

# Optovláknové senzorické systémy

Radim Šifta

Článek pojednává o optických senzorických systémech, které využívají optická vlákna k měření různých veličin. V úvodu článku jsou popsány obecné vlastnosti těchto senzorů a jejich rozdělení. V dalších dvou kapitolách jsou popsány dvě hlavní skupiny senzorů, a to distribuované senzory a bodové senzory. Zvláštní pozornost je věnována bodovému FBG (*Fiber Bragg Grating*) senzorům a jejich využití.

## 1. Úvod

Optické vlákno je dielektrické přenosové médium. To prostřednictvím světla přenáší optický signál ve směru své podélné osy. Optická vlákna, nejčastěji skleněná, se v současné době využívají v telekomunikačních systémech, protože umožňují dosáhnout velké šířky přenosového pásma (Tb/s). Kromě přenosu digitálních a analogových signálů je možné optické vlákno s výhodou použít také k měření mnoha neelektrických veličin.

Optovláknové senzorické a monitorovací systémy nabývají stále většího významu, neboť mají v porovnání s konvenčními měřicími systémy mnoho výhod, které plynou zejména z principu optických vláken – optické vlákno je dielektrikum, tudíž senzory na bázi optických vláken jsou zcela imunní proti elektromagnetickému záření a galvanicky oddělují senzor od vyhodnocovací elektroniky. Vzhledem k malému útlumu (0,2 dB/km při 1 550 nm) je možné senzor umístit několik jednotek až desítek kilometrů daleko od vyhodnocovací jednotky. Senzory je navíc možné multiplexovat a prostřednictvím jedné vyhodnocovací jednotky obsluhovat až několik stovek senzorů.

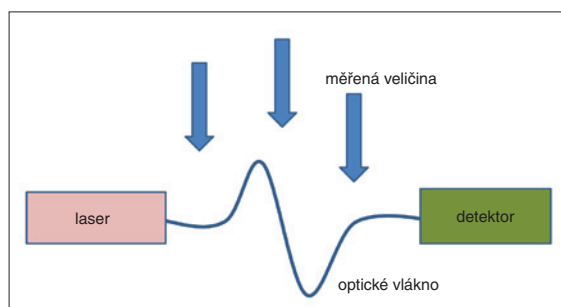
Pomocí optovláknových senzorů lze měřit zejména [1]:

- teplotu,
- mechanické napětí a deformace,
- tlak kapalin a plynů včetně podtlaku (vakua),
- vibrace, posuv, rotaci, náklon nebo zrychlení,
- vlhkost,
- viskozitu,
- pH,
- intenzitu elektromagnetického pole.

Díky velké škále měřených veličin nalezou optovláknové senzory mnoho možností využití. Vždy je však důležité, aby byly použity tam, kde nelze veličiny měřit konvenčním způsobem, jinak je v podstatě není možné pro výrazně vyšší cenu prosadit. Nejčastěji je naleznou uplatnění v těchto oblastech [2]:

- dopravní infrastruktura (zařízení pro vážení za pohybu),
- železniční infrastruktura (sledování pohybu vlakových souprav),

- sledování technického stavu konstrukcí (SHM – *Structure Health Monitoring*),
- energetika (jaderné elektrárny, rozvodné sítě vvn),
- pokročilé měřicí úlohy v průmyslu (měření teploty nebo mechanického napětí),
- monitorování produktovodů (ropovody, plynovody),
- měření ve stavebnictví a geologii (pohyb mostních konstrukcí, budov nebo skalních útvarů),
- vodní díla (monitorování hrází přehrad),
- letectví a kosmonautika.



Obr. 1. Blokové schéma distribuovaného senzorického systému

## 2. Rozdělení optovláknových senzorů

Optovláknové senzory je možné rozdělit z mnoha hledisek. Za základní kritérium lze považovat to, zda senzory využívají k přenosu informace optické vlákno. Znamená to, že změněná hodnota dané veličiny je přenášena po optickém vlákně do vyhodnocovací jednotky, kde je informace zpracována. Senzory tohoto typu jsou označovány jako extrinsické. Je-li optické vlákno využito pouze jako detektor a změněná hodnota je přenášena po jiném médiu, je tento typ senzorů označován jako intrinsický [2].

