

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů

Učební texty k semináři

Autoři:

Ing. Martin Dušek (Safibra, s.r.o., Říčany)

Ing. Michal Mazanec (Safibra, s.r.o., Říčany)

Datum:

29. června. 2012

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM
FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah.....	1
1. Optické vlákno.....	3
1.1. Co je to optické vlákno.....	3
1.2. Rozdělení optických vláken	3
1.3. Jak funguje optické vlákno	4
1.4. Základní parametry optického vlákna	6
1.4.1. Útlum optického vlákna	6
1.4.2. Přenosová kapacita.....	7
1.4.3. Numerická apertura.....	8
1.5. Optické kabely	8
2. Optovláknové senzory.....	10
2.1. Rozdělení optovláknových senzorů.....	10
2.2. Bodové senzory teploty	11
2.3. Senzory na bázi FBG.....	12
2.4. SOFO senzor na bázi interferometru.....	14
2.5. DTS – Raman OTDR	15
2.6. DTSS – Brillouin OTDR	16
2.7. Senzor na bázi SWI.....	17
2.8. DAS – distribuovaný akustický senzor	17
2.9. Senzor elektrického proudu	18
2.10. Optický mikrofón	18
2.11. Senzor parciálního tlaku kyslíku	18
3. Reálné aplikace optovláknových senzorů	20
3.1. Monitoring teploty vinutí transformátorů.....	20
3.2. SHM - monitoring stavu stavebních konstrukcí	22
3.3. Aplikace v železniční dopravě.....	24

Seznam použité literatury	27
---------------------------------	----

1. OPTICKÉ VLÁKNO

Ing. Michal Mazanec

V první kapitole se seznámíme s pojmem optické vlákno, s jejich různými typy, dále rozebereme, jak optické vlákno funguje, jaké jsou jeho základní parametry. V závěru se stručně zmíníme o základních typech optických kabelů.

1.1. Co je to optické vlákno

Optické vlákno je přenosové medium tvořené skleněným (křemenným) nebo plastovým vláknem (POF), které prostřednictvím světla přenáší signály ve směru své podélné osy. Optické vlákno je tou součástí komunikačního systému, která spojuje vysílač a přijímač. Ve smyslu tématu tohoto semináře však představuje také strukturu, kterou lze použít k detekci některých veličin, které na něj působí.

1.2. Rozdělení optických vláken

Když v roce 1970 vědci v Bell Laboratories v USA poprvé vyrobili optické vlákno s útlumem pod 20 dB / km jistě netušili, že zahájili novou éru v oblasti telekomunikací. Éru, která změnila způsob přenosu informací, ale zároveň nastartovala vývoj dalších způsobů využití optických vláken a tím i vývoj různých typů vláken optimalizovaných pro nejrůznější aplikace.

Optická vlákna dnes existují v mnoha podobách, konstrukcích a provedeních. Jejich rozdělení je možné podle různých hledisek, které se pak vzájemně překrývají, takže univerzální rozdělení pravděpodobně neexistuje.

První ze způsobů rozdělení je podle materiálu, ze kterého jsou vlákna vyrobena:

- ❖ Křemenná
- ❖ Skleněná
- ❖ Plastová (POF)
- ❖ Křemenné jádro / plastový opticky aktivní plášť (PCS)

Druhý způsob rozdělení je podle způsobu použití:

- ❖ Komunikační
- ❖ Přenos světla
 - ❖ Osvětlovací (dekorativní osvětlení, osvětlení objektů v mikroskopech)
 - ❖ Pro vědecké účely (spektrometrie, endoskopie)

Třetí způsob rozdělení je podle uspořádání:

- ❖ Jednotlivá vlákna
- ❖ Vláknové svazky (několik tisíc vláken ve svazku)

Nicméně hovoříme-li o optických vláknech, máme na mysli převážně telekomunikační křemenná optická vlákna, která dělíme na:

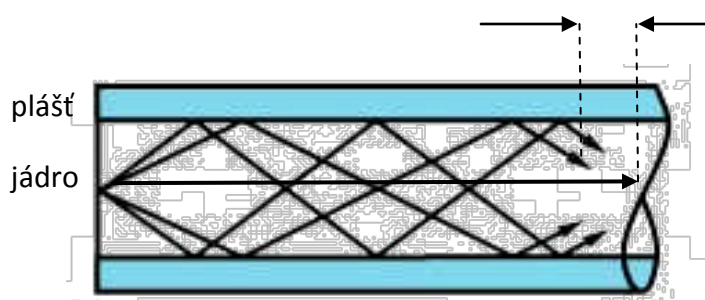
- ❖ jednovidová vlákna
- ❖ mnohovidová vlákna

což lze považovat za základní rozdělení optických vláken.

1.3. Jak funguje optické vlákno

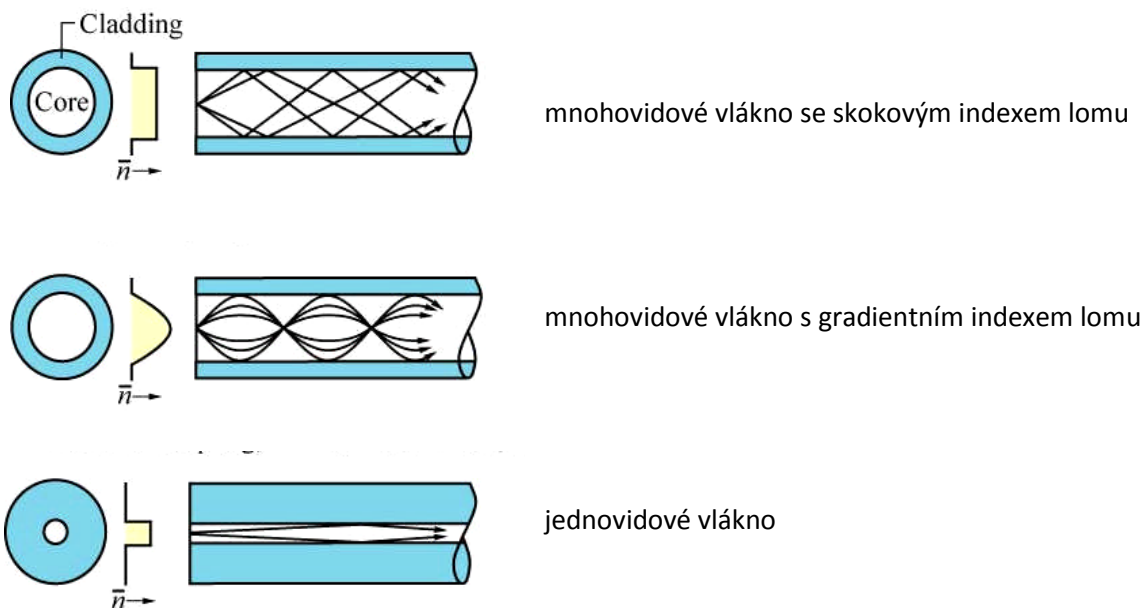
Optické vlákno funguje na principu totálního odrazu světla na rozhraní opticky hustšího prostředí (prostředí s vyšším indexem lomu), které

tvorí jádro vlákna (core) a opticky řidšího prostředí (s nižším indexem lomu), které tvoří tzv. opticky aktivní plášť vlákna (cladding). Informace, která se přenáší optickým vláknem, se šíří různými vidy, které putují po různě dlouhých trajektoriích a proto se signál se při přenosu vláknem deformuje. Tento jev se nazývá intervidová disperze a udává nám převrácenou hodnotu maximální frekvence, kterou můžeme vláknem přenést tak, abychom na konci ještě rozlišili dva po sobě jdoucí pulsy. Jinými slovy určuje přenosovou kapacitu vlákna.



