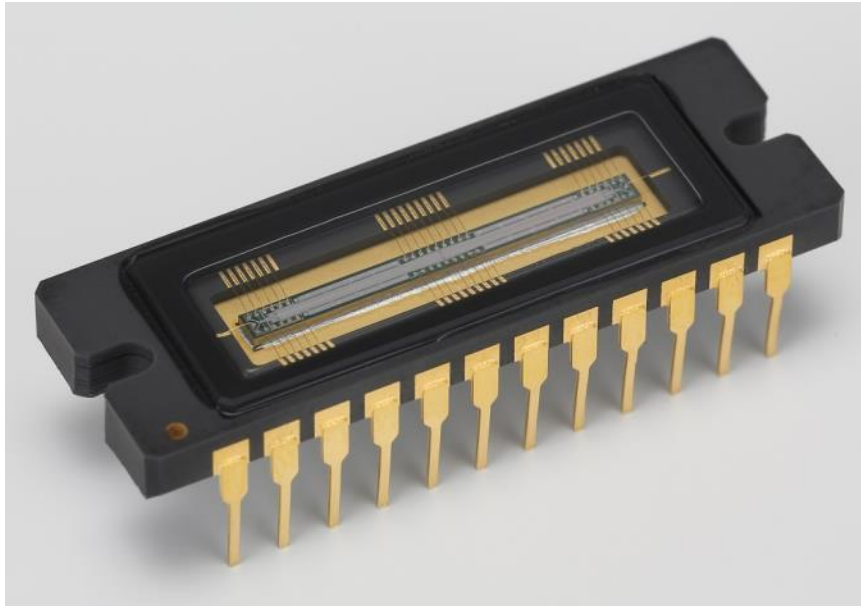
Mezi nejdůležitější vlastnosti detektoru patří šířka zakázaného pásu polovodiče, ze kterého je detektor vyroben. Šířka zakázaného pásu polovodiče určuje maximální vlnovou délku, kterou je schopen detektor detekovat. Maximální vlnová délka, kterou lze detekovat, lze vypočítat podle vztahu (1.2).

$$\lambda_{max} = \frac{h \cdot c}{E_{gap}}, \quad 1.2$$

kde h je Planckova konstanta, c je rychlost světla, E_{gap} je šířka zakázaného pásu polovodiče.

Mezi nejběžnější materiály detektorů patří: Si , $InGaAs$. Např. pro detektor z Si polovodiče, který má šířku zakázaného pásu $E_{gap} = 1,11 \text{ eV}$ je max. detekovaná vlnová délka světla $\lambda_{max} = 1117 \text{ nm}$. Minimální detekovaná vlnová délka je určena dle charakteristické absorpce polovodičového materiálu a tloušťkou polovodiče [4].

Lineární CCD detektory mají různou horizontální velikost $L_{CCD} = \langle 128; 4096 \rangle$ pixelů. Velikost pixelů se pohybuje $X_{CCD} = \langle 8; 24 \rangle \mu\text{m}$, $Y_{CCD} = \langle 8; 1000 \rangle \mu\text{m}$. Rychlost snímání lineárního CCD detektoru může dosáhnout až $f = 100\text{kHz}$ a je závislá na množství pixelů v detektoru. Pro detekování světelného spektra $\lambda = \langle 1000; 1700 \rangle \text{ nm}$ se používá CCD detektor vyrobený z $InGaAs$. Křemíkové detektory se používají pro detekování světelného spektra $\lambda = \langle 400; 1100 \rangle \text{ nm}$. Cena CCD detektoru $InGaAs$ je v porovnání s křemíkovými CCD detektory výrazně vyšší [7].

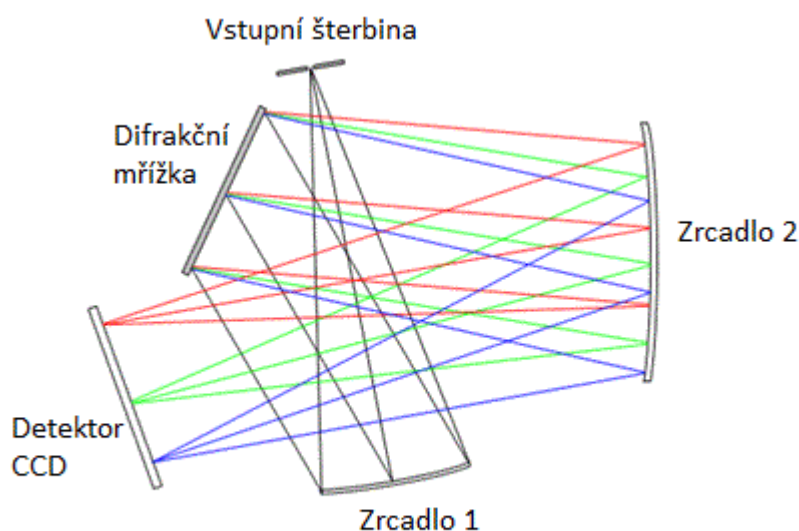


obr. 1.11 Příklad lineárního CCD detektoru - Lineární CCD detektor Hamamatsu Photonics se spektrální šířkou snímání 200-1000 nm, 2048 aktivních pixelů [8].

Spektrometry mají různá uspořádání, která mají své výhody a nevýhody. Mezi nejznámější patří křížený Czerny - Turner spektrometr, rozložený Czerny - Turny spektrometr a spektrometr s konkávní holografickou mřížkou.

1.3.2 Křížený Czerny - Turner spektrometr

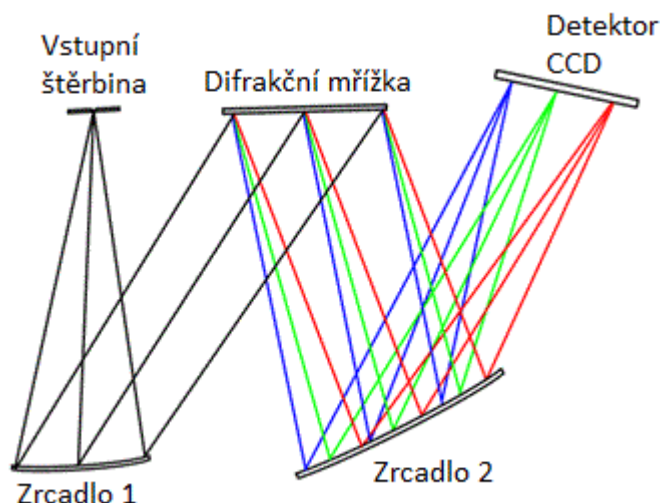
Křížený Czerny - Turner spektrometr má konfiguraci znázorněnou na obr. 1.12. Obsahuje dvě konkávní zrcadla a jednu difrakční mřížku. Světlo ze vstupní štěrbině dopadá na zrcadlo 1, kde je fokusované na difrakční mřížku. V závislosti na vlnové délce difrakční mřížka rozdělí světlo a odrazí ho na zrcadlo 2. Zrcadlo 2 zaostří rozptýlené světlo z difrakční mřížky na detektor. Nevýhodou této konfigurace jsou velké obrazové aberace, proto se používá pro spektrometry s menším rozlišením [4].



obr. 1.12 Princip kříženého Czerny - Turner spektrometru [4].

1.3.3 Rozložený Czerny - Turner spektrometr

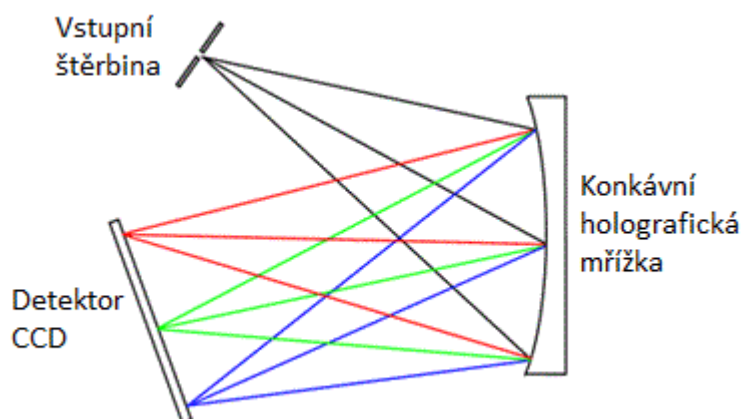
Rozložený Czerny - Turner spektrometr, který je vidět na obr. 1.13, je založen na stejném principu jako křížený Czerny - Turner spektrometr ale s jiným uspořádáním optických prvků. Výhodou tohoto uspořádání je menší rozptyl světla ve spektrometru a také menší šum v UV oblasti spektra světla [4].



obr. 1.13 Princip rozloženého Czerny-Turner spektrometru [4].

1.3.4 Spektrometr s konkávní holografickou difrakční mřížkou

V tomto uspořádání, které je vidět na obr. 1.14, se holografická mřížka používá jako disperzní a zaostřovací prvek. Tím se počet optických prvků ve spektrometru snižuje a to má za následek vyšší přesnost měření. Holografická mřížka eliminuje obrazovou aberaci a umožňuje použití spektrometru v širokém rozsahu vlnových délek [4].



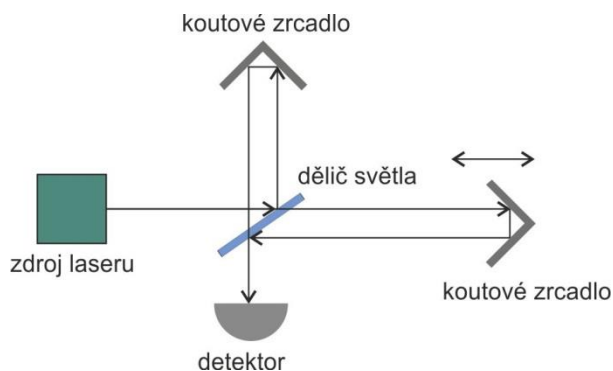
obr. 1.14 Princip spektrometru s holografickou difrakční mřížkou [4].

1.4 Vlnoměr

Speciální variantou spektrometru může být tzv. vlnoměr. Jedná se o druh interferometru, který se používá k přesnému určení vlnové délky laserového záření. Vlnoměry můžeme

rozdělit na skenovací tj. s pohyblivými součástkami a na statické tj. bez pohyblivých součástí.

1.4.1 Skenovací vlnoměr s Michelsonovým interferometrem



obr. 1.15 Princip skenovacího vlnoměru s Michelsonovým interferometrem.

Paprsek dopadá na optický dělič světla, kde se rozdělí na dva svazky, viz obr. 1.15. Tyto svazky urazí rozdílné dráhy k tzv. koutovým zrcadlům, kde se odrazí tak, aby se na optickém děliči opět spojily. Jedno z koutových zrcadel je referenční a nepohybuje se, druhé se pohybuje v ose šíření paprsku. Spojené paprsky na optickém děliči světla spolu interferují a jsou detekovány ve fotodetektoru. Nebude-li se pohyblivé rameno s koutovým zrcadlem pohybovat, intenzita světla se nebude měnit. Bude-li se pohybovat rameno s koutovým zrcadlem, bude se měnit intenzita světla dopadající na fotodetektor. Pohybem koutového zrcadla o známou délku a počítáním interferenčních proužků se najde rezonanční vlnová délka světla. Základní rozlišení interferometru je pak určeno jedním interferenčním proužkem, viz obr. 1.16 a schopností detektoru rozlišit zlomky interferenčního proužku [9], [10].

Pro kalibraci interferometru se používá referenční zdroj světla o známé vlnové délce, nejčastěji He-Ne laser s vlnovou délkou 632 nm [11].

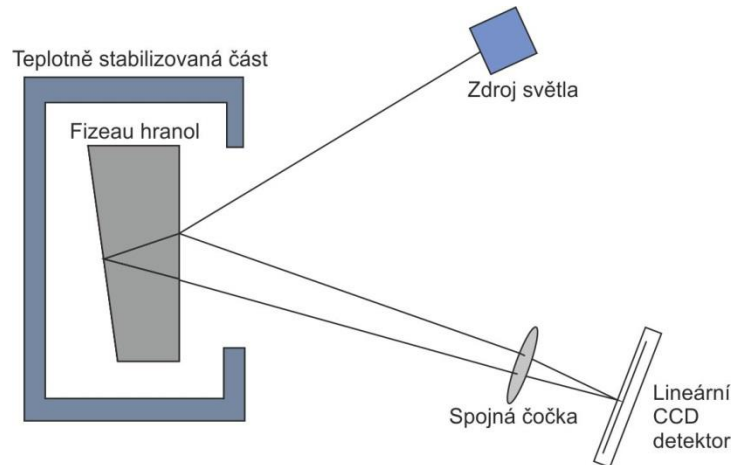


obr. 1.16 Interferenční proužky superpozice dvou Gaussovských paprsků [12].

1.4.2 Statický vlnoměr s Fizeau interferometrem

Dalším typem vlnoměru je vlnoměr s Fizeau interferometrem (obr. 1.17). Fizeau interferometr používá dva odrazivé povrchy hranolu, které spolu svírají určitý úhel. Z důvodu omezení teplotní roztažnosti hranolu se hranol nachází v teplotně stabilizované části interferometru. Příchozí světlo prochází štěrbinou a je nasměrováno na hranol, kde se část svazku odrazí na přední straně hranolu a část na povrchu 2. Odražené svazky z obou stran hranolu spolu interferují a vytváří interferenční obraz, který dopadá na CCD detektor. V závislosti na poloze interferenčního obrazce na CCD detektoru se určí vlnová délka příchozího světla [9].

Hlavní předností vlnoměru s Fizeau interferometrem je možnost měření v pulzním i kontinuálním režimu, vysoká rychlost měření, velký rozsah měření $\lambda <192 \text{ nm}; 11 \mu\text{m}>$, vysoké rozlišení měření $<2; 30> \text{ MHz}$. Mezi nevýhody lze řadit poměrně vysoké náklady na pořízení [13].



obr. 1.17 Princip statického vlnoměru s Fizeau interferometrem.

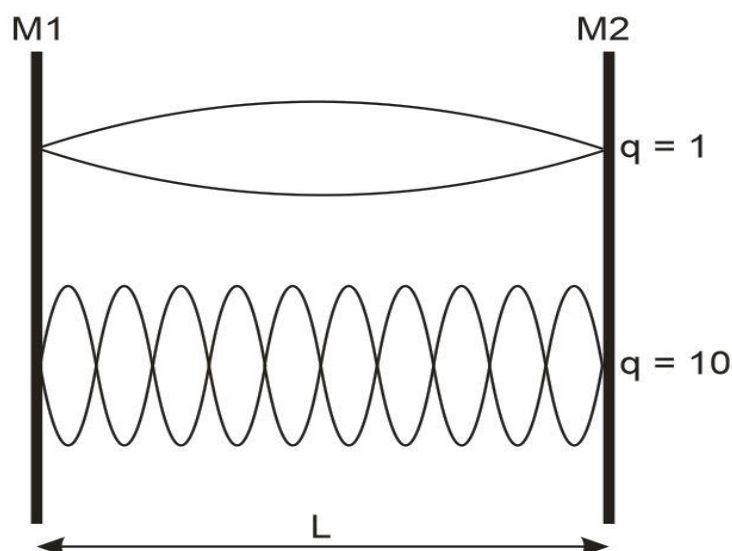
1.5 Fabry - Perotův rezonátor

Zvláštním typem spektrometru je Fabry - Perotův rezonátor s proměnou délkou. Nejběžněji se používá ke změně délky rezonátoru piezoelektrický krystal. Piezoelektrický krystal, který je umístěn na jednom ze zrcadel, mění svoji délku v závislosti na přivedeném napětí. Modulací amplitudy napětí lze pak regulovat délku rezonátoru a skenovat spektrum světla přivedeného do rezonátoru. Výhody Fabry - Perotova rezonátoru, v zapojení pro měření vlnové délky, jsou nízká pořizovací cena, vysoké rozlišení a malé rozměry.

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 (1.3).

$$L_n = L \cdot n, \quad 1.3$$

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



obr. 1.18 Rozložení intenzity záření v planoparalelním Fabry – Perotově rezonátoru pro dvě různé vlnové délky; M1, M2 – zrcadla rezonátoru, q -počet podélních modů rezonátoru.

Stojatá vlna v rezonátoru vzniká v případě splnění rezonanční podmínky rezonátoru, kdy délka rezonátoru L_n je celočíselným násobkem poloviny vlnové délky λ . Rozložení stojaté vlny (obr. 1.18) lze vypočítat ze vzdálenosti zrcadel L_n , vlnové délky λ a indexu lomu prostředí n . Rozložení stojaté vlny je definováno počtem axiálních modů q v rezonátoru (1.4).

$$q = \frac{2L_n}{\lambda}, \quad 1.4$$

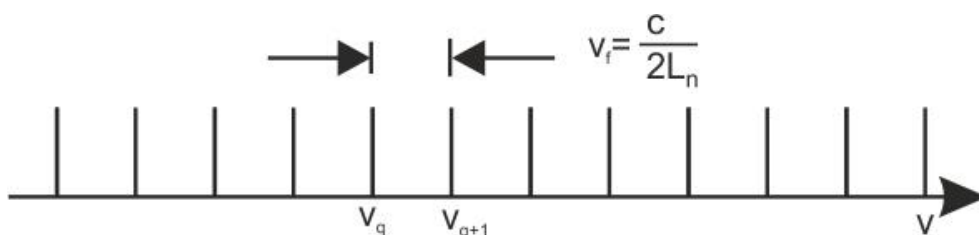
Rezananční frekvence může nabývat pouze diskrétních hodnot a lze jí pak vypočítat podle (1.5).

$$\nu_q = q \frac{c}{2L_n}, \quad 1.5$$

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

Frekvenční vzdálenost sousedních modů rezonátoru (obr. 1.19) se pak vypočítá (1.6).

$$\nu_f = \Delta\nu = \nu_q - \nu_{q-1} = \frac{c}{2L_n}. \quad 1.6$$



obr. 1.19 Rezananční 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 [14], [15], [16].

K popisu kvality rezonátoru se používá činitel jakosti Q (1.7) a selektivita F (1.8). Velké hodnoty kvality dosahují rezonátory s nízkými ztrátami. Kvalita souvisí s dobou života fotonu v rezonátoru τ .

$$Q = 2\pi\Delta\nu\tau, \quad 1.7$$

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

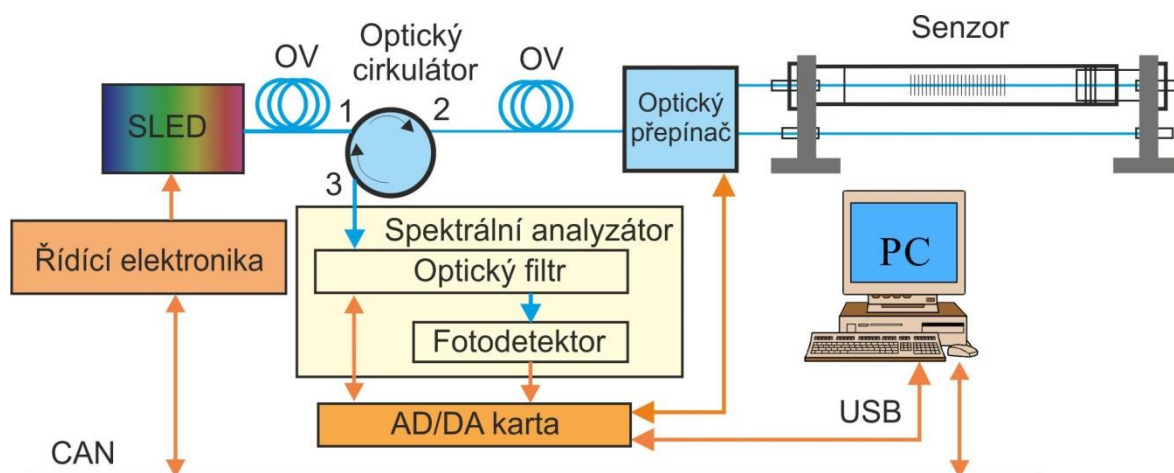
$$F = \frac{\pi}{|\ln(\sqrt{R_1 R_2} V)|}, \quad 1.8$$

kde R_1, R_2 jsou odrazivosti na zrcadlech, V je útlum rezonátoru pro jeden průchod záření.