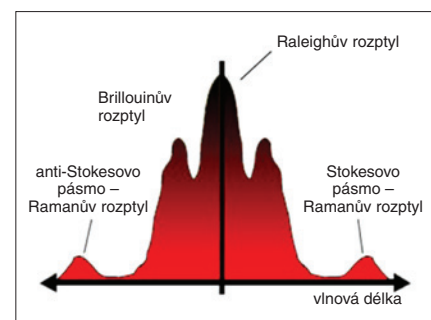
Jiné dělení optovláknových senzorů je podle prostorového uspořádání:

- bodové senzory,
- distribuované senzory,
- semidistribuované senzory.

## 3. Distribuované senzory

Distribuované senzory měří danou veličinu v celé délce svého optického vlákna. Uplatnění tak nalezou tam, kde je třeba kontinuálně podél vlákna měřit např. teplotu

nebo akustické vibrace. Obecně se u těchto typů senzorů vyhodnocuje zpětný rozptyl. Rozlišují se při tom tři základní rozptyly – Rayleighův, Brillouinův a Ramanův. Zatímco Rayleighův rozptyl je na stejné vlnové délce jako dopředný optický signál, Ramanův rozptyl je frekvenčně posunut o 13 THz v tzv. Stokesově a anti-Stokesově pásmu; viz obr. 2. Brillouinův rozptyl je frekvenčně po-



Obr. 2. Zpětně rozptýlený optický signál [2]

sunut o 11 GHz. Výhodou uvedených systémů je možnost měřit mnoho událostí podél optického vlákna současně [2].

## 3.1 DTS – Distributed Temperature Sensor

Distribuovaný senzor teploty DTS využívá zpětný Ramanův rozptyl. Ramanův rozptyl je citlivý na okolní teplotu: jeho Stokesovo a anti-Stokesovo pásmo se při změně okolní teploty posouvá. Okolní teplota tak moduluje kmitočet Ramanova rozptylu.

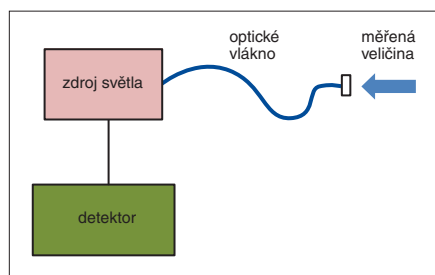
Distribuované senzory teploty založené na Ramanově rozptylu se nejčastěji využívají v lineárních požárních systémech, zejména v tunelech, v metru, produktovodech a dalších lineárních stavbách a v geotechnice. S výhodou je možné je použít též k monitorování kabelů vvn, protože jsou odolné proti elektromagnetickému záření. Běžně lze tyto senzory provozovat do 10 km, s prostorovým rozlišením 1 m a přesností měření teploty  $\pm 1$  K [2].

## 3.2 DTSS – Distributed Temperature Structure Sensor

Strukturální distribuované senzory teploty DTSS jsou velmi podobné senzorům DTS, na rozdíl od nich je však vyhodnocován signál zpětného Brillouinova rozptylu, který je kromě teploty citlivý také na vibrace. Tyto senzory nacházejí uplatnění především v geotechnice a stavebnictví. Délka senzoru obvykle bývá několik set metrů s prostorovým rozlišením do 1 m [3].

### 3.3 DAS – Distributed Acoustic Sensor

Distribuovaný akustický senzor DAS je založen na měření Rayleighova rozptylu. Dokáže detekovat, lokalizovat i klasifikovat zdroje akustických vibrací na vzdálenosti větší než 50 km. Prostorové rozlišení je dáno délkou vlákna a pohybuje se od centimetrů až po desítky metrů. Tyto senzory se používají zejména pro ochranu produktovodů a perimetrů – ochranu objektů, budov, hranic a kritické infrastruktury.



Obr. 4. Blokové schéma bodových senzorů

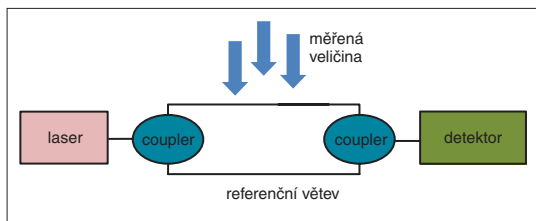
Další oblastí použití je monitorování vlakových souprav. Jako fyzický senzor je možné využít běžné jednovodičové telekomunikační vlákno i optický kabel. Současné telekomunikační optické trasy je tak možné použít pro detekci, lokalizaci a popř. i klasifikaci zdrojů vibrací, je-li kabel uložen maximálně 1 m pod povrchem země [3].