Obrázek 1.3.1. Princip fungování optického vlákna

Mnohovidovým vláknem se skokovým indexem lomu se šíří až několik tisíc vidů a proto je intervidová disperze velká a přenosová kapacita takového vlákna malá. Aby se dosáhlo zvýšení přenosové kapacity, navrhli experti vlákna s postupným nárůstem indexu lomu směrem ke středu vlákna, čímž se vidy šířící se převážně středem zpomalí a vidy šířící se po delších trajektoriích v oblastech s nižším indexem lomu relativně urychlí. Tím se zmenší intervidová disperze, jinými slovy zvýší přenosová kapacita vlákna. Takové vlákno je nazýváno vlákno s gradientním indexem lomu. Aby se úplně zabránilo intervidové disperzi, bylo navrženo vlákno, ve kterém se šíří pouze jediný vid – vlákno jednovidové. Přenos informace jednovidovým vláknem není deformován intervidovou disperzí, přenosová kapacita je řádově větší než přenosová kapacita mnohovidových vláken. Omezujícími faktory u jednovidových vláken jsou chromatická disperze, polarizační disperze a další jevy, které se samozřejmě vyskytují i u mnohovidových vláken, ale proti intermodální disperzi jsou zanedbatelné.



Obrázek 1.3.2 Základní typy optických vláken

1.4. Základní parametry optického vlákna

1.4.1. Útlum optického vlákna

Útlum optického vlákna je jeho základním parametrem a představuje pokles intenzity signálu mezi dvěma body. Je dán rovnicí:

$$\text{útlum v dB} = 10 \log_{10} P_2/P_1$$

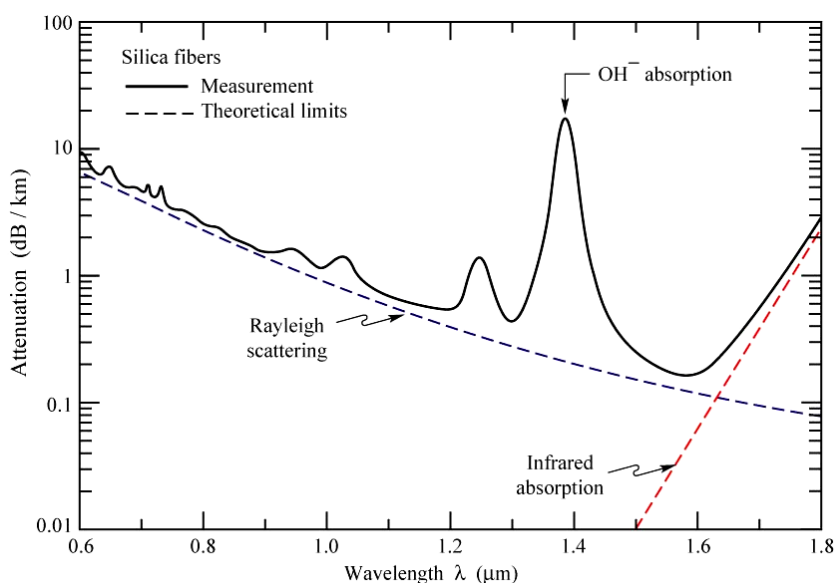
kde P_2 je výkon na konci vlákna a P_1 je výkon, který je do vlákna navázán.

Pokud se na útlum podíváme prakticky, pak jednotlivé hodnoty znamenají:

- ❖ **0,3 dB / km = přeneseno 93,3% energie**
- ❖ **1,0 dB / km = přeneseno 79,4% energie**
- ❖ **3,0 dB / km = přeneseno 50,1% energie**
- ❖ **10,0 dB / km = přeneseno 10% energie**

Útlum vlákna hraje důležitou úlohu při návrhu systému, neboť limituje délku přenosové trasy. Je také závislý na vlnové délce, takže se liší u téhož vlákna podle toho, na jaké vlnové délce je provozováno. Např.

standardní jednovlňové optické vlákno má typicky útlum 0.35 dB/km na vlnové délce 1310 nm a 0.21 dB/km na vlnové délce 1550 nm.



Obrázek 1.4.1. Závislost útlumu na vlnové délce

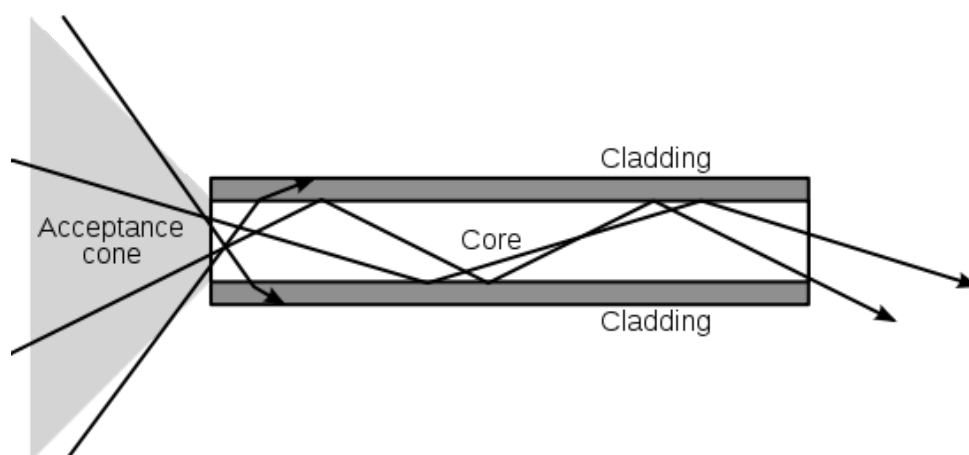
1.4.2. Přenosová kapacita

Přenosová kapacita optického vlákna udává, jaké množství informací lze vláknem přenášet. U mnohovidových vláken je omezena disperzí, resp. šířkou přenášeného pásma frekvencí. Ta se udává v MHz*km, což v praxi znamená, že např. vlákno s šířkou pásma 500 MHz*km přenesení na vzdálenost 1000 m signál o maximální frekvenci 500 MHz, na vzdálenost 500 m signál o maximální frekvenci 1000 MHz nebo na vzdálenost 5 km signál s maximální frekvencí 100 MHz. Z uvedeného je zřejmé, že jsou mnohovidová vlákna vhodná pro krátké a střední vzdálenosti, ale nehodí se na dlouhé vzdálenosti, protože pak mají velmi malou přenosovou kapacitu.