V navrhovaném systému pro měření délkových změn senzory s vláknovými Braggovými mřížkami byl vybrán spektrometr na principu F-P rezonátoru. Parametry, které rozhodovaly při výběru spektrometru, byly: cena, rozlišení, rozměry a ovládání. Cena pořízení F-P rezonátoru je poloviční ve srovnání s běžnými spektrometry a umožňuje snadné ovládání pouze modulačním napětím na piezoelektrickém krystalu. Pro měření odraženého spektra Braggovy mřížky je rozlišení dostatečné a malé rozměry vyhovují navrženému systému.

2 Návrh a ověření systému měření s vláknovými Braggovými mřížkami

V první verzi bylo navrženo zapojení se senzorem s Braggovými mřížkami, optickým prepínačem a spektrometrem skládajícím se z optického filtru a fotodetektoru. Schéma navrženého systému je na obr. 2.1.



obr. 2.1 Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky Braggovy mřížky. Vláknové mřížky v senzoru jsou přepínány optickým prepínačem a jejich odražené spektrum je detekováno ve spektrometru skládajícího se z optického filtru a fotodetektoru ; OV je optické vlákno, CAN je sběrnice Controller Area Network.

V navrhovaném systému byl využit pro měření spektrálních změn princip F-P rezonátoru. Jako zdroj širokospektrálního světla byla použita SLED dioda DL-CS5203A s výkonem $P = 20 \text{ mW}$, s centrální vlnovou délkou $\lambda_D = 1550 \text{ nm}$ a šířkou spektra $\lambda_s < 1530; 1570 > \text{ nm}$ [17]. Světlo z této širokospektrální LED diody je navázáno do optického vlákna, které je připojeno k optickému cirkulátoru. Optický cirkulátor převede světlo ze vstupu č. 1 na vstup č. 2, kde je připojen optický prepínač. Optický prepínač připojuje jednotlivá optická vlákna s Braggovými mřížkami. Rychlost prepínání je řízena z počítače řídicím programem a lze ji měnit v závislosti na aplikaci.

Na jednotlivých Braggových mřížkách se odrazí světlo o vlnové délce dané Braggovou vlnovou délkou každé mřížky a vrací se zpět do cirkulátoru. V cirkulátoru je světlo od Braggovy mřížky přeměřováno ze vstupu 2 na vstup 3, kde se nachází spektrometr, který měří změny spektra odraženého světla od senzorů.

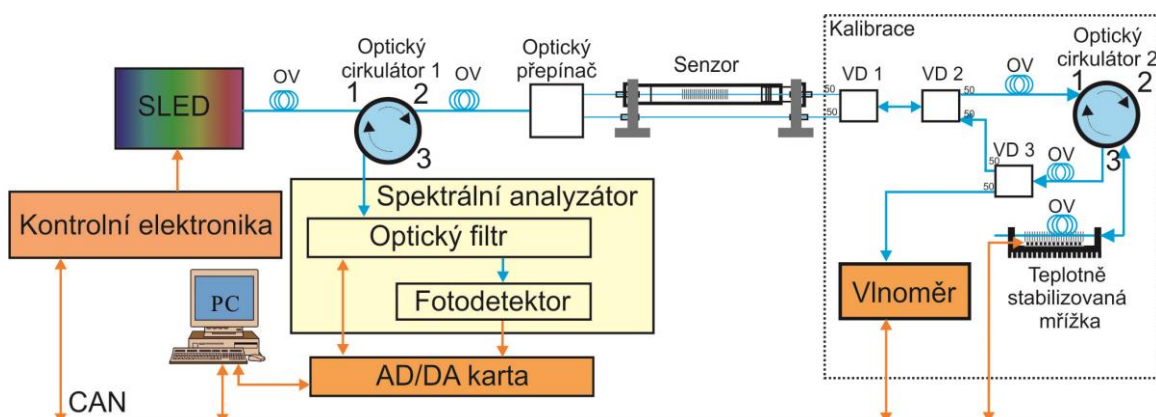
Spektrometr se skládá z optického filtru a fotodetektoru, který detekuje intenzitu světla procházejícího optickým filtrem. Optický filtr je založen na principu Fabry - Perotova rezonátoru. Pohyb jednoho ze zrcadel tohoto filtru je realizován piezoelektrickým keramickým krystalem. Délka piezoelektrického krystalu je řízena trojúhelníkovým průběhem napětí na jeho vstupu. Vzdálenost zrcadel ovlivňuje rezonanční vlnovou délku světla vycházejícího z filtru. Změníme-li vzdálenost mezi zrcadly, změní se tím rezonanční vlnová délka. Hodnota modulačního napětí při rezonanční vlnové délce pak odpovídá hledané vlnové délce odražené od Braggovy mřížky. Použitý vysokorychlostní filtr Lightwaves2020 je napájen napětím $U = < 4,8; 5 > \text{ V}$ a může být laděn

trojúhelníkovým napětím v maximálním rozsahu $\Delta U = \langle 0; 5 \rangle V$. Teplota filtru je udávána v rozsahu napětí $\Delta U = \langle 0; 3 \rangle V$, které reprezentuje teplotu filtru $\Delta T = \langle 15; 35 \rangle ^\circ C$. Celý systém je řízen z počítače, z programu vytvořeném v LabView přes rozhraní USB a CAN.

Optický filtr s Fabry - Perotovým rezonátorem lze ladit modulačním napětím i teplotou, která mění jeho fyzikální rozměry rezonátoru. Přesnost optického filtru s Fabry - Perotovým rezonátorem je tedy velmi citlivá na změny teploty. Optický filtr Lightwaves2020, jak udává výrobce, by měl být teplotně stabilizovaný. Naše měření ale ukázalo teplotní nestabilitu, kterou jsme vyřešili přidáním teplotně stabilizované Braggovy mřížky do návrhu měření. Tato teplotně stabilizovaná mřížka tvoří v systému měření frekvenční etalon. Mimo teplotní nestability byla zjištěna i nelinearita piezoelektrického krystalu. Nelinearita piezoelektrického krystalu přidává do měření jen minimální nepřesnost s porovnáním s teplotní nestabilitou filtru, a proto jsem jí v této práci zanedbal.

2.1 Teplotní stabilizace optického filtru

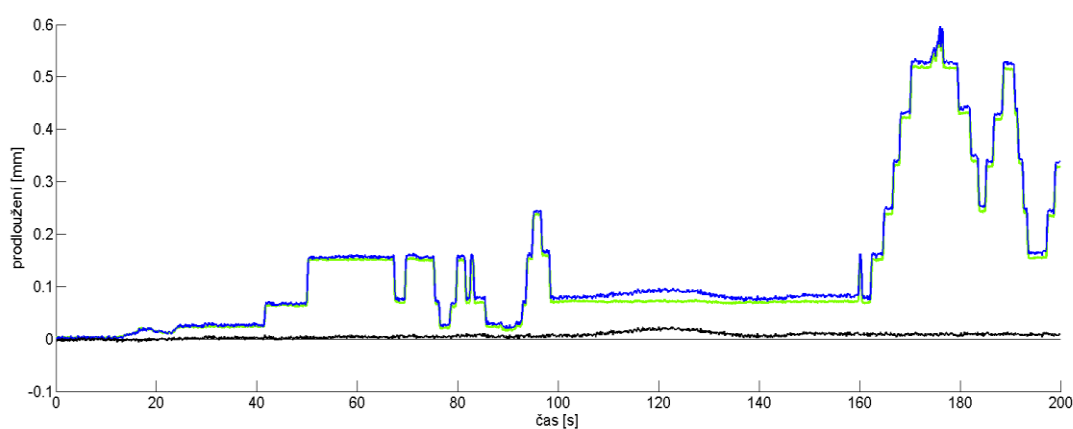
Systém pro měření délkových změn je proto rozšířen o kalibrační část (obr. 2.2), která využívá světla procházející senzorem. Světlo z měřícího senzoru je přivedeno přes vláknové děliče *VD1* a *VD2* do optického cirkulátoru 2. Z optického cirkulátoru 2 je záření přivedeno do teplotně stabilizované mřížky, kde se světlo odrazí a přes optický cirkulátor 2 a dělič světla *VD3* je jeho jedna část přivedena do vlnoměru a druhá zpět přes senzor a optický cirkulátor 1 do spektrálního analyzátoru. Teplotně stabilizovaná Mřížka je uzavřena v měděném pouzdře, které je umístěno na hliníkovém chladiči. Přenos tepla je zajištěn Peltierovým článkem, který je ovládán teplotním kontrolerem s přesností $0,001 ^\circ C$. Teplota je snímána teplotním senzorem AD22100, který je v pouzdru TO - 92 umístěn v měděném pouzdře v těsné blízkosti vláknové Braggovy mřížky. Teplotní senzor je složen z termistoru a linearizačního členu a změna teploty se v celém měřicím rozsahu teplot $\Delta T = \langle -50; 150 \rangle ^\circ C$ projeví změnou výstupního napětí na senzoru $\Delta U = \langle 0,25; 4,75 \rangle V$ [15], [18].



obr. 2.2 Zapojení sensorového systému pro měření délkových změn s rozšířením o kalibrační část odstraňující teplotní nestabilitu filtru. Kalibrační část obsahuje teplotně stabilizovanou mřížkou sloužící jako frekvenční etalon a vlnoměr pro kalibraci systému.

Při každém měření se společně s měřící mřížkou v senzoru měří i teplotně stabilizovaná mřížka. Optické spektrum teplotně stabilizované a měřící mřížky musí být vůči sobě posunuto o minimální konstantní hodnotu, která je dána maximální možnou změnou spektra sensorového i stabilizovaného vlákna tak, aby se vzájemně nepřekrývala.

Řízení systému a kalibrace vláknových mřížek je realizováno řídicím programem v prostředí LabVIEW. Na odražená spektra z teplotně stabilizované mřížky a měřicí mřížky působí stejný vliv teplotně nestabilního optického filtru. V programu je pak z odražených spekter vypočítané reálné protažení senzoru. Spektrum z teplotně stabilizované mřížky je tedy ovlivňováno pouze nestabilitou optického filtru a lze ho od měřeného spektra měřicí mřížky odečíst. Tímto způsobem lze získat přesnou polohu spektra z měřicí mřížky. Lze tak zcela eliminovat vliv teplotní závislosti optického filtru. Odražené spektrum z měřicí mřížky je pouze posunuté o konstantní hodnotu danou spektrální vzdáleností obou mřížek. Odečtením této konstantní hodnoty od odraženého spektra měřicí mřížky je získáno spektrum, které lze brát za referenční pro výpočet změny délky.



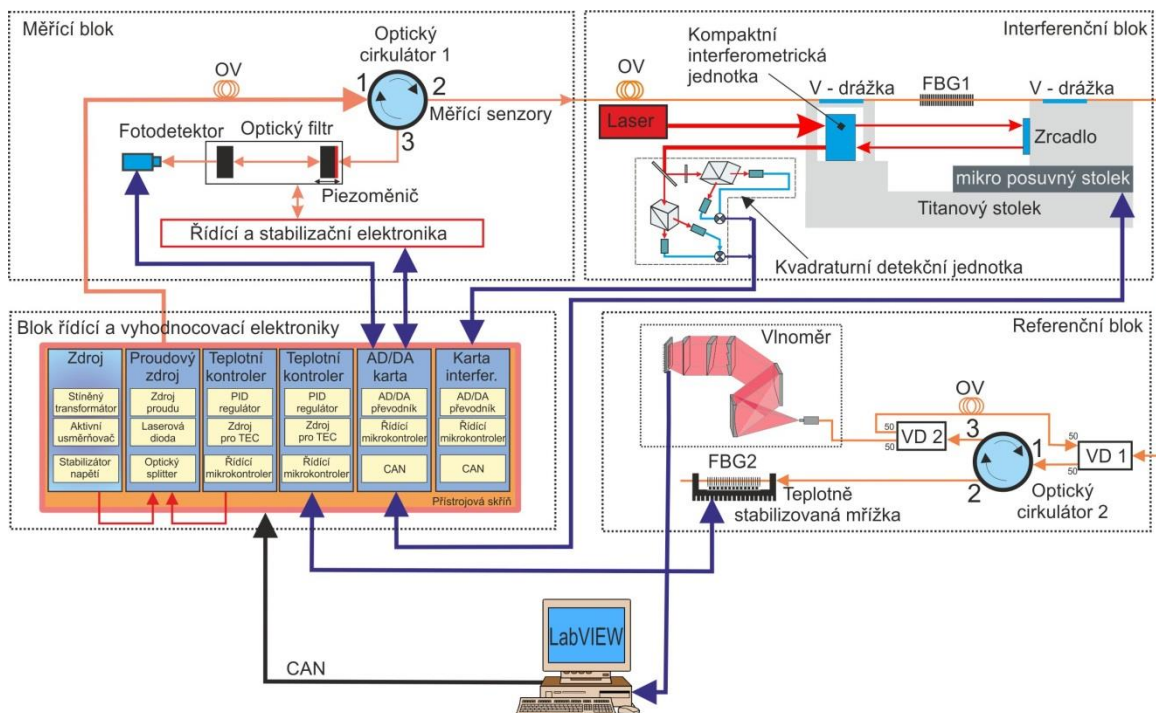
obr. 2.3 Časový graf zobrazující měření délkové změny optickým filtrem před a po kompenzaci teplotní nestability; černá křivka - teplotně stabilizovaná mřížka, modrá křivka - měřicí mřížka bez teplotní stabilizace; zelená křivka - kompenzovaná měřicí mřížka.

Při kalibraci měření je do měřicího systému nutné zapojit referenční spektrometr nebo vlnoměr. V našem případě jsme použili vlnoměr HighFinesse WSU10. Zapojení vlnoměru podle schématu na obr. 2.2 je jednou z variant, které se využívalo pro kalibraci celého systému. Optické vlákno s vláknovou Braggovou mřížkou je předepruto do poloviny maximální reprodukovatelné roztlačnosti vlákna. Změna délky vlákna je pak monitorována současně se spektrálním měřením i vlnoměrem. Přesný posun měřicí mřížky je realizován mikro-posuvným motorizovaným stolcem se zpětnou vazbou. Při pohybu motorizovaného stolku s vláknovou mřížkou se změní délka měřicí mřížky, a tím se změní vlnová délka na vlnoměru a současně se změní snímané napětí/frekvence na optickém filtru. V řídicím programu na měření Braggových mřížek je pak implementována kalibrační křivka, která slouží k přepočtu řídicího napětí na optickém filtru a vlnové délky z vlnoměru na výslednou hodnotu protažení optického senzoru.

Systém pro měření senzorů s vláknovými Braggovými mřížkami bylo potřeba rozšířit pro ověření linearitu a citlivosti senzorů. Rozšíření systému se provedlo s ohledem na měření tvarových změn kontejnmentu JE Temelín, kde se pro zvýšení přesnosti měření budou přidávat další bloky s kalibračními systémy. Měřicí systém byl tedy rozdělen do jednotlivých bloků, které na sebe navzájem navazují a lze je snadno rozšířit např. přidáním dalšího bloku s měřicími senzory, nebo bloku s teplotně kalibrační mřížkou.

2.2 Komplexní schéma

Komplexní schéma celého referenčního měřicího systému včetně všech rozšiřujících bloků, který byl sestaven a ověřen v laboratorních podmínkách je na obr. 2.4. Referenční měřicí systém se skládá ze 4 bloků, které na sebe navzájem navazují. Pro analyzování odraženého spektra světla od senzorů s Braggovými mřížkami je určen měřicí blok. Odstranění teplotní nestability filtru je řešeno v bloku referenčním. Ověření linearity a přesnosti systému a senzorů se provádí v interferenčním bloku. Měřicí systém je řízen blokem řídicí a vyhodnocovací elektroniky.



obr. 2.4 Komplexní schéma měřicího systému obsahující 4 navzájem propojené bloky. Pro měření odraženého spektra světla od Braggových mřížek je měřicí blok. Odstranění teplotní nestability je řešeno referenčním blokem. Určení přesnosti a citlivosti měření se provádí interferenčním blokem. Měřicí systém je řízen a naměřená data jsou vyhodnocovány v bloku řídicí a vyhodnocovací elektroniky.

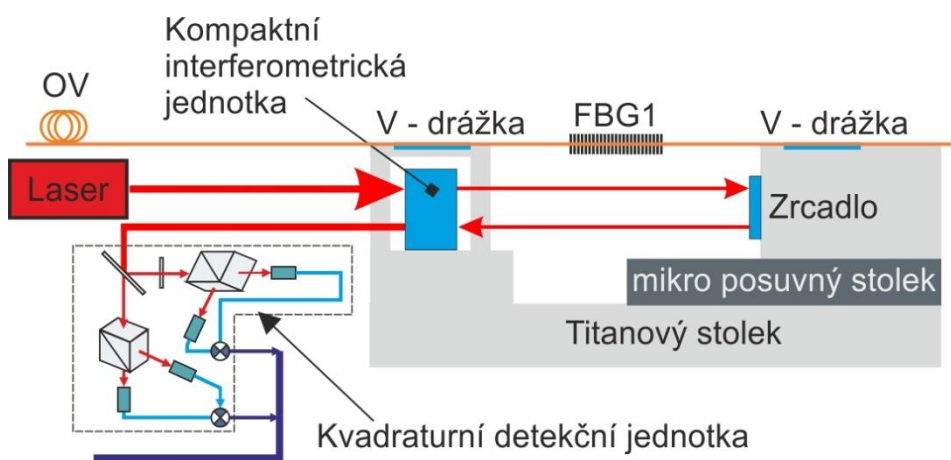
2.2.2 Kalibrace s laserovým interferometrem

Pro ověření linearity a přesnosti měření vláknových mřížek i navrhovaného měřicího systému byl navržen a realizován blok s laserovým interferometrem. Zapojení laserového interferometru do měřicího systému je na obr. 2.4. Laserový interferometr měří změnu délky měřicího ramena, které je tvořeno kalibrační lavicí s přilepenou vláknovou Braggovou mřížkou.