Na dlouhé vzdálenosti jsou používána vlákna jednovlňová, neboť se jimi šíří jediný vid, odpadá tedy jev intermodální disperze a nastupují limitující faktory druhého řádu, tj. především chromatická disperze. Přenosová kapacita jednovlňového optického vlákna je o několik řádů vyšší, než přenosová kapacita vláken mnohovidových.

1.4.3. Numerická apertura

Numerická apertura (NA) je vyjádřena jako sinus polovičního maximálního úhlu pod, kterým lze světlo navázat do jádra optického vlákna.



Obrázek 1.4.2. Numerická apertura

Svůj význam má numerická apertura především při spojování optických vláken a u napojení optického vlákna na zdroj světla, protože pokud má vlákno, které přijímá světelný tok nižší NA než vlákno, ze kterého se světelný tok přenáší, vzniká na spoji ztráta, jinými slovy narůstá útlum přenosové trasy.

1.5. Optické kabely

Nebylo cílem semináře rozebírat různé typy a konstrukce optických kabelů, ale pro některé návaznosti ve druhé kapitole by bylo vhodné alespoň rozdělit optické kabely na kabely s těsnou sekundární ochranou a volnou sekundární ochranou.

Těsná sekundární ochrana je ochrana natěsně nanesená na primární ochranu (akrylátová ochrana nanášená na vlákno při jeho výrobě o průměru 250 μm), má vnější průměr zpravidla 0.9 mm a vlákna s tímto typem ochrany se používají převážně pro kabely na kratší a střední vzdálenosti pro vnitřní použití, jako jsou kabely typu simplex, duplex, breakout nebo distribuční kabely.

Volná sekundární ochrana se používá převážně pro venkovní kabely na dlouhé vzdálenosti. Volná sekundární ochrana znamená, že vlákna v primární ochraně jsou volně vpuštěna do trubice o průměru 2 – 4 mm, trubice může být naplněna gelem, aby byla vlákna chráněna proti vodě a tato trubice se používá jako základní stavební prvek kabelů CLT (central loose tube) a MLT (multi loose tube). Ve volné sekundární ochraně bývá zpravidla 2-24 vláken, proto mohou MLT kabely obsahovat desítky až stovky vláken. Všechny typy kabelů používají tahové prvky v podobě aramidových nebo skleněných vláken, které zabraňují přenesení tahového namáhání na optická vlákna a pak různé typy ochrany, které ochraňují kabel proti hlodavcům, bočním rázům, vodě apod.

Optické kabely se dále dělí podle místa instalace na kabely pro vnitřní použití (materiál pláště LSOH nebo PVC), kabely pro venkovní použití (materiál pláště HDPE nebo PA) a kabely univerzální (materiál pláště UV stabilizovaný LSOH).

2. OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY

Ing. Michal Mazanec

V této části se seznámíme s fyzikálními principy celé řady optovláknových senzorů, jejich výhodami a možnostmi jejich využití.

2.1. Rozdělení optovláknových senzorů

Jak a hlavně podle čeho rozdělit optovláknové senzory je často kladená otázka. Hledisek je celá řada, ale základní rozdělení je na dvě skupiny:

- ❖ Senzory, kde vlákno slouží jen k přenosu informace
- ❖ Senzory, kde vlákno slouží jako detektor

Důležité je také rozdělení podle prostorového uspořádání:

- ❖ Bodové senzory
- ❖ Rozprostřené (distribuované) senzory
- ❖ Polo-rozprostřené (semi-distribuované) senzory

Lze je rozdělit také podle použité technologie – principu činnosti, oblasti aplikace nebo prostě podle toho, co potřebujeme měřit. V současné době umíme měřit následující veličiny:

Senzory fyzikálních veličin

- ❖ Teplota
- ❖ Mechanické napětí – staticky / dynamicky
- ❖ Deformace – přetvoření
- ❖ Tlak
- ❖ Posuv
- ❖ Vibrace

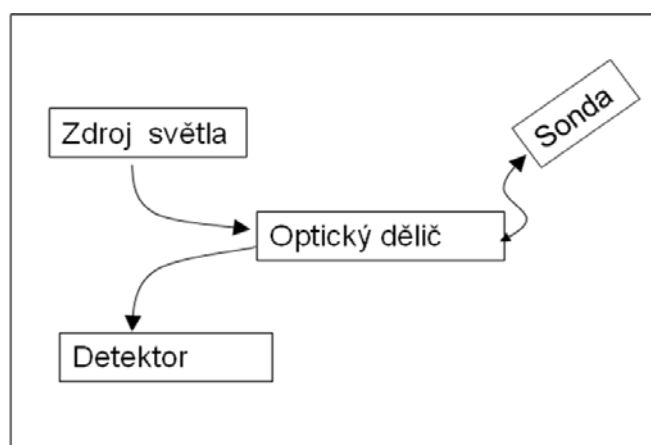
- ❖ Proud (elektrický)

Chemické a biochemické senzory

- ❖ Parciální tlak kyslíku
- ❖ pH

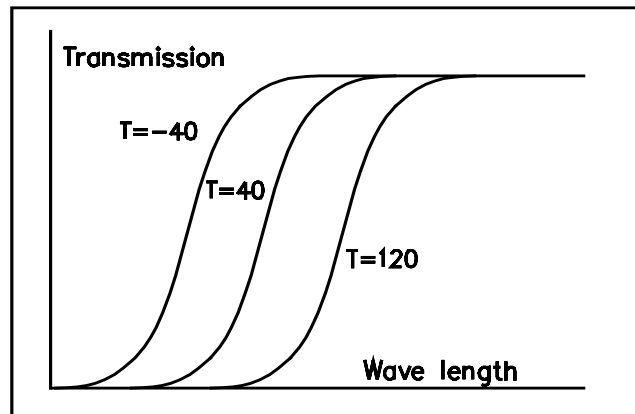
2.2. Bodové senzory teploty

Bodové senzory teploty jsou kontaktní čidla, která měří teplotu v bodě, ve kterém se dotýkají měřeného objektu. Nemají nic společného s IR čidly, kterými je také opticky snímána teplota. V praxi jsou nečastěji používány dva principy, které vycházejí z velmi podobného základního uspořádání, kdy systém svítí do vlákna a pak analyzuje světlo, které se po odrazu na sondě vrátí zpět do jednotky.



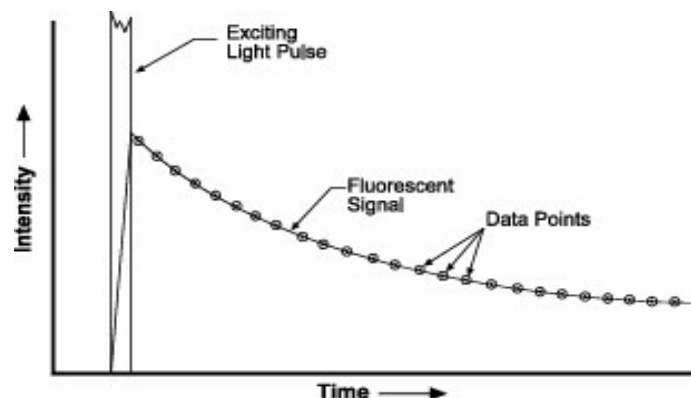
Obrázek 2.2.1 Uspořádání bodového teplotního senzoru

V prvním případě se využívá absorpčních vlastností krystalu GaAs, který je umístěn na konci optického vlákna a který absorbuje část spektra a druhou část spektra propouští. Hrana, která rozděluje tyto dvě oblasti, je závislá na teplotě. Výhodou této metody je nezávislost na intenzitě záření, tedy útlumu vlákna, neboť se měří vlnová délka.



Obrázek 2.2.2. Princip měření na základě absorpce GaAs

Druhá metoda využívá fluorescence fosforu naneseného na konci vlákna, kterým je přivedeno jak budící záření, tak odvedeno fluorescenční záření zpět do vyhodnocovací jednotky. Rychlost poklesu fluorescence je funkcí teploty, čehož tento princip využívá.



Obrázek 2.2.3. Princip měření na základě poklesu fluorescence fosforu

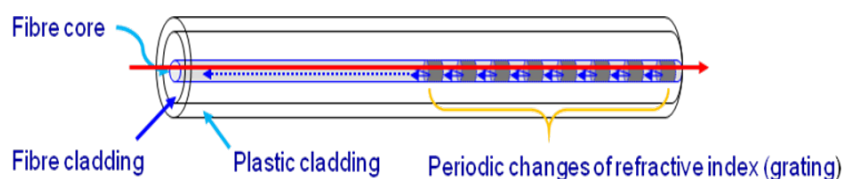
Obě metody využívají vlákno jen k přenosu signálu, jsou využívány průmyslově především pro měření teploty vinutí transformátorů VVN, v oblasti mikrovlnné techniky apod.

2.3. Senzory na bázi FBG

Zkratka FBG je odvozena od anglického Fibre Bragg Grating a představuje technologii, kdy je do jádra optického vlákna vytvořena struktura podobná difrakční mřížce a to změnami hodnot indexu lomu. Toho se docílí rozdělením

světla z UV laseru do dvou paprsků, které interferují a vytvoří periodické změny intenzity, které u fotocitlivého materiálu podle intenzity vytvoří již zmíněnou strukturu s rozdílnými hodnotami indexu lomu. Jiný způsob vytvoření FBG mřížky spočívá ve vložení fotomasky do paprsku UV světla. Dnešní technologie umožňují zápis mřížek do jádra vlákna již ve stádiu jeho výroby – tažení. Fotocitlivosti vlákna se docílí dopováním jádra např. oxidy germania. Délka mřížky se může lišit od desetin milimetru až po stovky milimetrů, s tím pak souvisí i počet maxim a minim, které lze odvodit, pokud známe vlnovou délku, na které budeme mřížku používat. Zpravidla se u senzorů jedná o vlnové délky v pásmu 1510 -1590 nm, ale existují i senzory používané v pásmu 850 nm.

Světlo vedené vláknem prochází mřížkou, nicméně vlnová délka, která vyhovuje tzv. Braggově podmínce je odražena zpět.

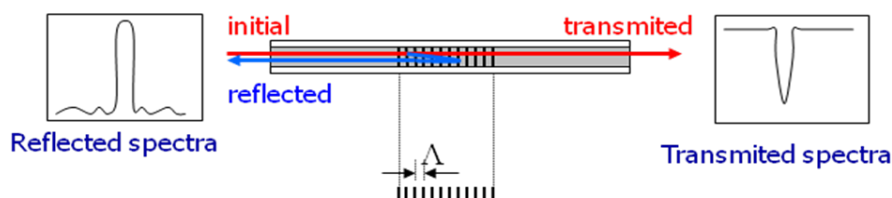


Obrázek 2.3.1. Princip braggovské mřížky

Braggova podmínka je dána rovnicí

$$\lambda_r = 2n_{eff} \Lambda$$

kde λ_r je odražená vlnová délka, n_{eff} je efektivní index lomu a Λ je perioda mřížky. Detekované odražené nebo přenesené spektrum pak vypadá schematicky tak, jak vidíme na obrázku 2.3.2.



Obrázek 2.3.2. Odražené a přenesené spektrum

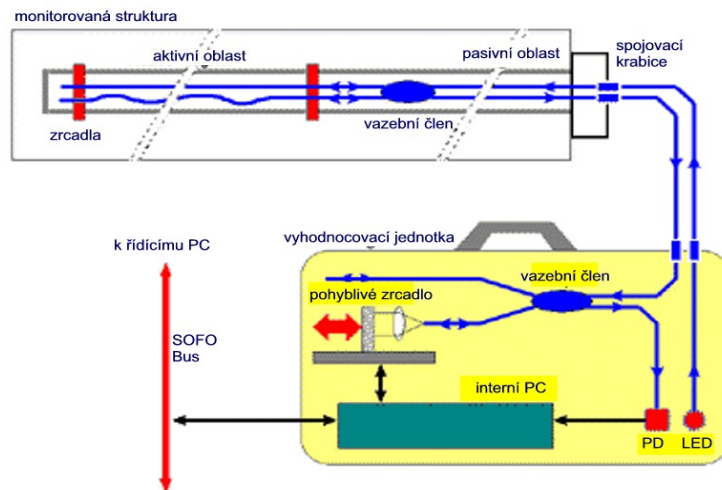
Pokud nyní podrobíme vlákno změnám teploty nebo mechanickému namáhání, změníme zároveň periodu mřížky a odrazí se světlo jiné vlnové délky. Takže

jsme po kalibraci schopni měřit teplotu, po odečtení vlivu teploty deformaci vlivem mechanického namáhání. Při vhodné konstrukci senzoru lze přeneseně měřit tlak, posun, vibrace a další veličiny.

Výhodou FBG technologie je možnost sdružovat jednotlivé senzory do řetízků, tj. na jednom vlákně zapojit do série více senzorů, popř. je zapojit paralelně přes dělič, neboť máme-li pásmo 1510-1590 nm a vybereme mřížky optimalizované pro různé vlnové délky, můžeme je v uvedeném pásmu sledovat současně. Otázka kolik mřížek lze sledovat současně na jednom kanále je pak závislá na tom, jak velký měřicí rozsah budeme pro měřenou veličinu požadovat, neboť se tento rozsah promítne do rozmezí vlnových délek, ve kterých se senzor, aby pokryl měřicí rozsah, bude pohybovat. Např. pokud uvažujeme pásmo 1510 – 1590 nm, je rozsah 80 nm. Pokud je posun vlnových délek ± 4 nm od středové hodnoty a 1 nm ponecháme na oddělení pásem dvou senzorů se sousední vlnovou délkou, pak můžeme na jednom kanále sledovat současně 8 senzorů (navržené pro 1515 nm, 1525 nm, 1535 nm, 1545 nm, 1555 nm, 1565 nm, 1575 nm a 1585 nm). Pokud však bude posun od středové vlnové délky pouze ± 2 nm, pak jich můžeme sledovat dvakrát tolik.