Konstrukce kalibrační lavice

K měření linearity a přesnosti měřicího systému byla sestavena kalibrační lavice obsahující laserový interferometr (obr. 2.5). Laserový interferometr se skládá z titanového stolku, na

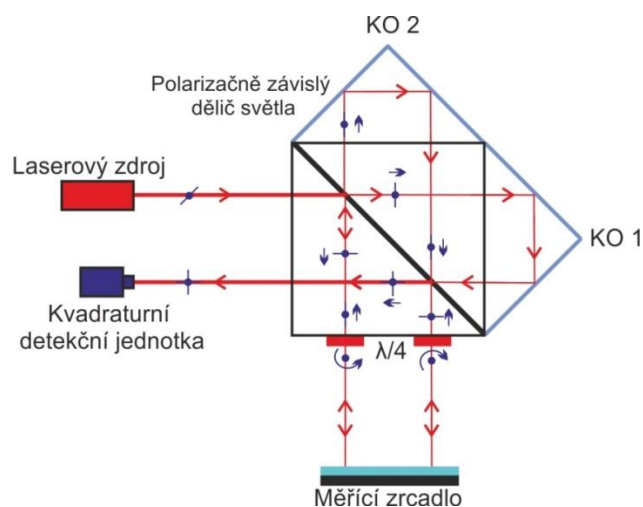
kterém se nachází pevně připojena kompaktní interferometrická jednotka, mikro – posuvný motorizovaný stolek, titanová kostka s přilepeným rovinným zrcadlem a kvadrurní detekční jednotka. Pohyblivá kostka s přilepeným rovinným zrcadlem představuje měřící rameno interferometru a je připevněna na standardním mikro-posuvném stolku s motorizovaným pohyblivým šroubem Z812B s maximálním rozsahem pohybu $l = 12 \text{ mm}$, rychlostí $v = \langle 0,05; 2,6 \rangle \text{ mm/s}$ a přesností $\Delta l = 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ [19]. Pohyb motorizovaného šroubu je řízen DC servo kontrolerem TDC001 a ovládán přes rozhraní USB z řídicího programu v LabView. Zdrojem světla pro laserový interferometr je frekvenčně stabilizovaný Helium-Neonový laser s vlnovou délkou $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ a optickým výkonem $P = 5 \text{ mW}$.



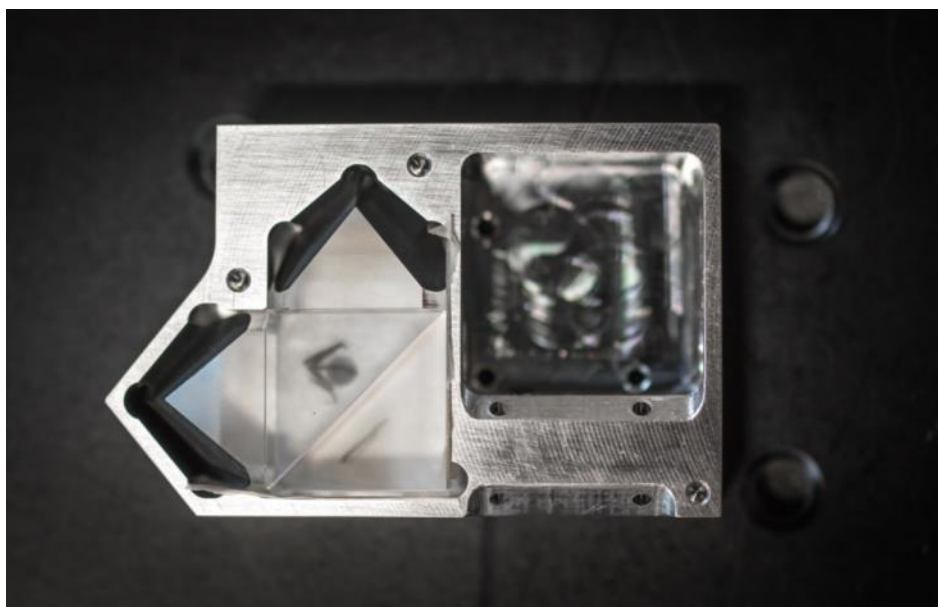
obr. 2.5 Konstrukce interferenčního bloku skládající se z titanového stolku, motorizovaného mikro-posuvného stolku, kompaktní interferometrické jednotky a kvadrurní detekční jednotky; OV – optické vlákno, FBG – vláknová Braggova mřížka.

Interferometrická jednotka

Kompaktní interferometrická jednotka je základní prvek Michelsonova laserového interferometru, který zajišťuje rozdělení vstupního paprsku na paprsek referenční a měřící (obr. 2.6). V konstrukci interferometrické jednotky se nachází referenční koutový odražeč KO1 udávající přesnou optickou dráhu pro referenční laserový paprsek. Zdrojem laserového paprsku pro interferometrickou jednotku je He-Ne laser. Paprsek světla z He - Ne laseru dopadá na polarizačně závislý dělič světla, kde se dle polarizace rozdělí na dva paprsky s navzájem kolmou polarizací. Paprsek procházející děličem světla se odrazí na referenčním koutovém odražeči KO 1 a pokračuje do kvadrurní detekční jednotky. Paprsek světla, který se odrazil od polarizačně závislého dělice světla, prochází čtvrt vlnovou fázovou destičkou na rovinné měřící zrcadlo, od kterého se odrazí a prochází zpět přes stejnou fázovou destičku na polarizačně závislý dělič světla. Paprsek prochází polarizačním děličem světla bez změny směru a odrazí se od koutového odražeče KO 2. Paprsek po přímém průchodu polarizačním děličem světla prochází čtvrt vlnovou fázovou destičkou na rovinné měřící zrcadlo. Po odrazu prochází opět čtvrt vlnovou fázovou destičkou na polarizačně závislý dělič světla, na kterém se odrazí a společně s referenčním paprskem pokračuje do kvadrurní detekční jednotky, kde se vyhodnotí.



obr. 2.6 Princip kompaktní interferometrické jednotky; KO 1 - referenční koutový odražeč, KO - měřící koutový odražeč.

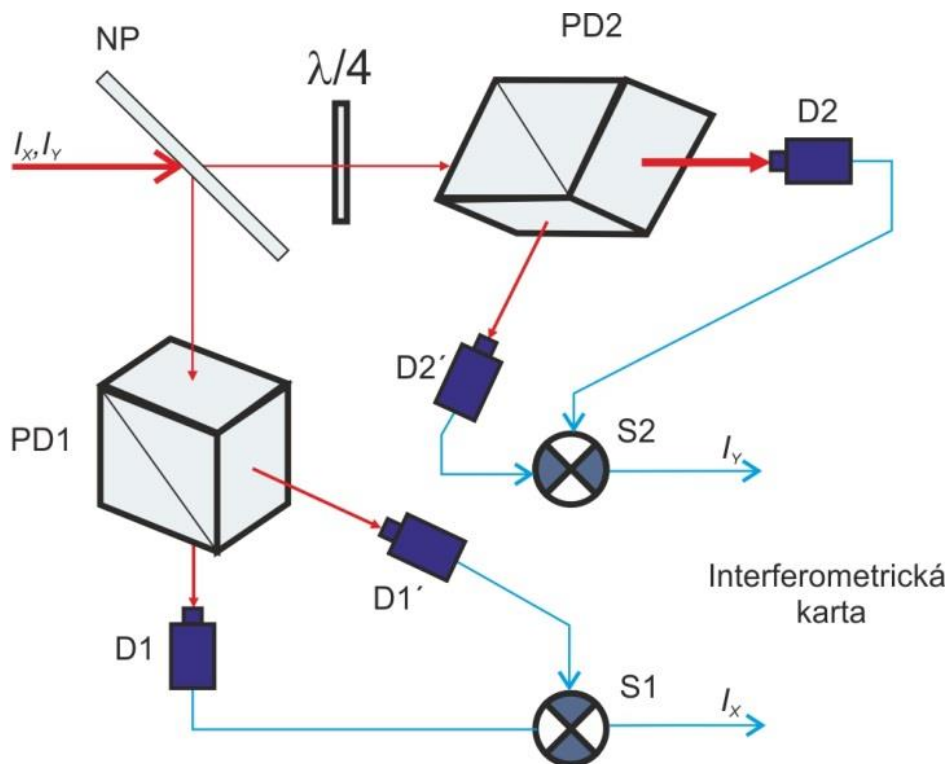


obr. 2.7 Fotografie kompaktní interferometrické jednotky.

Detekční jednotka

Kvadrurní detekční jednotka má za úkol detekovat paprsky světla z kompaktní interferometrické jednotky a určit posun a směr pohybu ramene interferometru (obr. 2.8). Paprsky světla na vstupu kvadrurní detekční jednotky mají na sebe navzájem kolmou polarizaci. Paprsky se rozdělí na nepolarizujícím děliči světla na dvě stejné dvojice paprsků. První z nich je směřován do polarizujícího děliče PD1, jehož natočením o 45° dojde k pootočení polarizace obou svazků a jejich vzájemné interferenci. Intenzita interference je detekována detektory D1 a D1'. Pro určení směru pohybu interferenčního ramene prochází druhý svazek paprsků zpořádací destičkou RP, kde je svazek s jednou

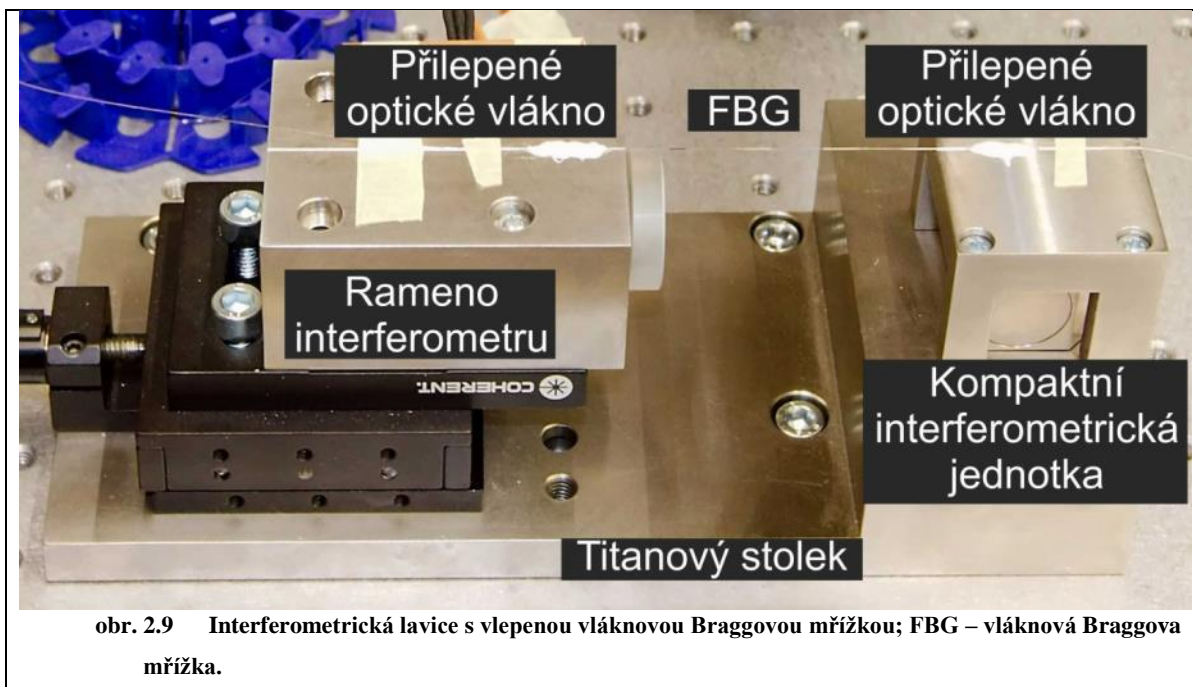
polarizací zpožděn o $\pi/2$. Po dopadu na polarizační dělič světla dochází k pootočení polarizací svazků a k jejich následné interferenci mezi sebou. Intenzita výsledné interference paprsků je detekována na detektorech D2 a D2'. V sumátorech S1 a S2, kde jsou signály z detektorů od sebe odečteny, získáme signál s intenzitou světla I_x a I_y . Zdvojení detektorů D1 a D2 má za následek zvýšení rozlišení detekční jednotky. Při dalším elektronickém zpracování v interferenční kartě lze dosáhnout rozlišení až $\lambda/1024$.



obr. 2.8 Princip kvadraturní detekční jednotky; NP – nepolarizující dělič světla, PD1 a PD2 – polarizující děliče světla; D1, D1' a D2, D2' – detektory, S1 a S2 – sumátory.

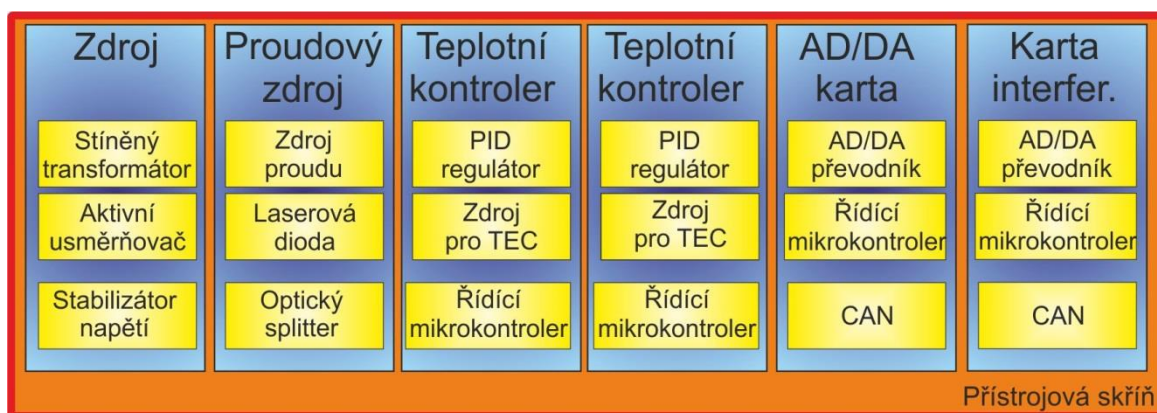
Přípevnění optického vlákna do měřicí sestavy

Aby bylo možné měřit přesnost protažení vláknové Braggovy mřížky, bylo nutné připevnit optické vlákno s Braggovou mřížkou na konstrukci interferometru. V místě připevnění optického vlákna na konstrukci interferometru se musela odstranit primární ochrana vlákna z důvodu zamezení potenciálního pohybu mezi optickým vláknem a primární ochranou vlákna. Pro zamezení nechtěného poškození optického vlákna byla zvolena chemická metoda odstranění primární ochrany s využitím chloroformu. Vlákno s odstraněnou primární ochranou se vložilo na jedné straně do V drážky na kompaktní interferometrické jednotce a druhou stranou do V drážky na titanové kostce držící zrcadlo představující měřící rameno interferometru (obr. 2.9). Vlákno se do V drážek umístilo tak, aby vláknová Braggova mřížka byla vycentrovaná mezi kostkou se zrcadlem a kompaktní interferometrickou jednotkou a poté se bodově přilepilo dvousložkovým epoxidovým lepidlem.



2.2.3 Blok řídicí a vyhodnocovací elektroniky

Pro řízení systému byly použity moduly vyvinuté v KO ÚPT AVČR. Zásuvné moduly jsou umístěné ve standardním 19” racku, který je připojen k počítači sběrnicí CAN (Control Area Network). Využívané moduly jsou teplotní kontroler, interferometrická karta a AD/DA karta (obr. 2.10).

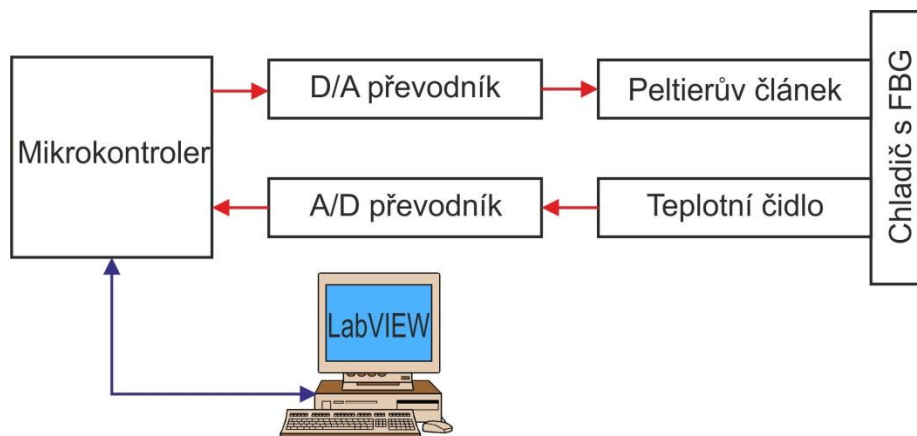


obr. 2.10 Blok řídicí a vyhodnocovací elektroniky s moduly teplotního kontroleru, interferenční karty, AD/DA karty a proudového zdroje pro laserovou diodu.

Teplotní kontroler

Teplota je snímána senzorem AD22100, který se skládá z termistoru a lineárního členu. Změna teploty v celém měřicím rozsahu teplot $\Delta T = \langle -50; 150 \rangle$ °C se projeví změnou výstupního napětí senzoru $\Delta U = \langle 0,25; 4,75 \rangle$ V. Teplotní kontroler obsahuje AD a DA převodníky s vysokým rozlišením v uzavřené regulační smyčce a řídicí mikrokontroler. V mikrokontroleru se nachází algoritmy pro digitální zpracování signálů – adaptivní filtrování a samoučící režim. Regulační smyčka teplotního kontroleru na začátku měření změní teplotu senzoru – převede analogovou hodnotu napětí AD převodníkem na číselnou hodnotu do vstupu mikrokontroleru. Kde se dle PID algoritmu vypočítá hodnota proudu pro Peltierův článek. Současně s během regulační smyčky mikrokontroler zajišťuje

komunikaci s počítačem po sběrnici CAN [15]. Blokové schéma teplotního kontroleru je na obr. 2.11 a fotografie je na obr. 2.12.



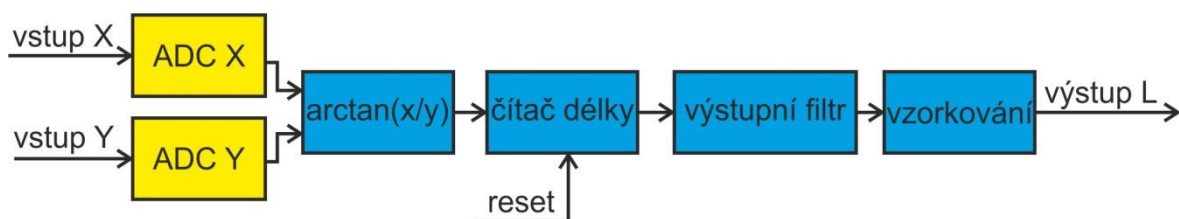
obr. 2.11 Blokové schéma teplotního kontroleru.