2.4. SOFO senzor na bázi interferometru

SOFO senzor je založen na principu interferometru a používá se k měření průměrné deformace mezi dvěma body. Vlastní senzor je tvořen dvěma vlákny, z nichž jedno je pevně přichyceno ve dvou bodech k měřené struktuře a druhé je použito volně. Tím je automaticky provedena kompenzace na vliv teploty, neboť obě vlákna se roztahují s teplotou identicky. Pokud dojde k deformaci struktury, je jedno z vláken deformováno, druhé, volné, deformováno není, tj. mění se délka jednoho ramene interferometru a tato změna se kompenzuje ve vyhodnocovací jednotce porovnáváním s nulovou hodnotou, která se do jednotky uloží v okamžiku instalace senzoru. Tím se v podstatě uvnitř jednotky mechanicky určí vzdálenost, o kterou došlo k deformaci.

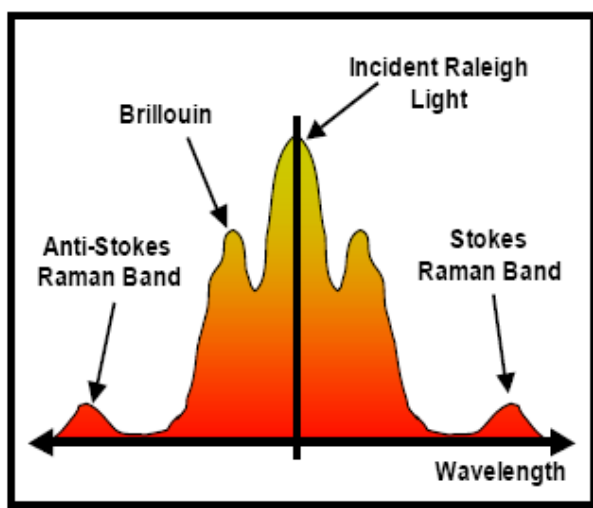


Obrázek 2.4.1. Princip senzoru SOFO

Výhodou SOFO senzoru je především vysoká rozlišovací schopnost, její nezávislost na délce senzoru a pak zcela unikátní možnost monitoringu deformace mezi dvěma body vzdálenými od sebe až 20 m.

2.5. DTS – Raman OTDR

K tzv. rozprostřeným (distribuovaným) sensorům se řadí na prvním místě distribuovaný senzor teploty, známý pod zkratkou DTS. Tento senzor využívá optické vlákno jako snímač, v tomto případě snímač teploty, který nám umožní jediným měřením získat několik tisíc hodnot teploty a v podstatě tak určit profil teploty podél optického vlákna. Jako u mnoha dalších optovláknových systémů i zde se svítí do optického vlákna a pak se analyzuje světlo, které se vrací zpět do vyhodnocovací jednotky. Zajímá nás chování signálu v bočních pásmech, nikoliv signál na stejné vlnové délce, jakou se do vlákna svítí. Vzdálenější pásma jsou označována jako Ramanova pásma a srovnávání signálu tzv. Stokesovy a Anti-Stokesovy složky dává informaci o teplotě.



Obrázek 2.5.1. Spektrální analýza signálu pro účely DTS a DTSS

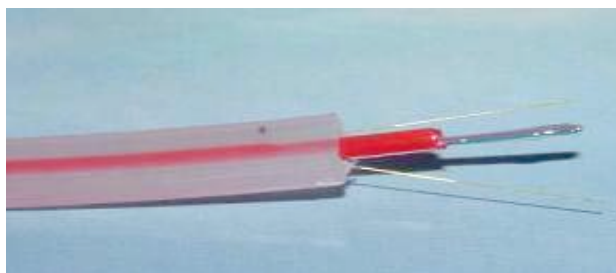
Technologie DTS nachází využití jako lineární požární systém v tunelech, metru a dalších prostorách, v geotechnice, monitoringu kabelů VVN, monitoringu produktovodů, na skládkách uhlí, kde hlídá možnost samovznícení apod. Systémy jsou konfigurovány podle aplikace, podle toho, zda je prioritní rychlá reakce, nebo vysoká přesnost a také podle toho, o jakou vzdálenost se jedná.

2.6. DTSS – Brillouin OTDR

Podobně jako systémy DTS také systémy DTSS, tj. systémy které jsou schopny kromě teploty snímat také mechanické namáhání vlákna podél jeho podélné osy, patří mezi rozprostřené systémy. K vyhodnocení se používají boční pásma blíže k nosné vlnové délce, tzv. Brillouinova pásma. U systémů DTSS je snímán integrální vliv teploty a namáhání a pokud chceme snímat pouze jednu z obou veličin, musíme najít způsob, jak to zařídit. Zpravidla se používá optický kabel, který je schopen jedno vlákno zafixovat ke struktuře a přenášet na něj deformace struktury a druhé, které je volné, tj. žádné namáhání se na něj nepřenáší a tudíž jsou veškeré změny způsobeny pouze teplotou. Tyto změny způsobené teplotou pak lze odečíst od změn způsobených na prvním vlákně oběma vlivy a získat tak informace o změnách způsobených pouze namáháním vlákna.

Systémy DTSS jsou využívány především v geotechnice a ve stavebnictví, délka vlákna bývá zpravidla několik set metrů nebo několik kilometrů a rozlišovací schopnost 1 m.

DTSS technologie však nemůže používat standardní optické kabely, protože je zapotřebí, aby se na vlákno přenášelo mechanické namáhání. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.5., optické kabely obsahují tahové prvky a jsou konstruovány tak, aby se na vlákno žádné mechanické namáhání nepřenášelo. Takže konstrukce kabelu vhodná pro DTSS technologii je velmi unikátní a především způsobuje enormní nárůst útlumu vlákna, což limituje layout kabelu při jeho instalaci.



Obrázek 2.6.1. Speciální kabel pro účely technologie DTSS

2.7. Senzor na bázi SWI

Tento senzor na první pohled připomíná technologii DTSS s tím rozdílem, že maximální vzdálenost do které můžeme měřenou veličinu sledovat je 10 m (resp. 50 m), ale zato s rozlišovací schopností cca 1 cm. Princip je založený na SWI technologii (swept wavelength interferometry) a jako i v případě DTSS technologie je nutné rozlišit vliv působení teploty a vliv působení mechanického namáhání na vlákno. Rozlišovací schopnost předurčuje tento senzor pro aplikace v letecké technice, energetice, především v oblasti konstrukce větrných elektráren, v oblasti generátorů, motorů, detekce skrytých vad, analýze pevnosti apod.