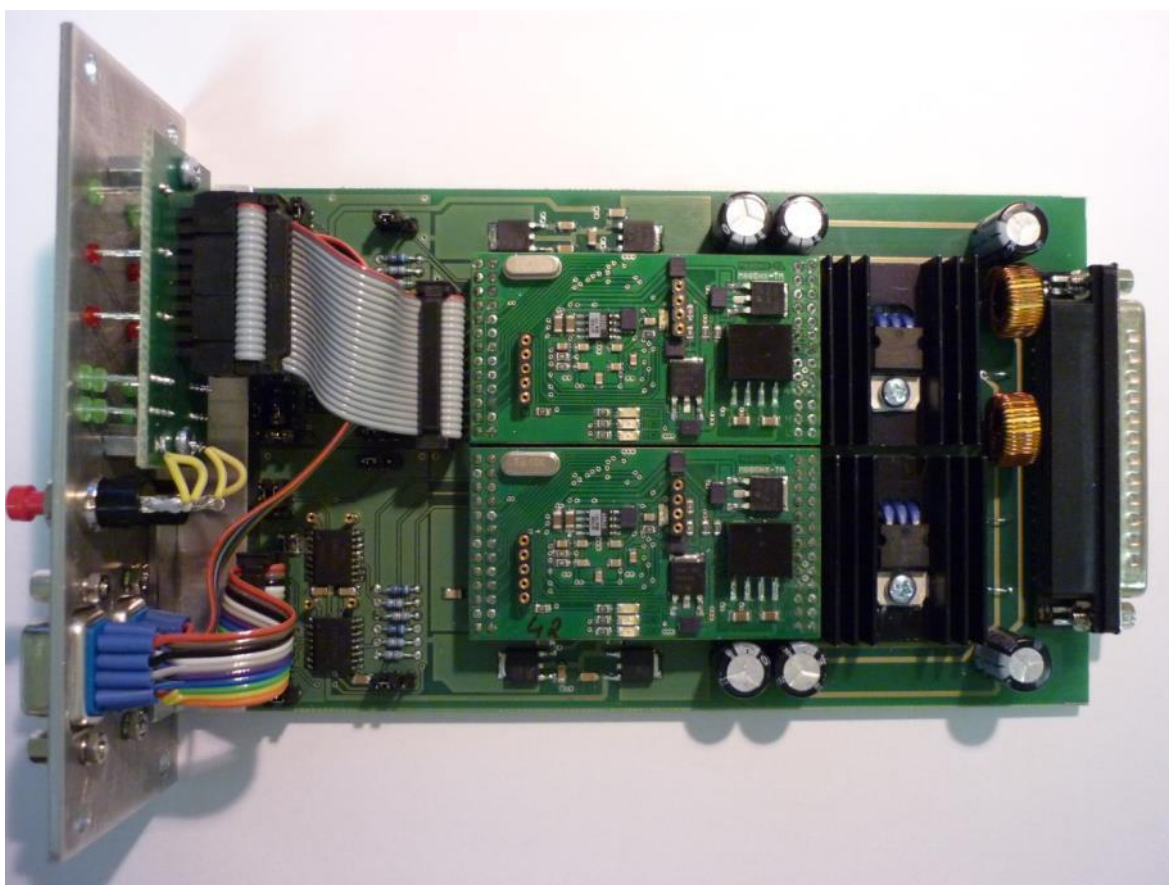
obr. 2.12 Teplotní kontroler.

Interferometrická karta

Zpracování signálu z kvadrurní detekční jednotky probíhá v interferenční kartě. Blokové schéma interferometrické karty a její fotografii lze vidět na obr. 2.13 a obr. 2.14. Interferometrická karta se používá k demodulaci signálů I_x , I_y z detekční jednotky interferometru. Je založena na digitálním kontroleru DSP56F805. Maximální vzorkovací rychlost ADC je 500kS/s. Digitální detekce signálů I_x , I_y pracuje s 10bit rozlišením. Po převodu signálu analogově-digitálním převodníkem dochází k určení polohy a směru interferometru funkcí $\arctan(I_y / I_x)$ a následně je vypočtena změna délky. K odstranění chybného signálu způsobeného např. rychlým pohybem interferometru, nebo slabým signálem je na výstupu zařazen filtr, který tyto signály označí za chybné [19].



obr. 2.13 Blokové schéma interferometrické karty [19].



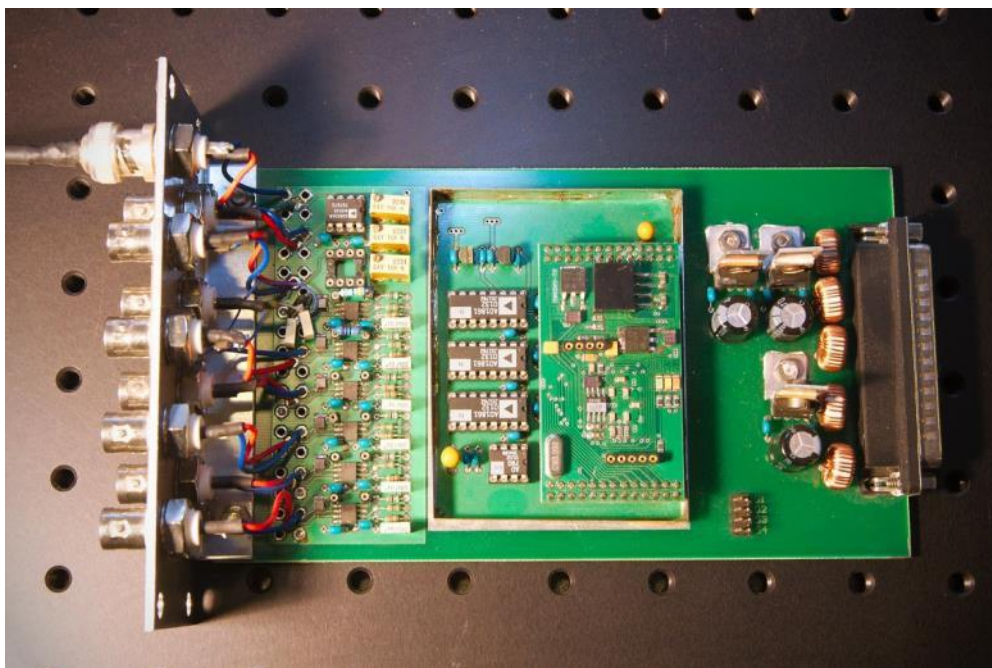
obr. 2.14 Fotografie interferometrické karty

AD/DA karta

Měřicí systém je řízen z připojeného počítače přes AD/DA kartu od firmy National Instruments (obr. 2.15). AD/DA karta je připojena do počítače přes rozhraní USB a je řízena programem vytvořeným v LabVIEW. Max. vzorkovací rychlost AD/DA karty je 1,25 MS/s. AD/DA karta má 16 analogových vstupů s 16 bit. rozlišením a 2 analogové výstupy s 16bit. rozlišením. Dále má 24 digitálních vstupů/výstupů s max. frekvencí 1 MHz [20]. Pro část měření byla použita modulová AD/DA karta od ÚPT AVČR. Rozlišení digitálně analogového převodu je 16 bitů s AD1861 od Analog Devices. Rozlišení analogově digitálního převodu je 16 bitů se sigma delta převodníkem AD7715 od Analog Devices. Fotografie modulární AD/DA karty je na obr. 2.16.



obr. 2.15 AD/DA karta od National Instruments s maximální vzorkovací rychlostí 1,25 MS/s s 16 analogovými vstupy, 2 analogovými výstupy a 24 digitálními vstupy/výstupy s max. frekvencí 1 MHz.



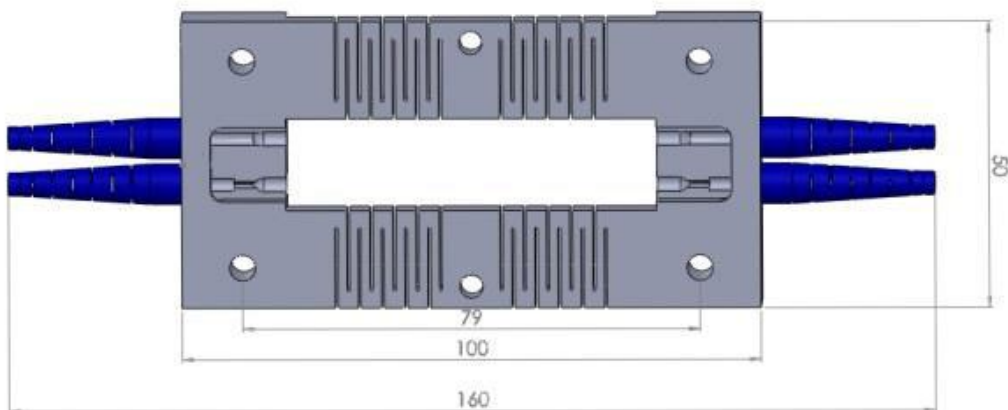
obr. 2.16 Modulární AD/DA karta používaná v ÚPT AVČR.

2.3 Konstrukce senzoru

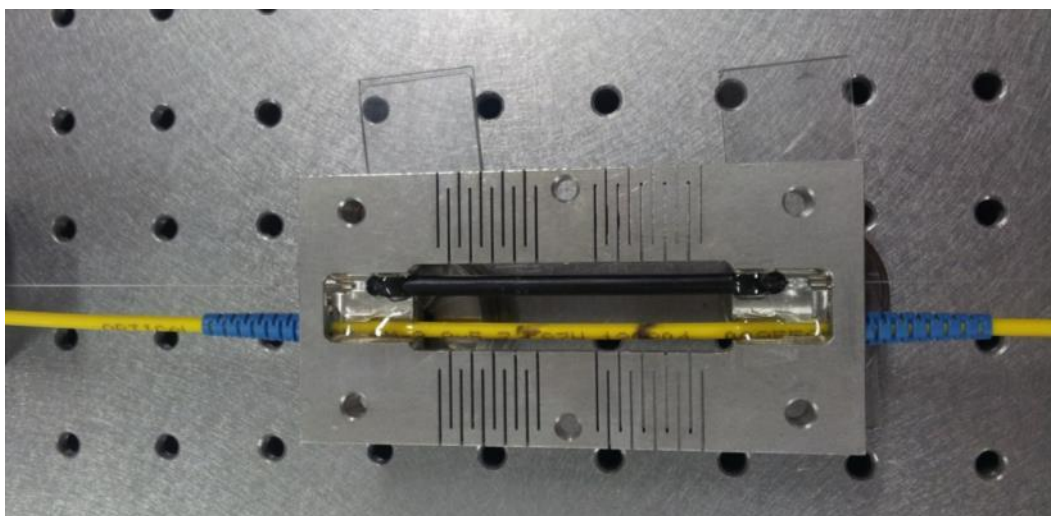
Současně s návrhem měřícího systému jsme začali i s návrhem konstrukce senzoru (obr. 2.17). V průběhu řešení práce bylo navrženo a vyrobeno několik generací senzorů, které se testovaly v měřícím systému v laboratoři i na testovacích betonových blocích.

První testovací generace senzoru byla navržena s ohledem na experimentální měření nosníku v ÚJV Řež. Na této konstrukci senzoru se ověřovaly teoretické předpoklady měřícího systému s vláknovými Braggovými mřížkami. Senzor je vyroben z hliníku 60/61 a jsou v něm 2 vláknové mřížky (obr. 2.17). Jedna vláknová Braggova mřížka je pevně zafixovaná ke konstrukci senzoru v ose montážních otvorů pro kotvící šrouby a používá se k měření délkové roztažnosti. Druhá vláknová Braggova mřížka je volně vložena v konstrukci senzoru a slouží ke kompenzaci teploty. K připevnění na objekt

se používají montážní otvory, které jsou umístěny na krajích senzoru. Vyrobený senzor s vláknovými Braggovými mřížkami je na obr. 2.18. V černé trubičkové ochraně je umístěna vláknová Braggova mřížka k měření změn délky. Ve žluté trubičkové ochraně se nachází kompenzační vláknová Braggova mřížka sloužící ke kompenzaci teploty. Měřicí i kompenzační vláknová mřížka jsou umístěny ve středu senzoru. K ochraně senzoru se používá pouzdro, které zamezuje vniknutí vody do konstrukce senzoru. Vláknový senzor může nabývat jen omezené velikosti dané výrobními a materiálovými možnostmi. Právě z důvodu omezené variability velikosti senzoru a nutnosti používat speciální ochranné pouzdro se vyvinula 2. generace senzoru, která tyto potřeby splňuje.



obr. 2.17 Návrh konstrukce 1. generace senzoru s meandry umožňující změnu délky senzoru. V osách měřícího senzoru se nacházejí montážní otvory. Ve středu konstrukce se nacházejí otvory pro uchycení krytu senzoru.



obr. 2.18 Fotografie 1. generace senzoru s vloženými vláknovými Braggovými mřížkami. V černé trubičkové ochraně se nachází vláknová mřížka pro měření změn délky. V žluté trubičkové ochraně je vláknová mřížka pro kompenzaci teploty.

Druhá generace senzoru (obr. 2.19 a obr. 2.20) se skládá z 2 stojek, ve kterých jsou upevněny části držící pevně zafixované měřící vlákno s Braggovou mřížkou. Vlákno je k fixní části senzoru přilepeno dvousložkovým epoxidovým lepidlem. Ochrana druhého nenapnutého vlákna s Braggovou mřížkou je upevněna v konstrukci stojky, a má funkci teplotně kompenzační. Optické vlákno s Braggovou mřížkou je chráněno 2 trubkami

rozdílného průměru, které se do sebe zasouvají. Mezi trubkami jsou O-kroužky, které vymezují vzdálenost mezi nimi a slouží k zamezení vniku vody do senzoru. Druhé konce trubek jsou pevně spojeny s dalšími částmi senzoru. Konstrukce senzoru se k měřenému objektu připevní ocelovými kotvícími šrouby. Délka senzoru se dá jednoduše změnit výměnou jedné z trubek za jinou s potřebnou délkou.



obr. 2.19 Model 2. generace senzoru s Braggovými mřížkami.



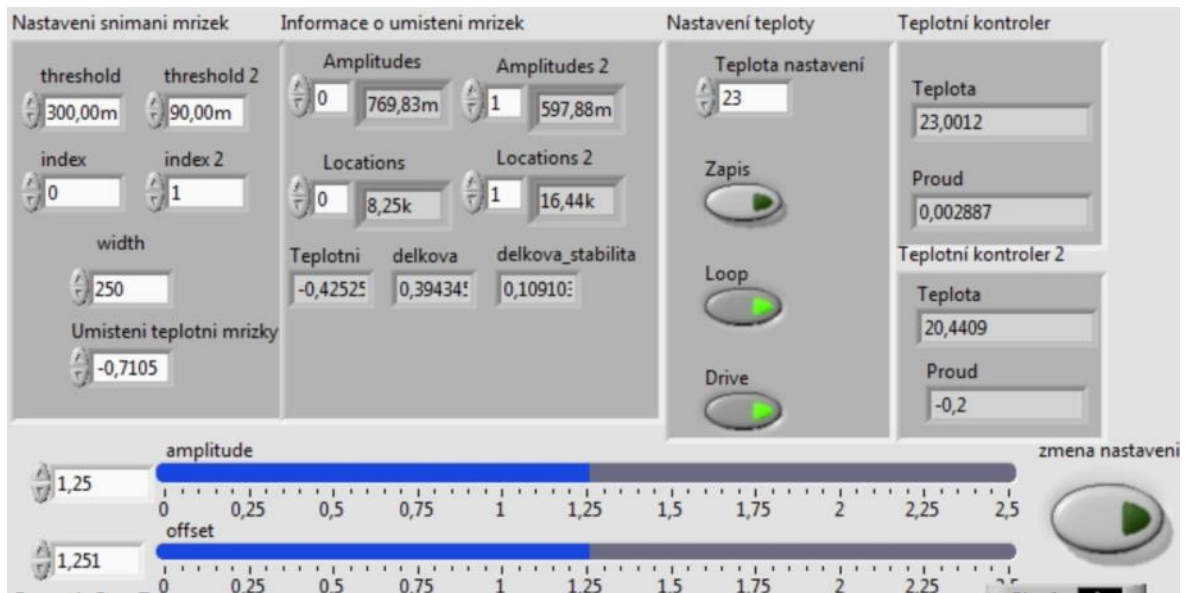
obr. 2.20 Fotografie 2. generace senzoru.

2.4 Řídicí program

Pro ovládání celého referenčního měřicího systému bylo nutné naprogramovat řídicí systém. Řídicí program pro měření s Braggovými mřížkami byl naprogramován v softwaru pro grafický návrh systémů LabView. Při programování byly využity některé z univerzálních bloků pro řízení přes rozhraní CAN a to: teplotní kontroler, interferenční karta, AD/DA karta. Tyto bloky ve spojení s vlastním programem tvoří ucelený řídicí systém. Řídicí program přes AD/DA kartu detekuje signál z fotodetektoru, ovládá optický filtr, dále přes rozhraní CAN [20] řídí teplotní kontroler, interferometrickou kartu a přes rozhraní USB řídí motorizovaný mikro-posuvný stolek.

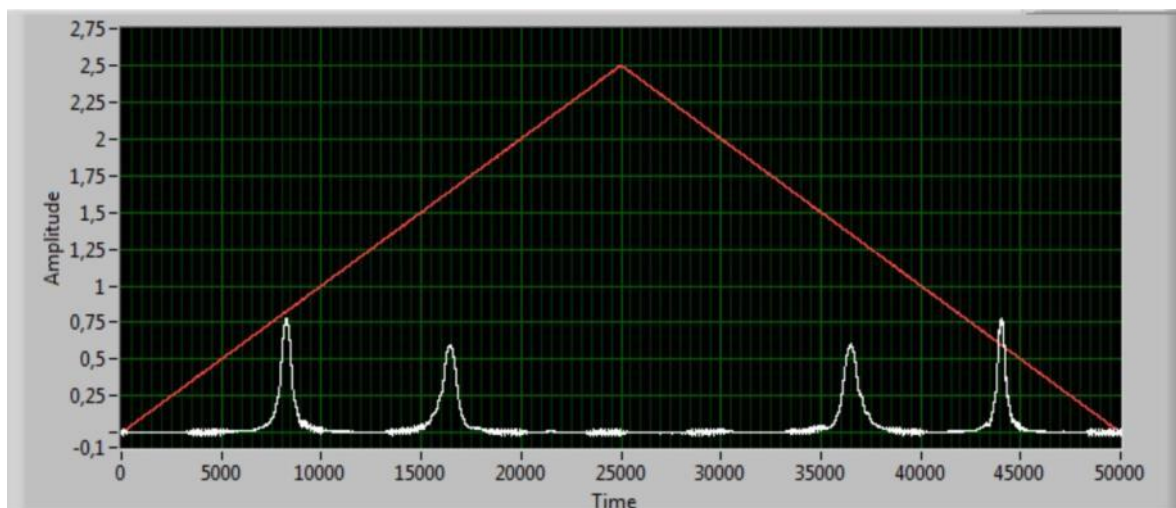
Program po spuštění detekuje zapojené periférie a načte jejich počáteční nastavení proměnných. Počáteční nastavení proměnných se provádí u modulačního napětí pro optický filtr, nastavení teploty pro teplotní kontroler a načtení hodnot pro motorizovaný

mikro-posuvný stolek. Program posílá data do AD/DA karty a generuje trojúhelníkové modulační napětí v maximálním rozsahu $U = \langle 0; 5 \rangle$ V, u kterého lze měnit jeho amplitudu, ofset a periodu v závislosti na požadavcích na rozmítání optického filtru (obr. 2.21).



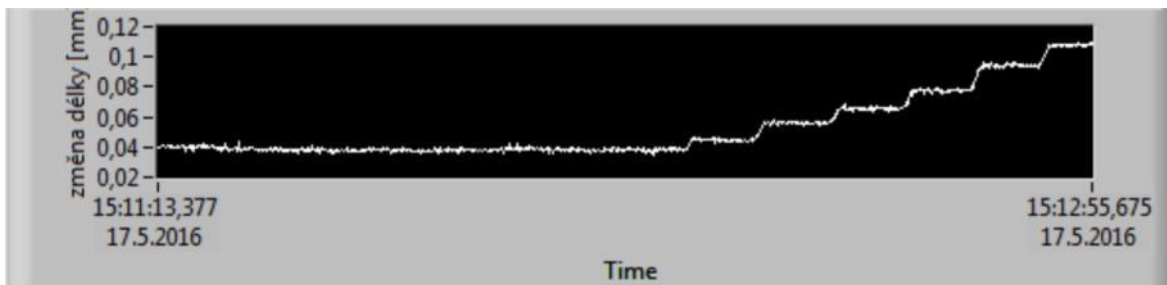
obr. 2.21 Část ovládacího panelu pro nastavení optického filtru a teplotního kontroleru.

Signál z fotodetektoru, který je snímán přes AD/DA kartu, obsahuje spektrum odražené od Braggovy měřicí i referenční mřížky a je přiveden na funkci detekování maxima „*peak detect*“ [20]. Ve funkci „*peak detect*“ lze nastavit parametry, min. hodnota a šířku signálu, od které funkce detekuje maximum. Na této funkci se určí a uloží hodnoty poloh těchto maxim do indexového pole (obr. 2.22). Společně s hodnoty maxim spekter mřížek se uloží na stejnou pozici indexového pole i hodnota náběžné hrany modulačního napětí, ve kterém bylo identifikováno maximum signálu.



obr. 2.22 Detekování maxima signálu napětí odražených od Braggových mřížek – bílá křivka, modulační napětí generované pro optický filtr – červená křivka.

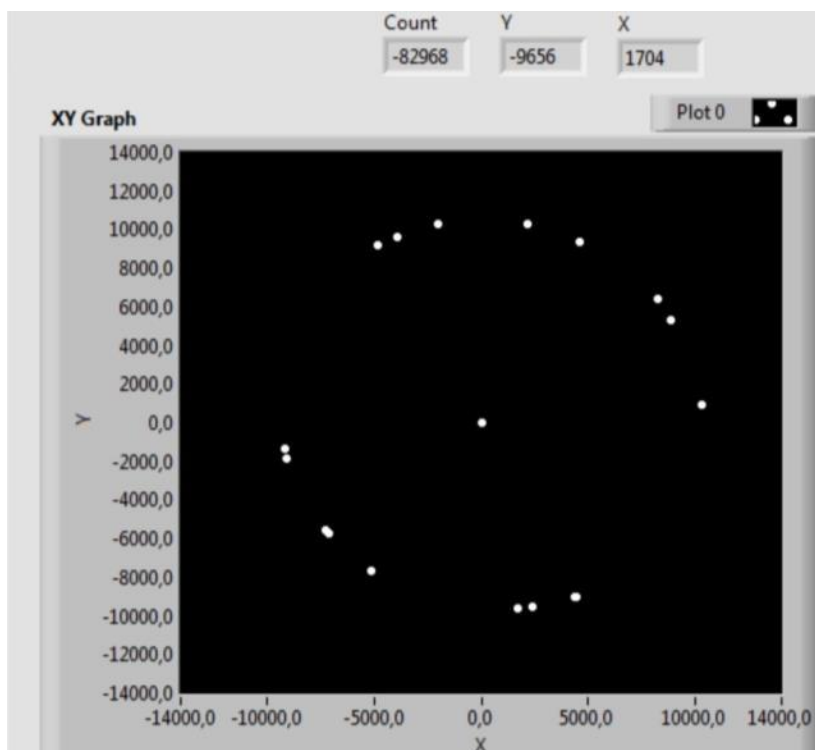
Hodnota modulačního napětí pak odpovídá detekované vlnové délce v závislosti na ofsetu a rozsahu trojúhelníkového signálu. Hodnoty napětí z měření jsou pak zobrazovány na časové grafy (obr. 2.23), kde lze v reálném čase sledovat změny délky senzoru.



obr. 2.23 Jeden z časových grafů zobrazující změny délky senzoru v reálném čase na předním panelu řídicího programu.

Pro odstranění teplotní nestability optického filtru, se detekované signály maxim měřicí a kompenzační mřížky, převedené na hodnoty modulovaného napětí, od sebe odečítají. Odečtením signálu z mřížek od sebe se odstraní teplotní nestabilita, která má vliv na oba signály, měřené optickým filtrem.

Interferometrická karta a teplotní kontroler je zapojen do měřicí sestavy přes rozhraní CAN a komunikuje s počítačem přes CAN-USB adapter [22]. Do řídicího programu jsou data z interferometrické karty a teplotního kontroleru přivedena prostřednictvím komunikačního protokolu CANOpen [23]. Program vybere z interferometrické karty jen signály potřebné k určení změny vzdálenosti měřicího ramene interferometru, převede je do příslušného formátu a zobrazí tyto hodnoty na přední panel programu (obr. 2.24). Pro řízení teploty kompenzační mřížky se provede zápis s konkrétní teplotou do příkazového pole na předním panelu (obr. 2.21), poté převede hodnota teploty do příslušného formátu a zapíše se do komunikačního protokolu CANOpen. Čtení hodnot z teplotního kontroleru je pak stejné jako u interferometrické karty.



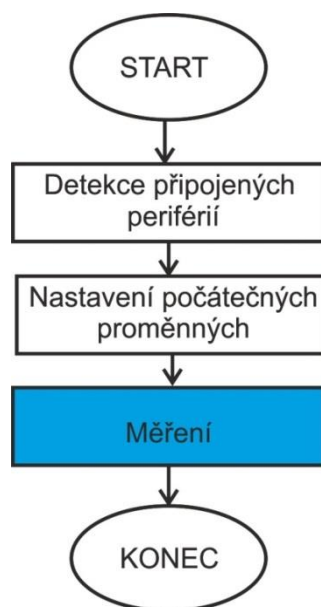
obr. 2.24 Grafický výstup z interferenční karty v podobě rotujícího fázoru.

Motorizovaný mikro-posuvný stolek je připojen do měřicího systému přes rozhraní USB a komunikuje s řídicím programem přes zásuvný modul dodávaný výrobcem (obr. 2.25). Přes tento zásuvný modul je pak v programu řízen posun stolku.

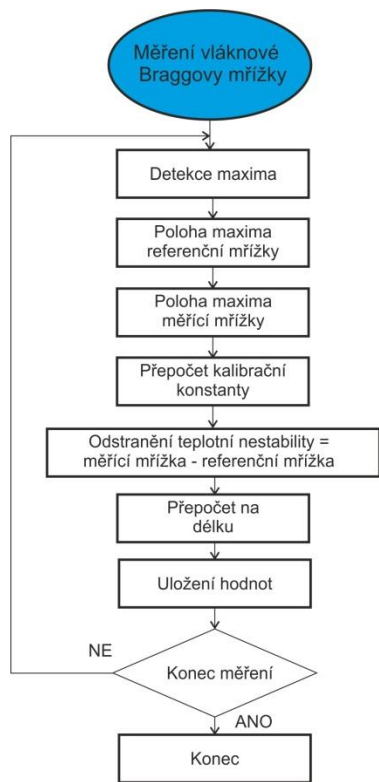


obr. 2.25 Ovládací panel pro řízení mikro-posuvného stolku.

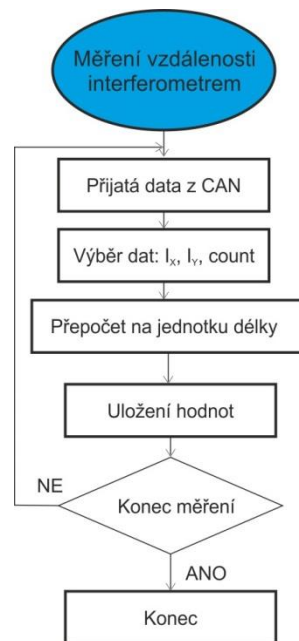
Ukládání dat z měření probíhá prostřednictvím komunikačního protokolu CANOpen, do kterého se zapisují data převedená do příslušného formátu. Následně jsou uložená data převedená z .bin souboru na .m soubory programu Matlab, ve kterém dochází k vyhodnocení měření. Vývojové diagramy řídicího programu jsou na obr. 2.26 a obr. 2.27. Ukázka části řídicího programu je na obr. 2.28 a přední ovládací panel tohoto programu je na obr. 2.29.



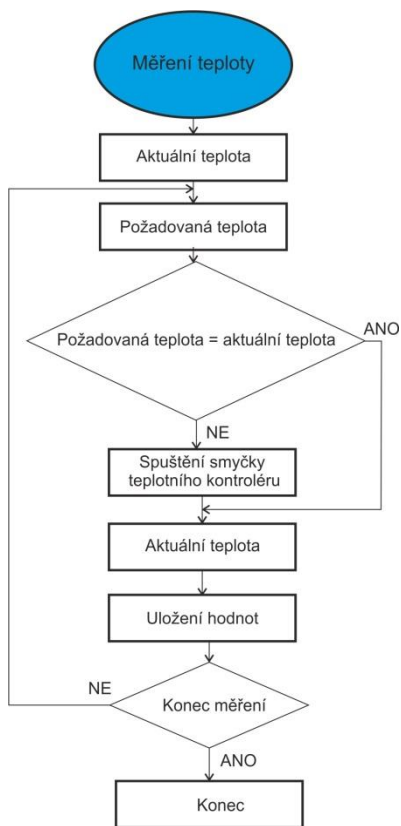
obr. 2.26 Vývojový diagram řídicího programu – část 1.



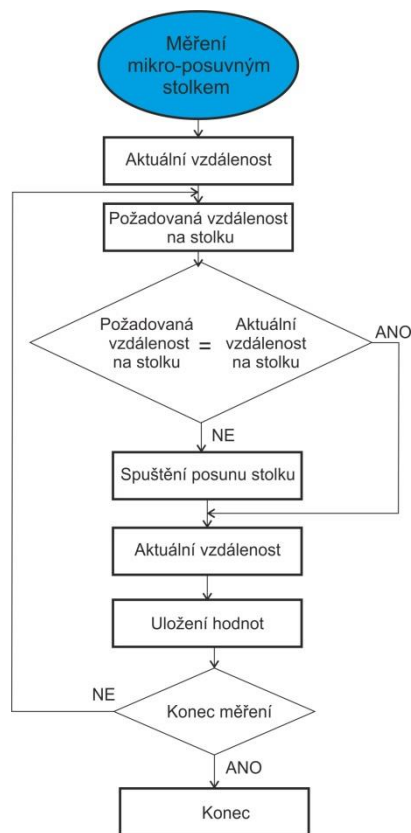
a)



b)

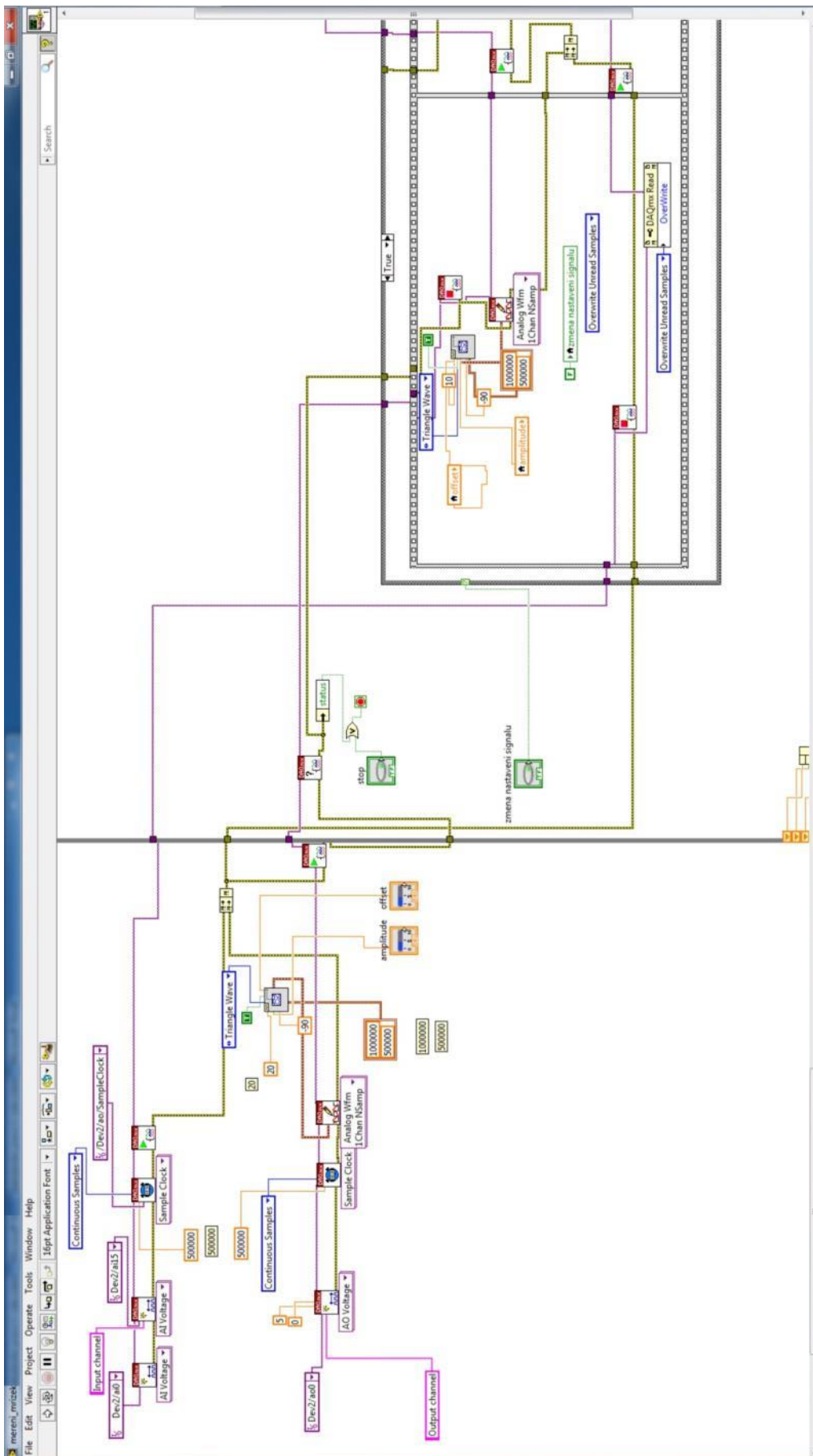


c)

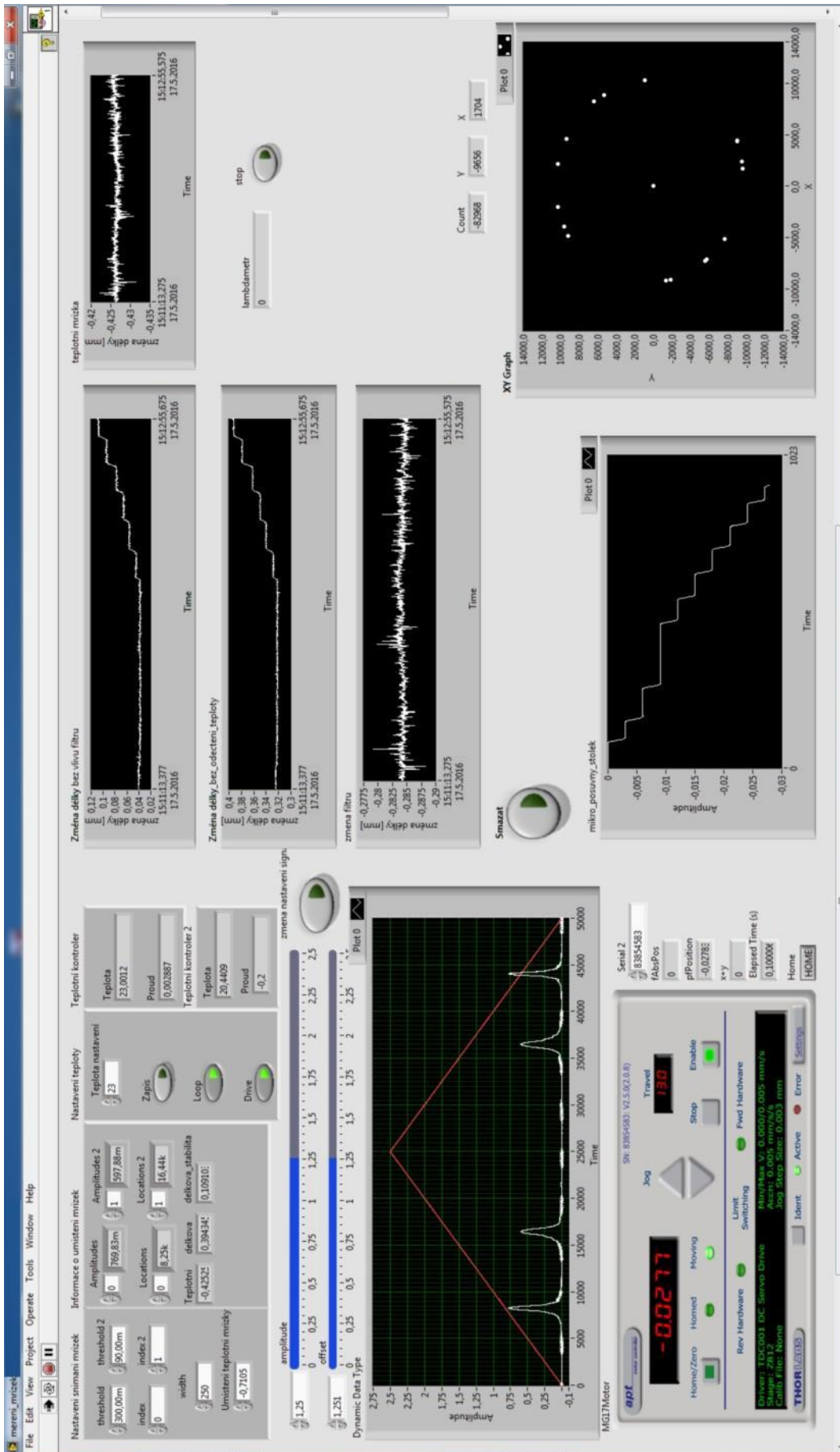


d)

obr. 2.27 Vývojové diagramy řídicího programu – část 2; a) vývojový diagram měření vláknové Braggovy mřížky, b) vývojový diagram měření interferometru, c) vývojový diagram měření teploty, d) vývojový diagram měření mikro-posuvného stolem.



obr. 2.28 Ukázka části programu vytvořeného v LabView.