2.8. DAS – distribuovaný akustický senzor

Další z tzv. rozprostřených senzorů je DAS, senzor který umožňuje do vzdálenosti až 40 km s prostorovým rozlišením 1 m detekovat zvuk podél optického vlákna. DAS znamená distribuovaný akustický senzor. DAS technologie vyhodnocuje tzv. Rayleighův rozptyl, čili stejnou složku rozptýleného světla, jako obvyklé OTDR, ale způsob vyhodnocení se liší. Každá akustická aktivita vytváří akustickou energii, která je absorbována molekulami v jádře vlákna, což způsobuje fázový posuv v zpětně rozptýleném světle a je

detekován vyhodnocovací jednotkou a analyzován. Aplikace tohoto typu senzoru jsou především v ochraně produktovodů, v zabezpečovací technice (ochrana objektů, hranic, infrastruktury) a v oblasti železniční dopravy (pohyb vlakových souprav, jejich směr, rychlost apod.) Výhodou je především to, že lze jako detekční vlákna využít standardní jednojádrová optická vlákna v již položených telekomunikačních trasách.

2.9. Senzor elektrického proudu

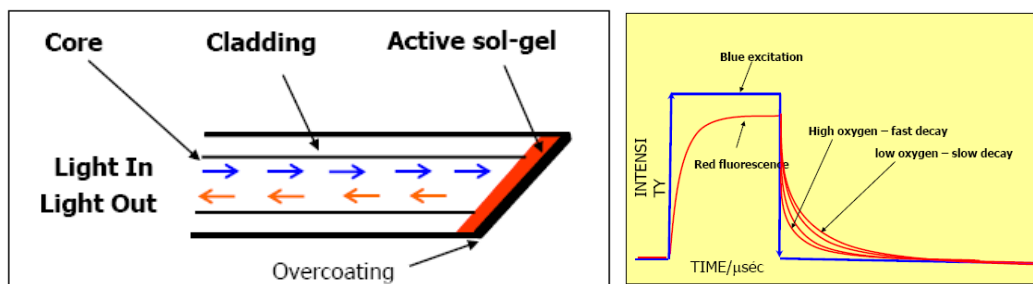
Senzor založený na Faradayově jevu je využíván v energetice k měření proudu protékajícího např. vývody z generátoru a to v rozsahu 20-500 kA s přesností 0.1%. Jeho hlavní předností je modulární konstrukce a jednoduchá instalace, čímž se zabrání několikatýdenní instalaci až tunu vážícího konvenčního měřícího systému.

2.10. Optický mikrofón

Akustické vlny způsobují vibrace tenké membrány a pasivní detekce těchto vibrací přes změny světelné intenzity odrážené od membrány a následná poměrně jednoduchá analýza a zpracování elektronikou jsou základem tohoto senzoru. Dielektrická povaha senzoru dává možnosti utajení, tedy aplikací v oblasti odposlouchávací techniky a zároveň imunita k elektromagnetickým zářením předurčuje optický mikrofón k využití v energetice a také v medicíně, např. pro komunikaci lékařů s pacientem podrobovaným vyšetření jako je magnetická rezonance, tomograf apod.

2.11. Senzor parciálního tlaku kyslíku

Senzor parciálního tlaku kyslíku je založen na rychlosti poklesu fluorescence v materiálu naneseném na konci optického vlákna (zpravidla rutheniový komplex zabudovaný do vrstvičky ormoceru), přičemž rychlost poklesu fluorescence je funkcí parciálního tlaku kyslíku.



Obrázek 2.11.1. Princip činnosti senzoru parciálního tlaku kyslíku

Velkou výhodou tohoto senzoru je skutečnost, že se kyslík během měření nespotřebovává, což konvenční systémy dělají a dále že existuje celá řada různých provedení pro různá prostředí. V neposlední řadě lze měřit parciální tlak kyslíku jak v plynné fázi, tak také v případě, že je rozpuštěn v kapalině.

3. REÁLNÉ APLIKACE OPTOVLÁKNOVÝCH SENZORŮ

Ing. Michal Mazanec

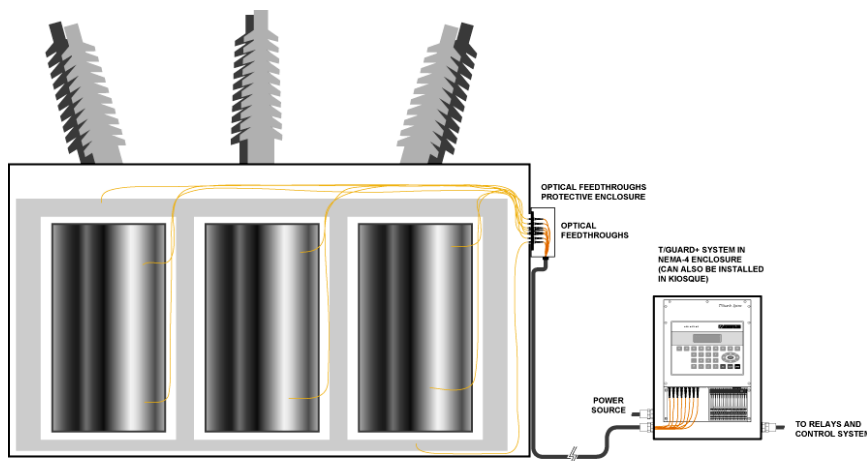
Ve třetí části jsou přiblíženy tři reálné aplikace optovláknových senzorů. Jsou popsány konkrétní provedení a zdůrazněny výhody nasazení optovláknových senzorů.

3.1. Monitoring teploty vinutí transformátorů

Jako příklad průmyslového využití optovláknových senzorů může sloužit aplikace, ve které jsou použity bodové senzory teploty (viz 2.2.) pro monitorování teploty vinutí uvnitř transformátorů VVN. Smyslem monitoringu vinutí je optimalizovat zatížení transformátoru s ohledem na jeho životnost, tj. nezkrátit dobu životnosti jeho přetěžováním. Jedná se zpravidla o transformátory s výkonem nad 100 MVA a měření probíhá přímo ve vinutí v olejové vaně. Neexistuje jiný způsob, jak teplotu vinutí měřit, existují pouze matematické modely, které jsou schopny popsat děje uvnitř transformátoru na základě znalostí o proudění oleje a měření jeho teploty v expanzní nádobě umístěné na víku transformátoru.

Proč je tak důležité mít informace o teplotě vinutí? Protože životnost transformátoru je limitována mechanickou pevností izolace a ta je ovlivněna teplotou, které je dlouhodobě vystavena. Zvýšení teploty izolace o 7°C má za následek zkrácení její životnosti na polovinu. Čím je transformátor více zatížen, tím vyšší teplota vinutí, takže je třeba mít pod kontrolou, že teplota nebude vyšší než je stanovená maximální teplota izolace, tj. že se neurychlí její stárnutí a tím nezkrátí životnost celého transformátoru.

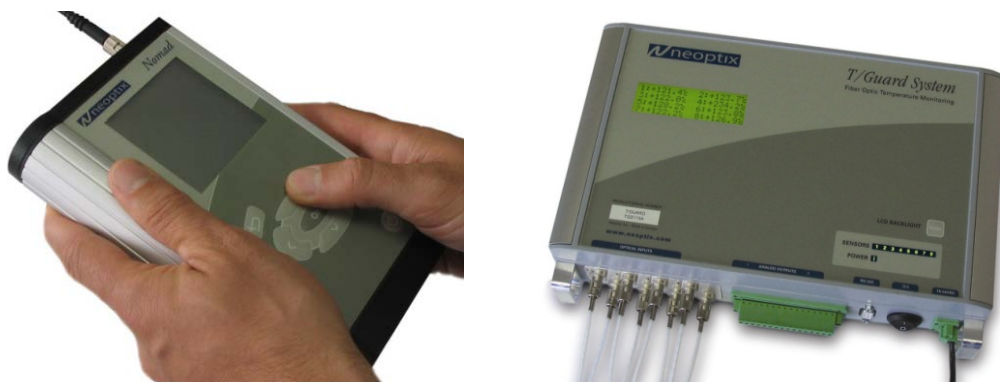
Dnešní optovláknové teploměry jsou i z hlediska instalace do transformátoru dodávány jako stavebnice, která se skládá z následujících prvků: transformátorová sonda, optická průchodka, která převádí signál zevnitř olejové vany do venkovního prostředí, přechodová deska s připravenými otvory pro montáž optovláknových průchodek, prodlužovací kabely a vyhodnocovací jednotka. Typická instalace vypadá následovně:



Obrázek 3.1.1. Schéma instalace osmi měřících bodů do transformátoru VVN

Typická teplota uvnitř vinutí transformátoru je cca 60°C, transformátorová sonda má rozsah teplot od -80°C do +200°C s přesností +/- 1°C, délka sondy může být až 25m (ale s prodlužovacím kabelem může být měřící bod až 500 m od vyhodnocovací jednotky) a rychlost odezvy je 0.25 s. Nicméně monitorování teploty vinutí probíhá zpravidla v určitých intervalech, rychlost měření není důležitá, protože pak vznikají velké nároky na kapacitu ukládaných dat a přitom děje probíhající v transformátoru jsou poměrně velmi pomalé.

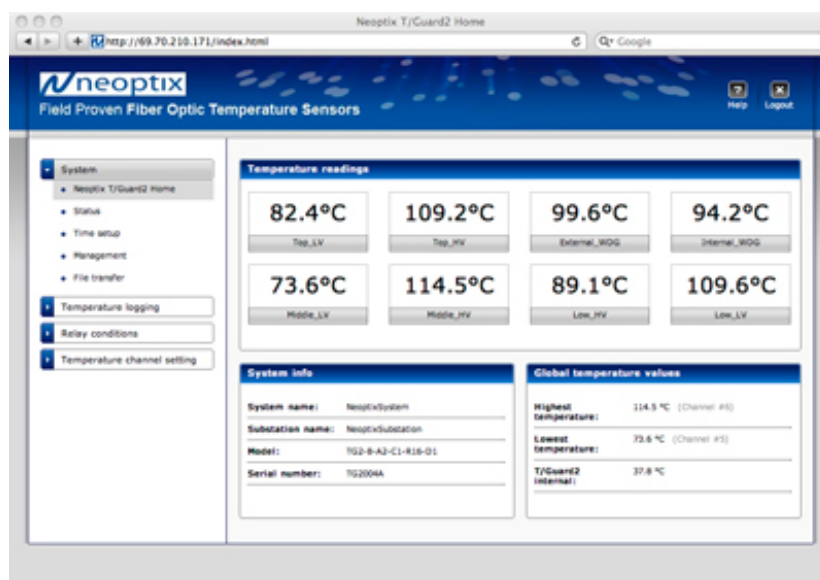
Jednotky používané pro měření teploty lze rozdělit na přenosné jednokanálové jednotky pro servis a instalaci sond do vinutí a pak provozní vícekanálové jednotky, které pak monitorují on-line všechny nainstalované sondy.



Obrázek 3.1.2. Vyhodnocovací jednotky optovláknového teploměru

Přizpůsobení se této aplikaci se podepsalo i na vývoji jednotek během posledních deseti let. Vývoj se soustředil v podstatě do vybavení jednotky všemi možnými komunikačními kanály, rozhraními a protokoly tak, aby byl schopen komunikovat s různými nadřizenými systémy. Před deseti lety byl

schopen komunikovat po RS232 a dávat analogový signál na výstupu, dnes je vybaven sběrnicí RS485 half duplex nebo full duplex podle přání zákazníka a komunikuje přes MODBUS, DPN 3.0 popř. přes Ethernet protokolem TCP/IP. Takže je jednotka konfigurovatelná odkudkoliv a zároveň i naměřená data mohou být sledována ze vzdáleného místa.



Obrázek 3.1.3. Měření teploty prostřednictvím protokolu TCP/IP

Nasazení optovláknových teploměrů mělo za následek zvýšení zisku generovaného zvýšeným zatížením transformátoru, úsporu plynoucí z delší životnosti transformátoru, která oddaluje nutné investice do budování nových kapacit, slouží jako prevence katastrofické havárie způsobené přetížením nebo nenadálou událostí. Dále slouží výrobci transformátoru jako možnost ověření optimální konstrukce transformátoru a zároveň lze dokladovat zákazníkovi ověření proklamovaných parametrů při oteplovací zkoušce.

3.2. SHM - monitoring stavu stavebních konstrukcí

Tato část představuje aplikace všech senzorů používaných pro monitorování deformací, především senzorů na bázi FBG technologie, SOFO senzorů, DTS a DTSS senzorů.

První část aplikací je věnována monitoringu stavebních konstrukcí jako jsou mosty, tunely, ale i stožáry vysokého napětí pomocí semi-distribuovaných senzorů, tj. řetízků tvořených jednotlivými FBG senzory. FBG senzory mohou

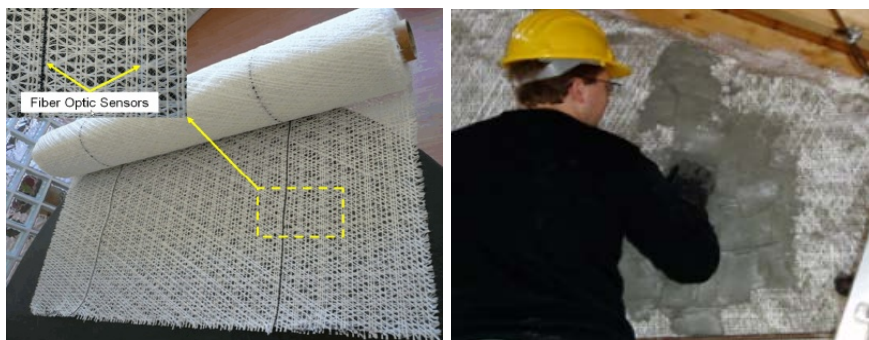
být použity stejně jako SOFO senzory pro měření průměrné deformace přes úsek definovaný dvěma fixními body, nebo jako bodové senzory, kde jsou fixovány na strukturu a v tom případě měří mechanické napětí v materiálu v daném bodě. Schéma instalace na železničním mostě je na následujícím obrázku:



Obrázek 3.2.1. Monitoring železničního mostu

Monitoring mostu optovláknovým systémem on-line nahrazuje nutnost sledovat most v pravidelných časových intervalech geodeticky. Oproti konvenčním sensorům je instalace na mostě pasivní, nepotřebuje napájení z elektrické sítě, neboť monitoring je prováděn světlem, přičemž jednotka je umístěna na nádraží, které je vzdáleno cca 1400 m od mostu. K propojení instalace na mostě s vyhodnocovací jednotkou slouží standardní jednovidová optická vlákna.