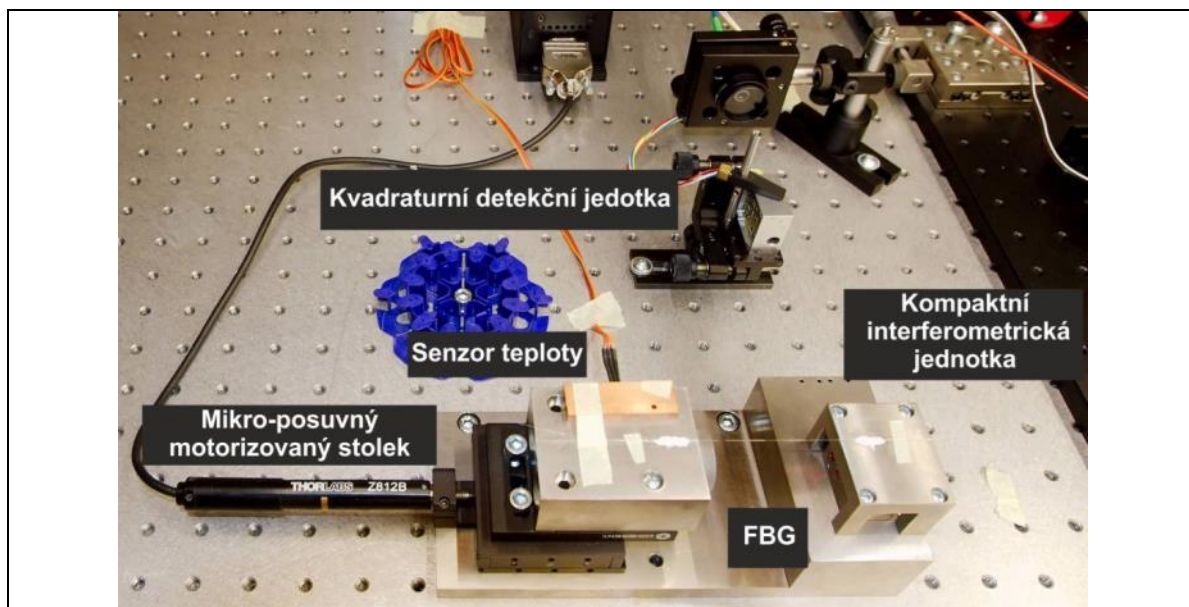
obr. 2.29 Přední ovládací panel řídicího programu v LabView.

3 Měření

3.1 Měření stability optického filtru

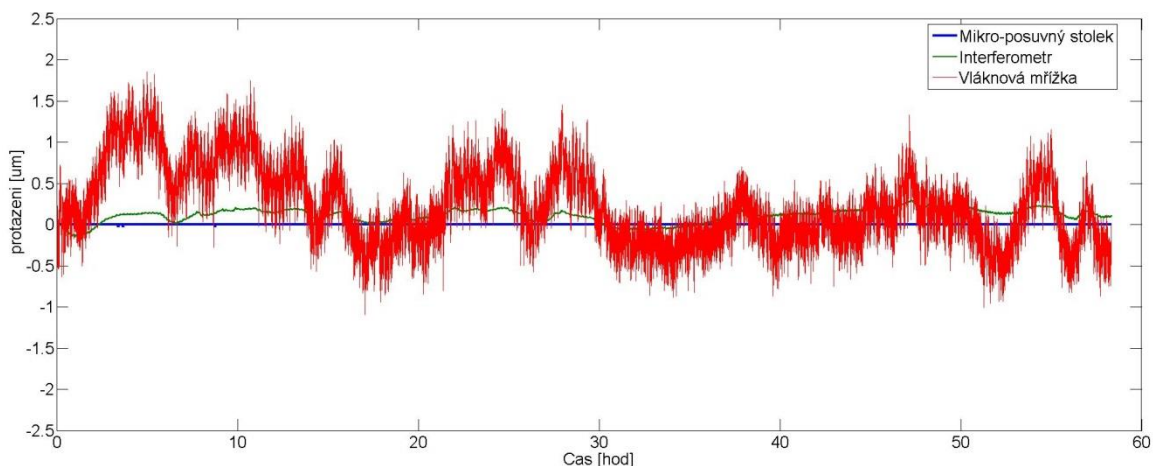
Pro ověření odstranění nelinearity systému, způsobené především teplotní nestabilitou optického filtru, bylo provedeno měření stability měřicího systému. Pro měření linearitu systému byla sestavena měřicí aparatura podle schématu na (obr. 2.4), fotografie interferenčního bloku je na obr. 3.1. Světlo z SLED diody je optickým vláknem přivedeno přes optický cirkulátor do měřicí mřížky, kde se část spektra světla odrazí na vláknové mřížce. Odražené světlo prochází přes optický cirkulátor do optického filtru a detektoru kde je zaznamenána jeho vlnová délka. Zároveň s měřicí mřížkou zaznamenává změnu délky i laserový interferometr. Paprsek z He-Ne laseru je navázán do optického vlákna optickým kolimátorem a přiveden k interferometru, kde je opět paprsek světla z optického vlákna kolimátorem vyvázán. Zaostřený paprsek světla dopadá do kompaktní interferometrické jednotky, ze které je nasměrován jeden paprsek na měřící zrcadlo. Měřící zrcadlo je umístěno na titanové kostce interferometru, na níž se nachází přilepený jeden konec optického vlákna s Braggovou mřížkou. Paprsek se od měřicího zrcadla odrazí a přes kompaktní interferometrickou jednotku míří do kvadrurní detekční jednotky, kde je paprsek světla zpracován a vyhodnocen v interferenční kartě. Počítač poté vyhodnocuje v řídicím programu data z interferenční karty a přepočítává je na změnu vzdálenosti.

Změna vzdálenosti interferometrického ramene a tím i protažení měřicí mřížky se provádí mikro-posuvným motorizovaným stolcem se zpětnou vazbou. Mikro-posuvný stolek je řízen přes USB rozhraní z řídicího programu.



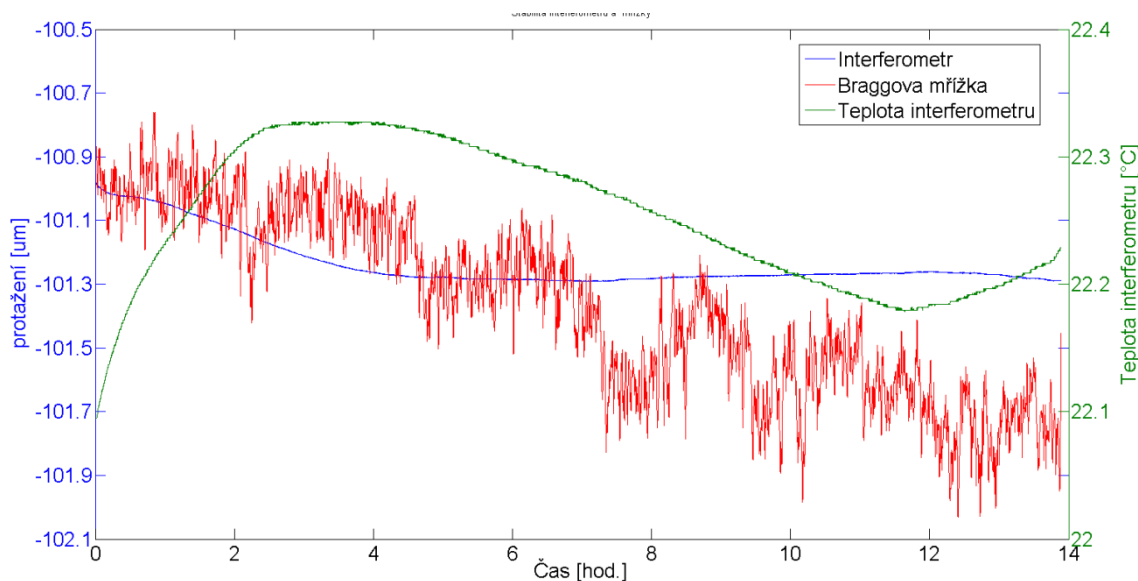
obr. 3.1 Interferenční blok skládající se z kompaktní interferometrické jednotky, kvadrurní detekční jednotky, mikroposuvného stolku a přilepené vláknové Braggovy mřížky – FBG.

Záznam z 60 hodinového měření stability optického filtru a měřicího systému je na obr (obr. 3.2). Směrodatná odchylka záznamu měření je $\sigma = 0,438 \mu\text{m}$. Záznam z měření stability byl ovlivněn vnějšími vlivy, které do měření vnášejí nepřesnosti. Mezi největší vnější vlivy v laboratoři lze zahrnout teplotní fluktuace vzduchu způsobené klimatizací a ohřev vzduchu způsobený zapnutým topením v laboratoři.



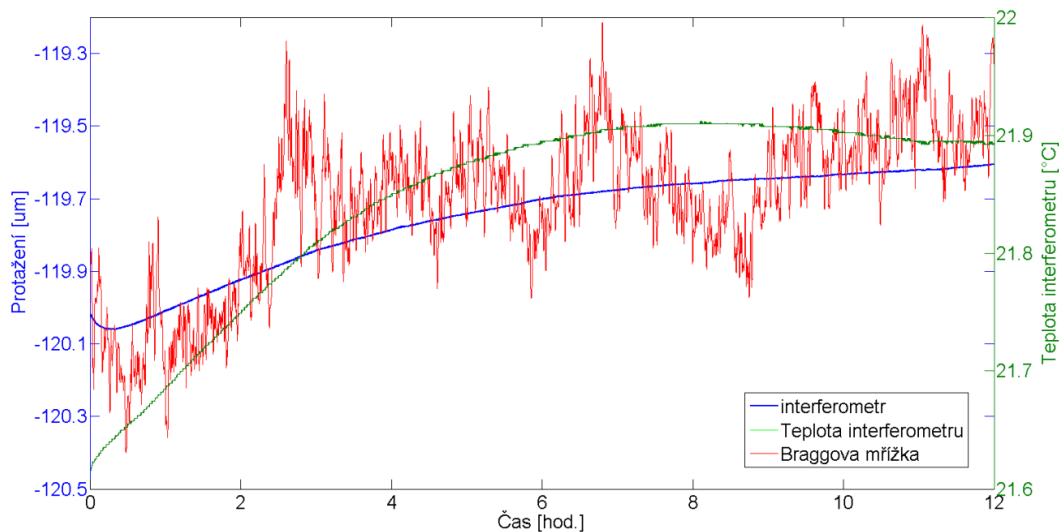
obr. 3.2 Záznam z 60 hodinového měření stability optického filtru; modrá křivka jsou data ze stabilní polohy mikro-posuvného stolku, zelená křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřící vláknové Braggovy mřížky.

Pro ověření vlivu klimatizace a topení v laboratoři byl do měřícího systému zapojen teplotní snímač, který měřil teplotu na titanové konstrukci interferometru. Po vypnutí klimatizace v laboratoři přestal vzduch fluktuovat a na záznamu můžeme vidět relativně prudký nárůst teploty vzduchu způsobený zapnutým topením, který již nebyl kompenzován klimatizací. Po 2 hodinovém ohřevu je zde zaznamenána max. teplota 22,35 °C a centrální vypnutí topení v laboratoři. Poté teplota klesá a další nárůst je zaznamenán při ranním centrálním zapínání topení. Záznam z měření stability optického filtru a systému měření se směrodatnou odchylkou $\sigma = 0,280 \mu\text{m}$ je na obr. 3.3.



obr. 3.3 Záznam z měření stability optického filtru bez klimatizace v laboratoři; zelená křivka jsou data z teplotního senzoru umístěné na interferometru, modrá křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřící vláknové Braggovy mřížky.

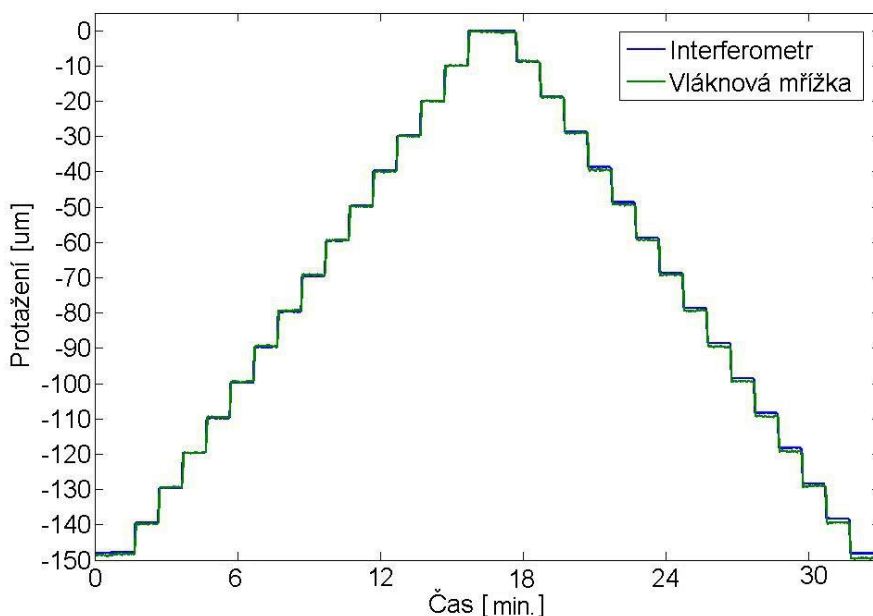
Při dalším měření se v laboratoři vypnula klimatizace i topení, tím přestal vzduch v laboratoři fluktuovat a začal se pomalu ohřívat, to je zaznamenáno na obr. 3.4. Směrodatná odchylka vláknové Braggovy mřížky od interferometru je $\sigma = 0,217 \mu\text{m}$.



obr. 3.4 Záznam z měření stability optického filtru bez klimatizace a vypnutého topení v laboratoři; zelená křivka jsou data z teplotního senzoru umístěné na interferometru, modrá křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřicí vláknové Braggovy mřížky.

3.2 Měření přesnosti a citlivosti senzoru

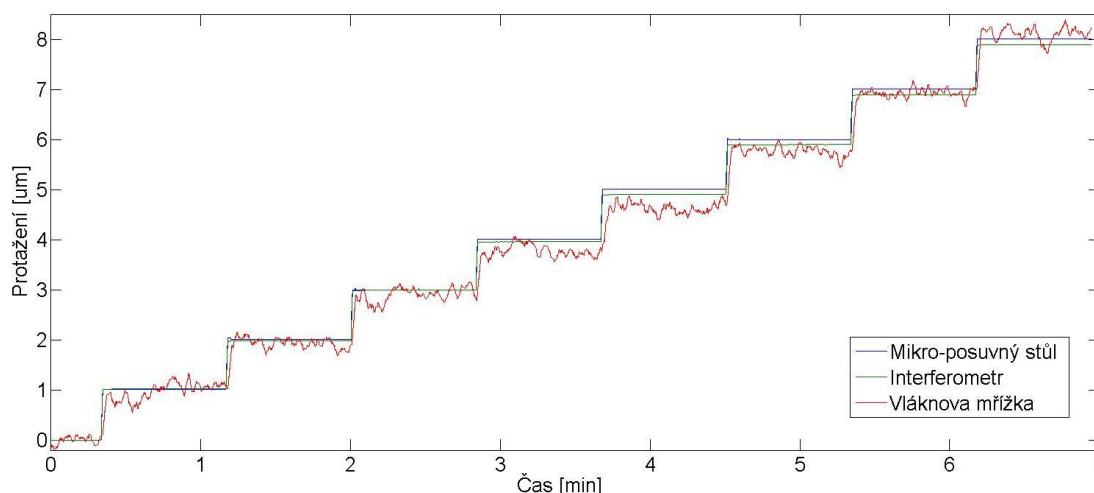
Určení přesnosti měřicího systému se provádělo měřením krokových změn. Pohybem motorizovaného mikro-posuvného stolku se natahovala vláknová Braggova mřížka, která byla umístěna na interferenční lavici. Výsledné měření obsahovalo data změny protažení Braggovy mřížky a změny délky ramene interferometru. Motorizovaný mikro-posuvný stůl s přesností pohybu $\Delta l = 0,2 \mu m$ a s max. rychlostí pohybu $v = 0,05 mm/s$. Jedním z klíčových parametrů nastavení bylo zrychlení mikro-posuvného stolku. Při větším zrychlení stolku nedokázalo vlákno pružně reagovat na pohyb stolku a došlo k jeho přetržení v blízkosti jeho spojení s titanovou lavicí. Po experimentální nastavování zrychlení bylo určeno maximální zrychlení $a = 0,005 mm/s^2$, při kterém nedocházelo k přetržení vlákna a zároveň bylo dostatečně velké pro měření krokových změn.



obr. 3.5 Záznam z měření krokových změn s délkou kroku $10 \mu m$ a s ustálením po dobu 1 min.; modrá křivka jsou data záznamu z interferometru, zelená křivka jsou data měřicí vláknové Braggovy mřížky.

První měření krokových změn bylo provedeno se změnou délky kroku vláknové Braggovy mřížky o 10 μm a ustálením po dobu 1 min. Záznam z měření je na obr. 3.5. Měřicí mřížka byla předepnutá o 150 μm a po 1 min. se mřížka vždy povolila o 10 μm , až dosáhla svého výchozího stavu a znova se natahovala o 10 μm s dobou ustálení 1 min. k předepnutí na hodnotu ze začátku měření. Hodnoty záznamu z Braggovy vláknové mřížky se shodují s hodnotami naměřenými laserovým interferometrem, kdy celková směrodatná odchylka měření je menší než při měření dlouhodobé stability optického filtru $\sigma = 0,326 \mu\text{m}$.

Druhé měření krokových změn bylo provedeno změnou délky měřicí vláknové Braggovy mřížky o 1 μm a ustálením po dobu 1 min (obr. 3.6).

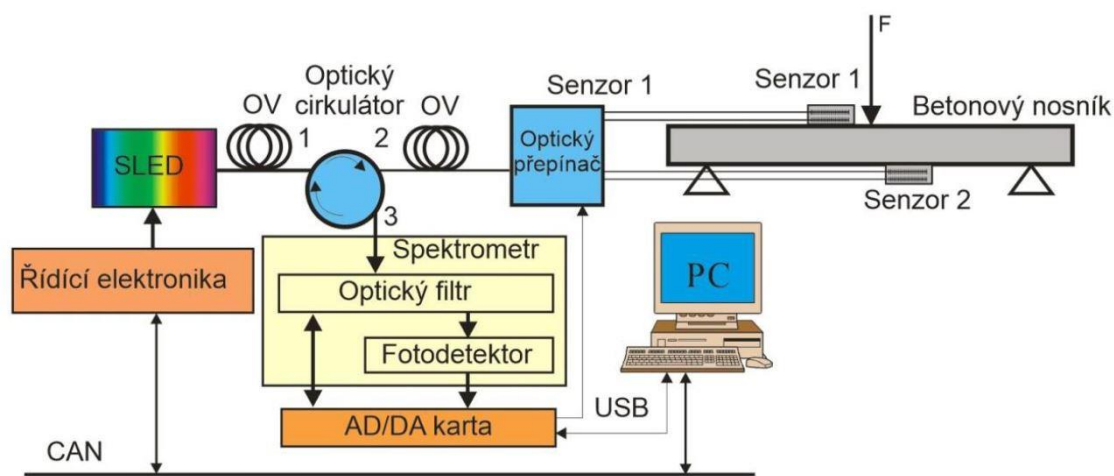


obr. 3.6 Část záznamu z měření krokových změn s krokem 1 μm a s ustálením po dobu 1 min; modrá křivka je záznam z mikro-posuvného stolku, zelená křivka jsou data z interferometru a červená křivka jsou data z měřicí vláknovy Braggovy mřížky.

Z naměřených hodnot je patrný rozdíl mezi hodnotami změny délky vláknové Braggovy mřížky a hodnotami změny délky ramene laserového interferometru. Naměřené hodnoty změny délky z vláknové Braggovy mřížky jsou zatíženy nestabilitou optického filtru a samostatnou závislostí měřené mřížky na teplotě okolí. V záznamu se pak tyto nestability zobrazují jako kolísání naměřených hodnot. V záznamu se také objevuje rozdíl naměřených hodnot změny délky mikro-posuvného stolku a změny délky ramene laserového interferometru, který je dán maximální přesností mikro-posuvného stolku 0,2 μm . Směrodatná odchylka změny délky o 1 μm vláknové Braggovy mřížky od naměřených hodnot laserového interferometru je $\sigma = 0,208 \mu\text{m}$.