Jiná možnost je monitoring budov zpevněných speciální geotextilií (se zabudovanými optovláknovými senzory) tak, aby lépe odolávaly přírodním katastrofám, jakými jsou např. zemětřesení, bouře apod. Tato technologie je vhodná především pro památkově chráněné objekty v seismicky nestabilních oblastech. Aplikace geotextílie je možná pod omítku, takže na budově nakonec není zpevňující geotextílie vidět.



Obrázek 3.2.2. Instalace zpevňující geotextílie se senzory na budovu

Provedené simulace zemětřesení dokazují, že zpevňující geotextílie má na stav budovy během zemětřesení velmi pozitivní účinek a senzory zaznamenají i drobné praskliny ve zdivu.

Kromě toho vyžadují některé aplikace speciální konstrukci senzorů, resp. jejich ukotvení, tak, aby se přizpůsobily konkrétním požadavkům. Výhodou optovláknových senzorů je také možnost instalace již ve stádiu, kdy je betonová směs ještě v tekutém stavu. Senzory se zalijí do struktury a je možno monitorovat strukturu již ve stádiu vytvrzování betonu a pak během všech zkoušek a testů a nakonec během provozu.

Distribuované senzory mechanického namáhání a teploty jsou využívány především v geotechnice při monitorování geotechnických vrtů, při monitoringu sesuvů svahů, při měření konvergence v tunelech apod.

3.3. Aplikace v železniční dopravě

Aplikace v železniční dopravě jsou aplikace, které dávají velký potenciál, pokud budou nasazeny ve větším množství. FBG senzory se instalují přímo na kolejnice a to buď nalepením nebo navařením a fungují jako senzory bodové. Pokud se nainstalují dva senzory nad sebe, pak jeden zpravidla bývá při průjezdu vlakové soupravy natahován a druhý naopak smršťován. Z těchto údajů lze analyzovat údaje o průhybu kolejnic. Nicméně pokud se FBG senzory instalované na kolejnicích sledují dynamicky, dávají užitečné informace o průjezdu vlakových souprav a mohou být využity pro:

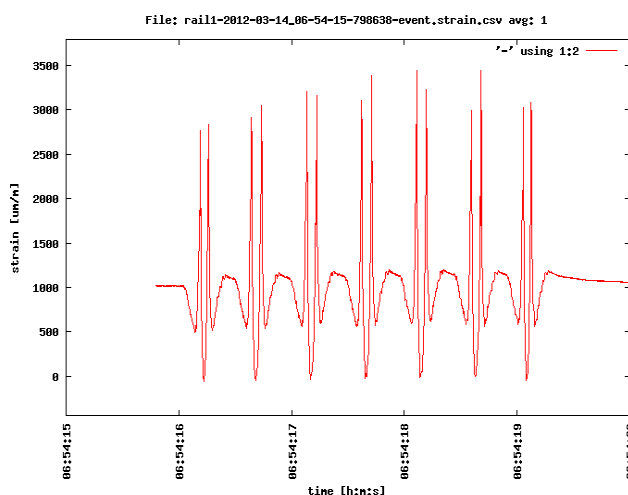
- ❖ Počítání náprav
- ❖ Měření rychlosti vlaků

- ❖ Určení směru, kterým se souprava pohybuje
- ❖ Identifikace vlaků
- ❖ Management provozu na železnici



Obrázek 3.3.1. FBG senzor navařený na kolejnici

Na dalším obrázku je názorně vidět, jak vypadá záznam průjezdu vlaku. Každá vlaková souprava vytváří jedinečný otisk, v závislosti na hmotnosti vagónů, počtu a vzdáleností náprav, v závislosti na počtu vagónů atd. ne nepodobný čárovému kódu .

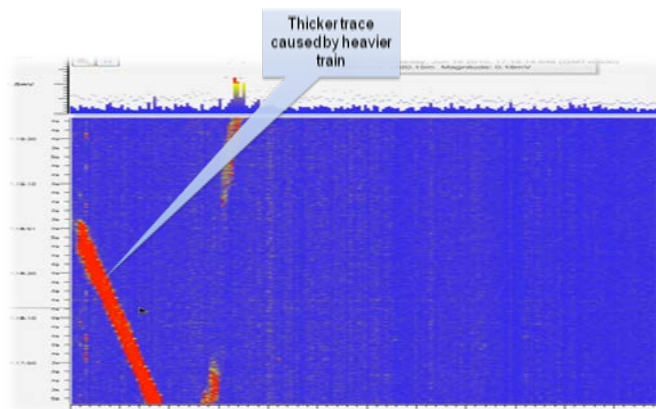


Obrázek 3.3.2. Záznam průjezdu vlaku

Takový záznam lze nejen použít k počítání náprav, přičemž je systém založený na FBG technologii imunní vůči všem elmag. zářením na rozdíl od

konvenčních detektorů, které mají problém s elmag. brzdovými systémy, ale lze je v kombinaci s dalšími senzory umístěnými na trase použít pro monitoring směru a rychlosti vlaku a dále pro identifikaci vlaku.

Kromě toho lze však využít také rozprostřený akustický senzor (DAS) a to ke sledování pohybu vlakových souprav po trasách, dále ke sledování osob, které se v blízkosti trasy pohybují a nakonec i ke sledování ataků na železniční infrastrukturu, především sledování možných krádeží měděných kabelů.



Obrázek 3.3.3. Záznam průjezdu vlaku systémem DAS

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] firemní literatura Neoptix Inc., Quebec, Canada
- [2] firemní literatura Lumasense Technologies Inc., Santa Clara, USA
- [3] Wikipedia, free encyklopedia
- [4] firemní literatura Smartec S.A., mano, Swiss
- [5] firemní literatura Sensornet Ltd., Elstree, UK
- [6] firemní literatura Fotech Solutions, Church Crookham, UK
- [7] firemní literatura Optoacoustics, Moshav Mazor, Israel
- [8] firemní literatura Ocean Optics BV, Duiven, Holland
- [9] materiály vytvořené v rámci projektu Polytect

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií

CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky
VUT v Brně
Kolejní 2906/4
612 00 Brno
Česká Republika

<http://www.crr.vutbr.cz>

info@crr.vutbr.cz