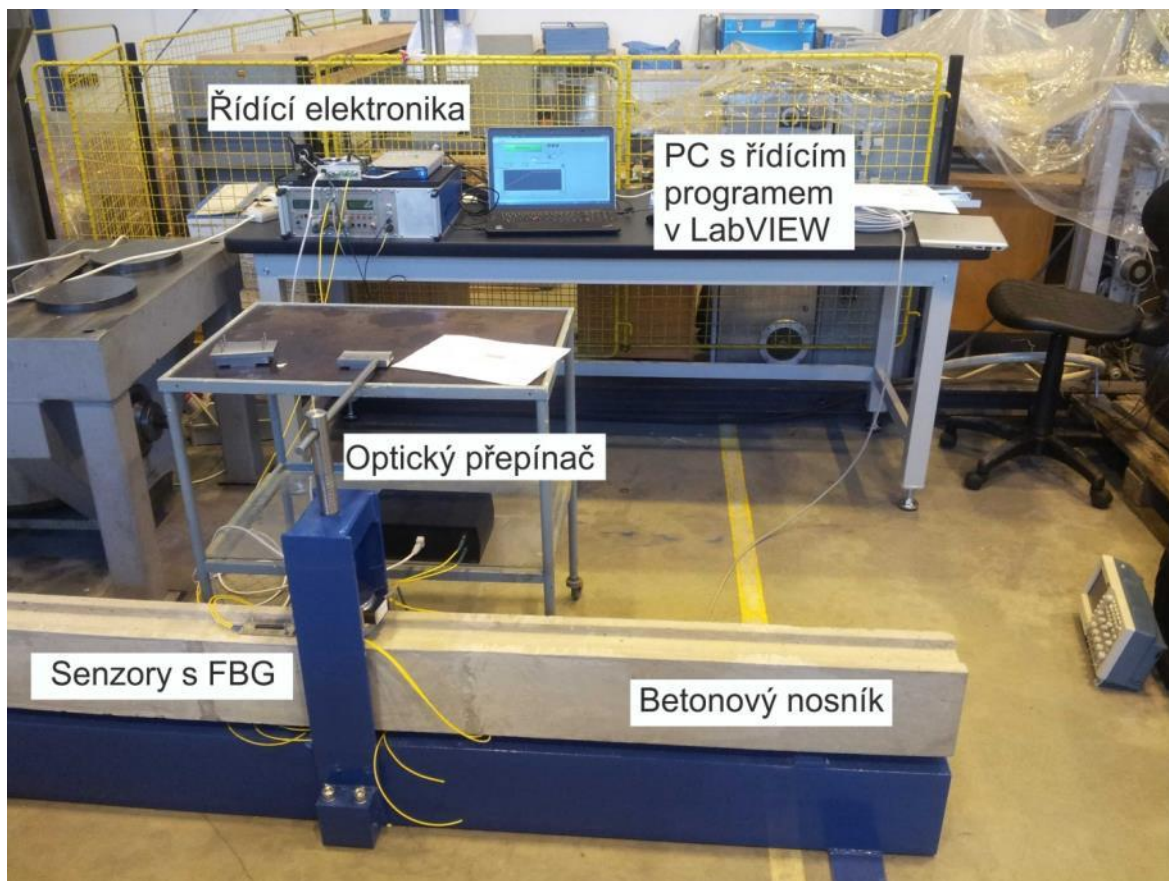
3.3 Měření nosníku v ÚJV Řež

System pro měření délkových změn byl v první verzi experimentálně ověřen v Centru jaderného výzkumu v Řeži. Schéma měření pro tento experiment je na obr. 3.7.

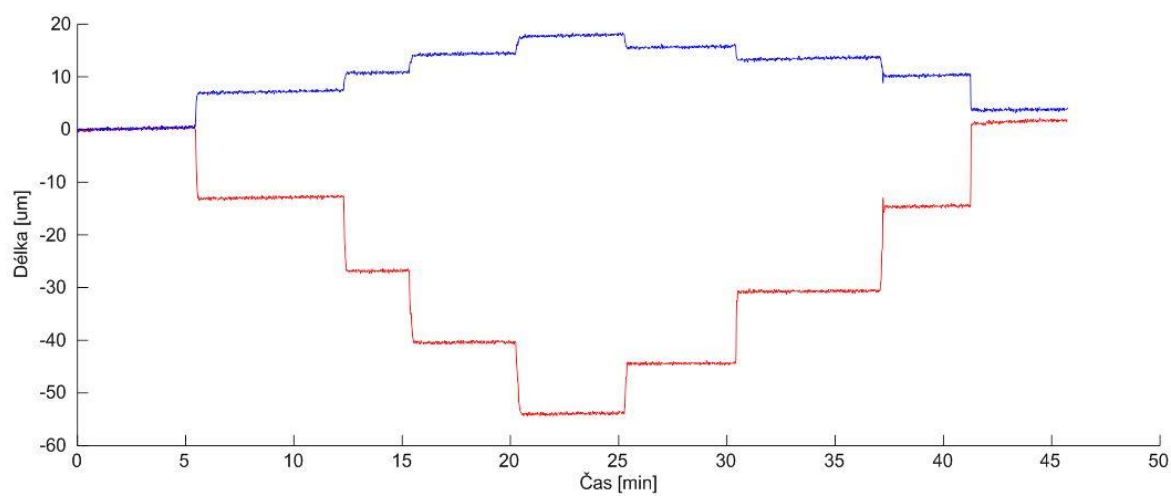


obr. 3.7 Blokové schéma měření změn délky na betonovém nosníku v ÚJV Řež; OV – optické vlákno.

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. Sensor byl připevněn k betonovému nosníku ocelovými šrouby. Betonový nosník byl umístěn na kovové podložce, tak aby byl podepřen ze dvou stran (obr. 3.8). Na střed nosníku se tlačilo šroubem, který vyvíjel zatížení $F = \langle 0; 20 \rangle \text{ kN}$. Systém měřil kontinuálně během změny. Vždy po změně $\Delta F = 5 \text{ kN}$, následovala pauza 5 minut, která sloužila ke stabilizaci nosníku a ustálení všech parametrů. Sensorový systém byl napojen k počítači, přes který se celý experiment ovládal. Na obr. 3.9 je zobrazen průběh měřené délky sensorů při zatěžování nosníku $F = \langle 0; 20 \rangle \text{ kN}$ s krokem $\Delta F = 5 \text{ kN}$. Ze záznamu je vidět, že sensor na horní straně nosníku zobrazuje větší změnu délky, než sensor 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. Došlo tak k nepružné deformaci. To je vidět i na obrázku, kdy se délka sensorů nevrátila do původních hodnot [15]. V této první generaci měřicího systému nebyla do systému zapojena část pro odstranění teplotní nestability systému. V záznamu z měření je vidět tato teplotní nestabilita systému zvyšujícím se trendem naměřených hodnot.



obr. 3.8 Experimentální ověření optického sensorového systému v ÚJV Řež.



obr. 3.9 Časový graf zobrazující pnutí na betonovém nosníku při krokovém zatížení od 0 do 20 kN s krokem 5 kN. Modrá barva - výsledek senzoru umístěného pod nosníkem, červená barva - výsledek senzoru umístěného na horní straně nosníku.

3.4 Měření na kontejnmentu JE Temelín

Zkušenosti a principy měření ze systému měření vláknovými Braggovými mřížkami který je popsán v této diplomové práci, byly využity při návrhu a realizaci měřicího systému, který je zkušebně nainstalován na kontejnment v rámci projektu pro měření tvarových změn kontejnmentu jaderné elektrárny Temelín.

3.4.1 Zkouška PERZIK

Měřicí senzory, využívající princip měření Braggových mřížek, byly nainstalovány na kontejnment jaderné elektrárny Temelín. Zkušební instalace senzorů byla naplánována na 1 rok, během kterého na kontejnmentu došlo mj. k jedné z periodických tlakových zkoušek integrity kontejnmentu PERZIK. Zkoušky PERZIK se provádějí jednou za 4 roky a mají za úkol analyzovat těsnost hermetických prostor kontejnmentu jaderné elektrárny. V hermetickém prostoru kontejnmentu je při běžném provozu udržován trvale podtlak, který zamezuje v případě potenciálních úniků radioaktivity její rozšíření mimo kontrolovaný prostor a její odfiltrování. Nízkoaktivní zbytek lze pak kontrolovaně odvést do ventilačního komína. [20] V době konání zkoušek PERZIK se v kontejnmentu zvýší tlak na 70 kPa a po dobu 48 hodin se měří změny tlaku uvnitř hermetického prostoru [21]. Průběh tlakových zkoušek se projevuje tvarovými změnami kontejnmentu, které se vždy monitorují.

Pro zkušební instalaci jsme na kontejnment umístili 2 senzory s délkou 1 m pro sledování tvarových změn v horizontálním a vertikálním směru. Umístění horizontálního a vertikálního senzoru na kontejnmentu bez ochranného krytu je na obr. 3.10., s ochranným krytem je na obr. 3.11.

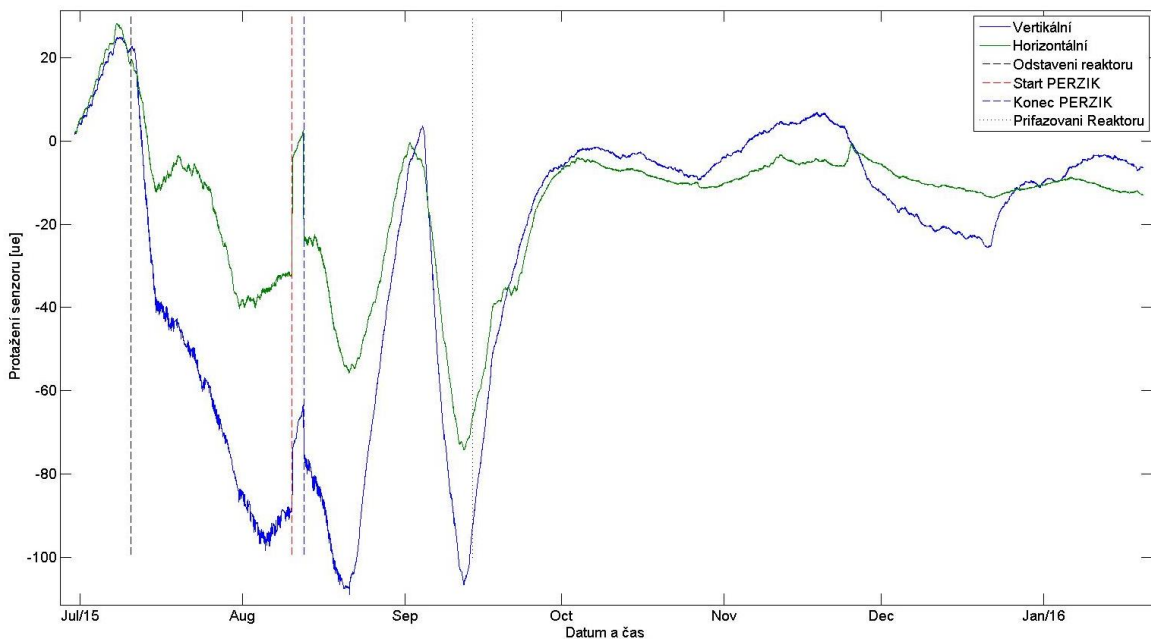


obr. 3.10 Umístění vertikálního a horizontálního senzoru bez ochranného krytu pro měření tvarových změn na kontejnmentu jaderné elektrárny Temelín.



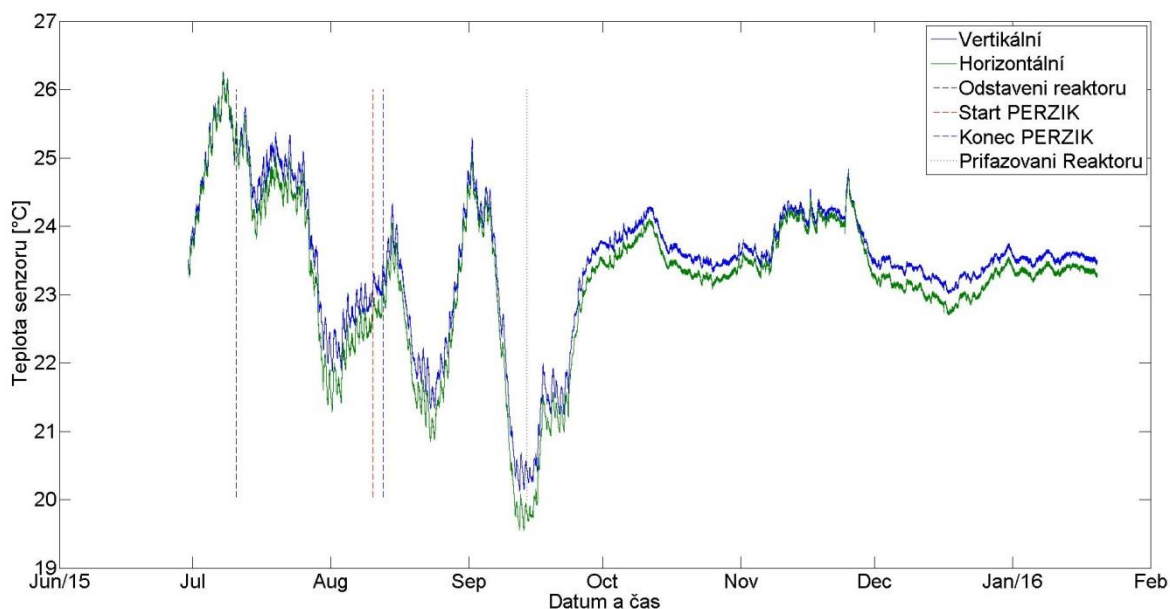
obr. 3.11 Umístění vertikálního a horizontálního senzoru pro měření tvarových změn na kontejnmentu jaderné elektrárny Temelín.

Měřicí sensorový systém je ovládán a řízen z PC řídicím programem v LabView umístěným v blízkosti sensorového systému. Část záznamu z měření tvarových změn kontejnmentu je na obr. 3.12, kde je zachyceno období ve kterém probíhala odstávka jaderného reaktoru s tlakovou zkouškou integrity PERZIK. Záznam naměřených relativních teplot na vnější straně kontejnmentu ze stejného měřicího období je na obr. 3.13.



obr. 3.12 Část záznamu naměřených hodnot protažení senzorů při odstávce a zkoušce PERZIK jaderného reaktoru v JE Temelín.

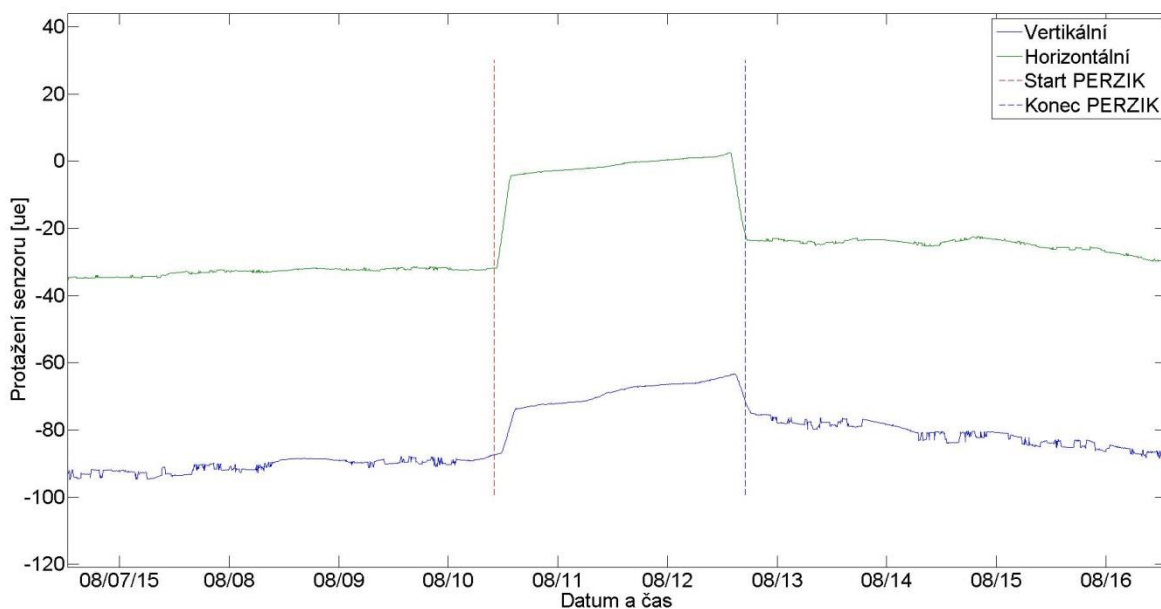
V běžném provozu jaderného reaktoru je uvnitř kontejnmentu stálá teplota cca 50°C, při odstavení reaktoru se teplota uvnitř kontejnmentu sníží o 25 °C. Tato změna teplot uvnitř kontejnmentu se projevila v tvarových změnách kontejnmentu. Změny lze vidět na záznamu z měření (obr. 3.12), kde došlo ke zkrácení délky senzorů. Po přifázování jaderného reaktoru po odstávce se teplota uvnitř opět zvýšila na provozní hodnotu a na záznamu z měření je vidět protažení senzoru zpět do původního stavu. Změna teploty uvnitř kontejnmentu se v menší míře projevila i na vnějším povrchu kontejnmentu v jedné z místností obestavby, kde jsou nainstalovány měřicí senzory. Záznam z měření teploty v kompenzačním vlákně je na obr. 3.13.



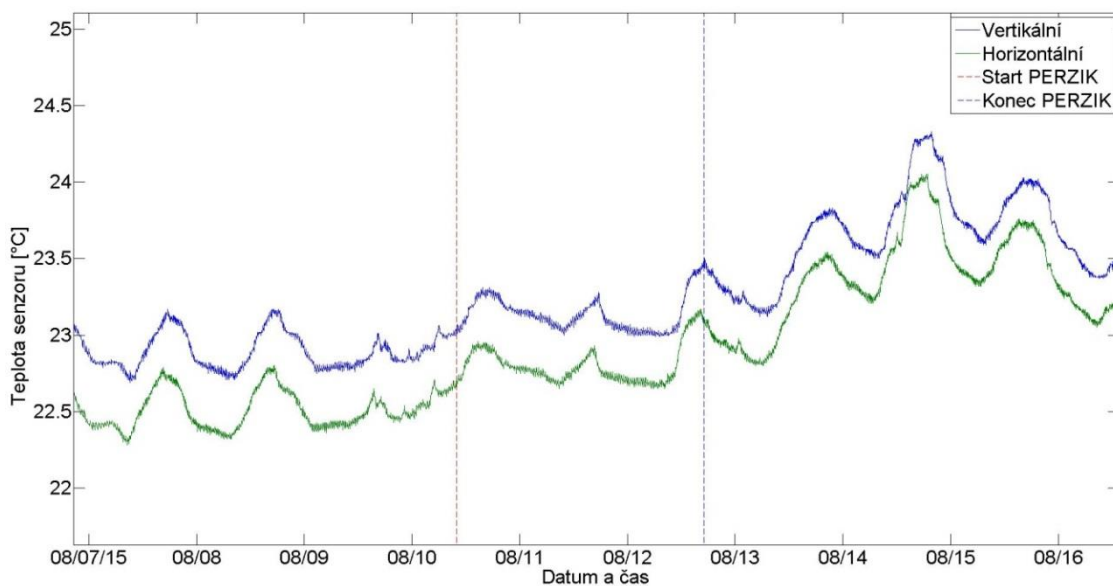
obr. 3.13 Část záznamu naměřených hodnot teploty při odstávce a zkoušky PERZIK jaderného reaktoru v JE Temelín.

Záznam z měření během tlakové zkoušky PERZIK je na obr. 3.14, kde horizontální i vertikální senzor zaznamenává změnu délky senzoru v průběhu této zkoušky. Na startu zkoušky PERZIK, kdy je kontejnment tlakován, je vidět prodloužení horizontálního i vertikálního senzoru. Na konci zkoušky po 48 hodinách se v kontejnmentu vrátí tlak na běžnou hodnotu a tato změna tlaku je zaznamenána změnou délky senzorů zpět na původní hodnotu před začátkem tlakové zkoušky.

Ze záznamu měření teplot (obr. 3.15) v době konání zkoušky PERZIK není vidět žádný výraznější trend jejich změny. Periodicky se opakující změny teplot na záznamu jsou způsobeny změnami venkovních teplot v průběhu dne a noci.



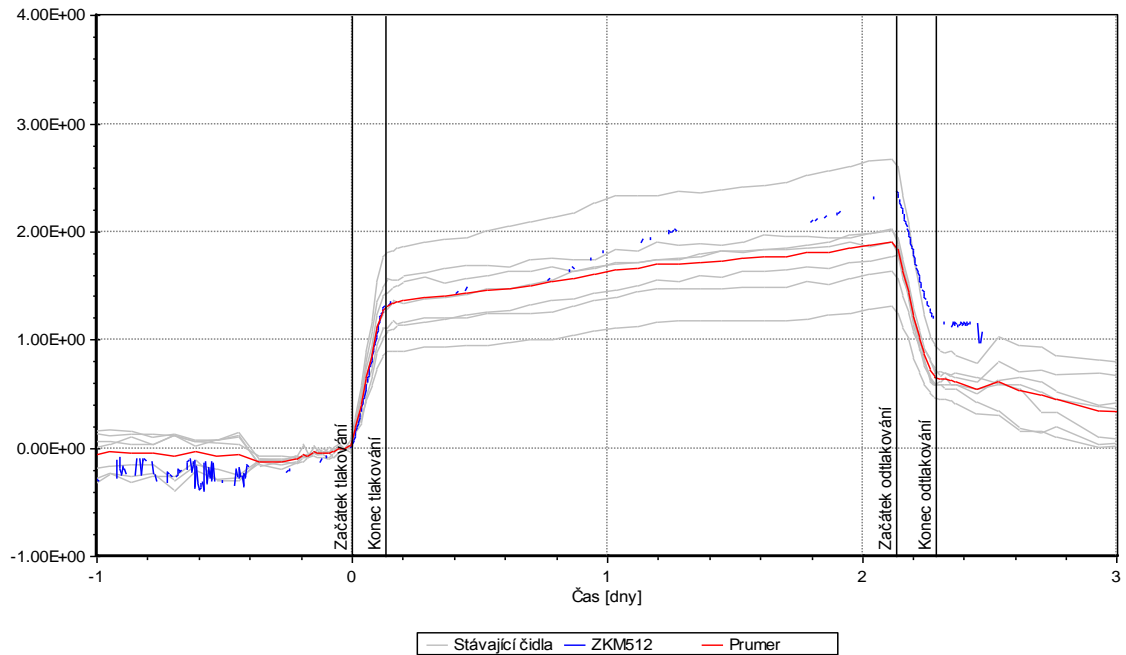
obr. 3.14 Záznam protažení senzorů během periodické zkoušky integrity kontejnmentu PERZIK.



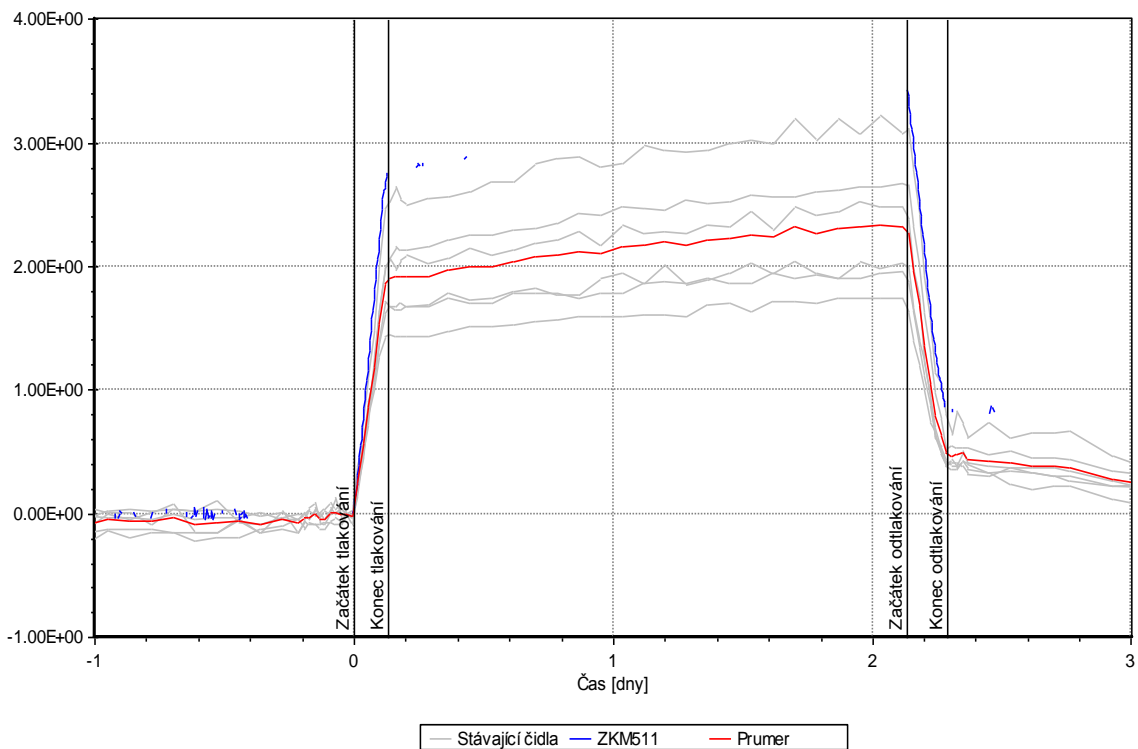
obr. 3.15 Teplotní záznam z periodické zkoušky integrity kontejnmentu PERZIK.

Naměřené hodnoty protažení ze systému senzorů s vláknovými Braggovými mřížkami se porovnávaly při zkoušce PERZIK s naměřenými hodnotami tvarových změn stávajících tenzometrických senzorů. Záznam naměřených hodnot ze zkoušky PERZIK je pro vertikální senzory na obr. 3.16 a pro horizontální senzory na obr. 3.17. Rozdíly naměřených tvarových změn mezi stávajícím tenzometrickým senzorovým systémem a systémem s Braggovými mřížkami jsou způsobeny tím, že senzory s Braggovými mřížkami nebyly přesně umístěny nad místo, kde by se v konstrukci nacházely tenzometrické senzory. Pro objektivní porovnání tenzometrických senzorů a senzorů

s vláknovou Braggovou mřížkou se udělal průměr naměřených protažení tenzometrických senzorů.

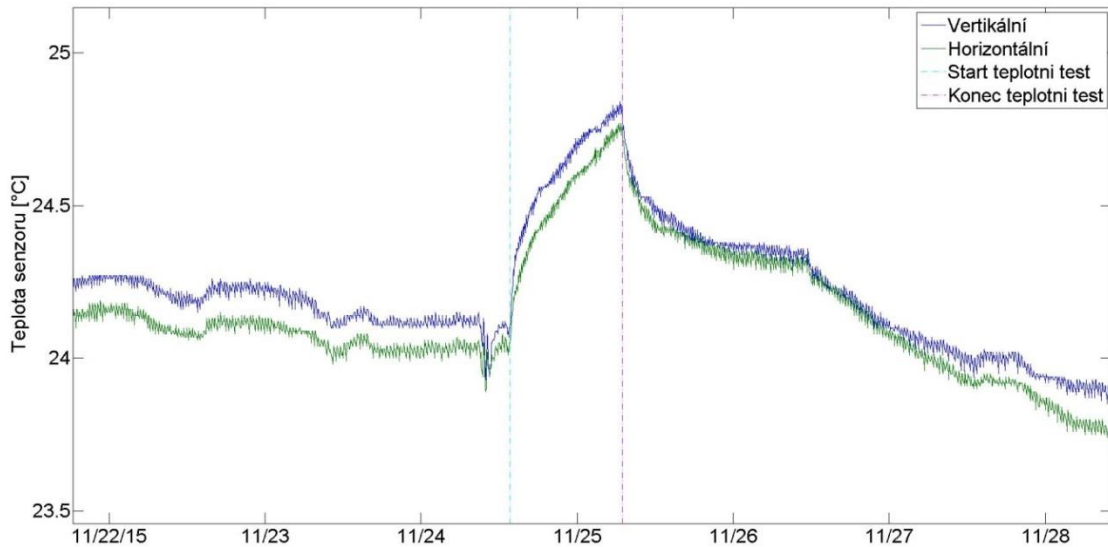


obr. 3.16 Porovnání naměřených hodnot při zkoušce PERZIK – horizontální senzory; šedé křivky jsou záznamy z tenzometrických senzorů, červená křivka je průměr tenzometrických senzorů, modrá křivka je záznam ze senzoru s vláknovou Braggovou mřížkou.

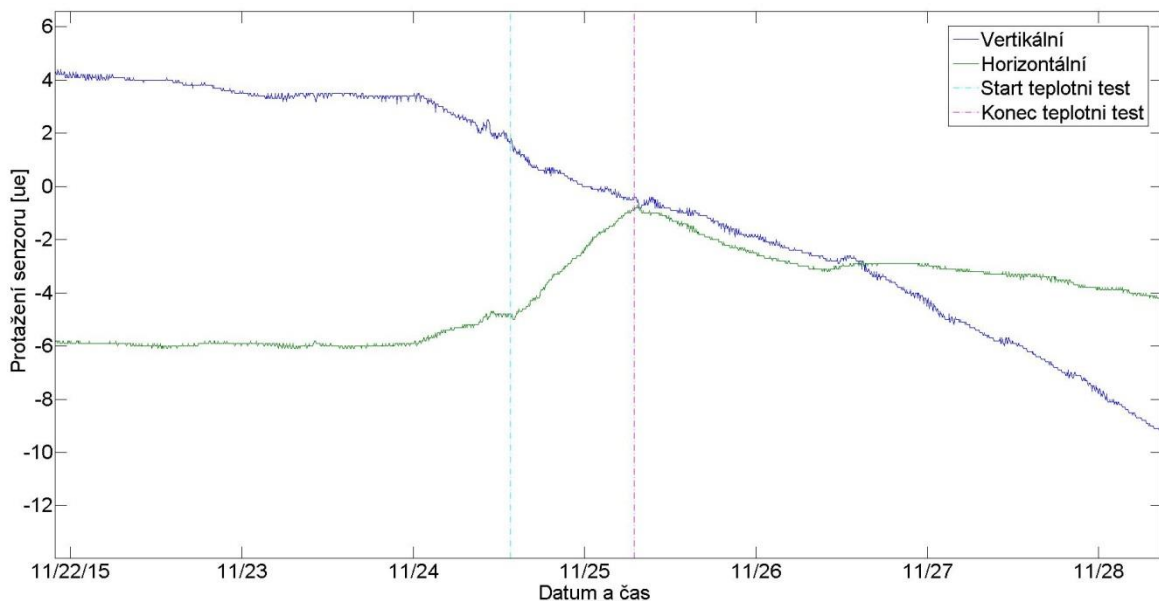


obr. 3.17 Porovnání naměřených hodnot při zkoušce PERZIK – vertikální senzory; šedé křivky jsou záznamy z tenzometrických senzorů, červená křivka je průměr tenzometrických senzorů, modrá křivka je záznam ze senzoru s vláknovou Braggovou mřížkou.

Součástí kontrolních měření byla i zkouška teplotní závislosti senzorů měřících tvarové změny kontejnmentu. Záznam z teplotní zkoušky je na obr. 3.18. Na obr. 3.19. je reakce senzorů měřících délkové změny na teplotní zkoušku. Změna délky horizontálního senzoru nemá spojitost s teplotní zkouškou prováděnou v prostorách obklopujících kontejnment, tuto změnu zaznamenaly i ostatní senzorové systémy a byla způsobena procesy uvnitř kontejnmentu.



obr. 3.18 Záznam kompenzační mřížky z teplotního testu prováděného v prostorách obklopující kontejnment.



obr. 3.19 Záznam měřící mřížky z teplotního testu prováděného v prostorách obklopující kontejnment.

3.5 Vlastní přínos

V rámci diplomové práce jsem se zabýval studiem odborných článků zabývajících se problematikou vláknových Braggových mřížek a jejich aplikací. Na základě nastudované literatury jsem navrhl měřicí systém s Braggovými mřížkami pro měření vzdálenosti. Tento měřicí systém jsem pak dále rozšířil o referenční a kalibrační blok. Referenční blok je zařazen do systému z důvodu odstranění teplotní nestability optického filtru. Interferenční blok měří linearitu a přesnost systému pro měření změn délky. K tomuto systému měření změn délky vláknovými Braggovými mřížkami jsem naprogramoval řídicí systém v softwaru pro grafický návrh systémů LabView. V laboratoři na ÚPT AVČR jsem poté sestavil měřicí systém a provedl sérii měření pro ověření správnosti a přesnosti navrženého systému.

ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce byl návrh, realizace a ověření metody pro zvýšení přesnosti měření optického frekvenčního spektra laditelnými optickými filtry. V rámci práce jsem se seznámil s problematikou měření odraženého spektra světla od vláknových Braggových mřížek. Na základě těchto znalostí jsem vybral k měření spektra světla optický laditelný filtr s Fabry - Perotovým rezonátorem. Sestavil jsem měřicí pracoviště k měření délkových změn Braggovými mřížkami a rozšířil jsem toto pracoviště o interferenční a referenční blok. Referenční blok slouží k odstranění teplotní nestability optického filtru z důvodu chyby optického filtru, který měl být dle výrobce teplotně stabilizovaný. K odstranění teplotní nestability byla využita teplotně stabilizovaná vláknová Braggova mřížka, která při každém měření reprezentuje frekvenční etalon. Abych ověřil referenční blok, byla při vývoji systému, všechna měření kontrolována komerčním vlnoměrem s rozlišením 0,1 pm. Interferenční blok se využívá pro ověření stability, přesnosti a linearitu měřicího systému. Při ověření referenčního bloku byla naměřena dlouhodobá stabilita měřicího systému se směrodatnou odchylkou $\sigma = 0,208 \mu\text{m}$. Pro celý měřicí systém byl realizován řídicí program v LabVIEW, který kompletně ovládá optický filtr, teplotní kontroler a motorizovaný mikro - posuvný stolek. Systém vycházející z této práce byl experimentálně ověřen v ÚJV Řež na speciálním betonovém nosníku. Po rozšíření tohoto systému o další bloky byl měřicí systém zkušebně nainstalován na kontejnment JE Temelín, kde měřil tvarové změny. Výsledky těchto měření jsou v této práci prezentovány.

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.
- [2] CHEUNG, Chi. *An investigation of chirped fibre Bragg gratings Fabry-Perot interferometer for sensing applications* [online]. Optical Sensors Group Centre for Photonics and Optical Engineering School of Engineering, 2005 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/904/2/full%20thesis%20shing.pdf>. PhD Thesis. Cranfield University.
- [3] Spectrometer knowledge. *BWTEK* [online]. 2015 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://bwtek.com/spectrometer-introduction/>
- [4] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013, 368 s. ISBN 978-80-246-2246-0.
- [5] GRATING PRINCIPLES. *Universidade de Évora* [online]. 2013 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://evunix.uevora.pt/~db/SPATRAM/a1gratingprinciples.html>
- [6] *Hamamatsu* [online]. 2015 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.hamamatsu.com/>
- [7] Linear CCD image sensor. *EE publishers* [online]. 2015 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.ee.co.za/article/linear-ccd-image-sensor-2.html>
- [8] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of Optics*. Oxford: Nauka, 1999, 855 s. 7. ISBN 0-521-64222-1.
- [9] *Laser Instruments and Applications* [online]. 2015 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://www.repairfaq.org/sam/laserlia.htm#liaint0>
- [10] Optical Spectrum Analyzers. *Thorlabs* [online]. 2015 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=5276&pn=OSA202#InterferometerDesign
- [11] Interference. *RP Photonics* [online]. 2009 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/interference.html>
- [12] Highfinesse. *Wavelength Meter* [online]. 2015 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://www.highfinesse.com/en/wavelengthmeter>
- [13] HODGSON, Norman a Horst WEBER. *Optical resonators: fundamentals, advanced concepts, and applications*. New York: Springer, c1997, xxi, 659 p. ISBN 35-407-6137-3.
- [14] MIKEL, Břetislav. *LASEROVÁ INTERFEROMETRIE S PŘELADITELNÝM POLOVODIČOVÝM LASEREM* [online]. b.r. [cit. 2014-04-16].
- [15] JELÍNEK, Michal. *Návrh optovláknového sensorového systému pro měření změn délky*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.
- [16] *DL-CS5203A: DENSELIGHT SEMICONDUCTORS* [online]. b.r. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: http://www.denselight.com/downloads/SLED/DL-CS5203A_RevB.pdf
- [17] *Voltage Output Temperature Sensor with Signal Conditioning: Technical Data*

- Analog Devices* [online]. 2004 [cit. 2015-12-10].
- [18] DC Servo Motor Actuators. In: *Thorlabs* [online]. 1999-2016 [cit. 2016-05-03].
Dostupné z:
http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1882&pn=Z812B
- [19] CIZEK, Martin, Zdenek BUCHTA, Bretislav MIKEL, Josef LAZAR a Ondrej CIP. *Novel instrumentation for interferometric nanoscale comparator*. Institute of Scientific Instruments of the ASCR, v.v.i., Academy of Sciences of the Czech Republic, b.r., , 7.
- [20] NI USB-6351. *National Instruments* [online]. b.r. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z:
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/209071>
- [21] CAN - popis struktury. *Vyvoj.hw.cz* [online]. 2004 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z:
<http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/can-popis-struktury.html>
- [22] Peak Detection Using LabVIEW and Measurement Studio. *National Instruments* [online]. 2012 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3770/en/>
- [23] Adaptér USB-CAN. *Vyvoj.hw.cz* [online]. 2004 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z:
<http://vyvoj.hw.cz/produkty/adapter-usb-can.html>
- [24] CANopen. *Vyvoj.hw.cz* [online]. 2006 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z:
<http://vyvoj.hw.cz/produkty/co-je-canopen-a-jak-na-nej.html>
- [25] Technické provedení JE Temelín. *CEZ* [online]. 2016 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/8.html>
- [26] HODNOCENÍ PROVOZNĚ BEZPEČNOSTNÍCH UKAZATELŮ. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Praha: PBU, 2015 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z:
https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/hodnoceni/HodnoceniPBU2014_Final_Podps.pdf