### 3.4 Interferometrické senzory

Optovláknové interferometrické senzory sledují rozdíl mezi dvěma optickými svazky, které prošly stejnými dráhami, ale ve dvou různých ramenech interferometru (obr. 3). Základem konstrukce fázových optovláknových interferometrických senzorů jsou vláknové interferometry – Machův-Zehnderův, Sagnacův, Michelsonův a Fabryho-Pérotův. Senzory modulují optickou vlnu, která prochází snímací částí vlákna. Při snímání veličiny nastává v místě, kde se mění index lomu vlákna, změna fáze světelné vlny. Interferometr využívá dvě ramena optických vláken, přičemž jedno rameno je referenční a druhé měřicí. Detektor interferometru zaznamenává signál, který vzniká interferencí dvou optických paprsků – z referenčního a měřicího ramena. Interferometrické senzory se používají pro velmi citlivé měření akustických signálů, tlaku, teploty, intenzity magnetického pole apod. [2].

### 4. Bodové senzory

Bodové senzory měří danou veličinu pouze v určité, většinou jen několik milimetrů až centimetrů dlouhé části vlákna, kde je vytvořena měřicí struktura. Obecně se bodové optovláknové senzory dělí podle toho, kde je světelné záření modulováno:



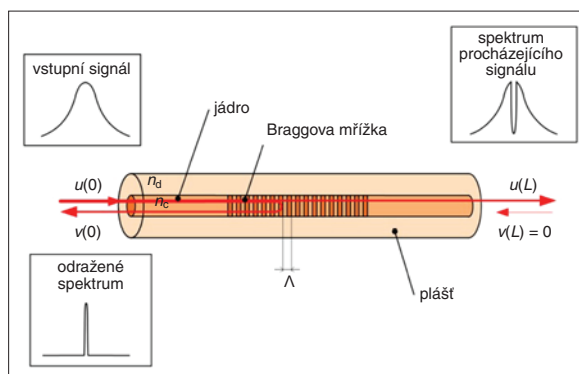
Obr. 3. Blokové schéma interferometrického senzoru

- senzory s vnější modulací, kde je světelné záření vyvázáno z vlákna ven, modulováno měřenou veličinou a znovu navázáno do vlákna,
- senzory s vnitřní modulací, kde se světelné záření moduluje v optickém vlákně.

V praxi se používá zejména druhá skupina senzorů – bodové senzory založené na difrakčních strukturách FBG (Fiber Bragg Grating) nebo FP rezonátorech (Fabry-Pérot).

### 4.1 Senzory založené na difrakčních strukturách

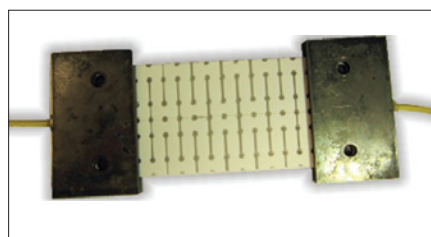
Vláknové mřížky (FBG) jsou tvořeny periodickou změnou indexu lomu jádra podél osy vlákna s periodou  $\Lambda$  a amplitudou  $\delta_n$ .



Obr. 5. Princip činnosti FBG [5]



Obr. 6. Ukázka senzorů teploty v pouzdech z korozi vzdorné oceli



Obr. 7. Ukázka FBG senzoru tahu

Tato periodická struktura tvoří rozložené Braggovo zrcadlo (Distributed Bragg Reflector – DBR), které váže procházející a odražené optické záření [4]. Vláknová mřížka tak periodicky mění fázi a intenzitu procházející nebo odražené světelné vlny. Braggova vláknová mřížka s naznačeným průběhem vstupních a výstupních signálů je schematicky znázorněna na obr. 5.

Vlnová délka, při které se světlo odráží s největší efektivitou, se nazývá Braggova rezonanční vlnová délka  $\lambda_{\text{Bragg}}$ . Závislost mezi Braggovou rezonanční vlnovou délkou a prostorovou periodou mřížky je dána vztahem [4]:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = \frac{n_{\text{eff}} \Lambda}{N} \quad (1)$$

kde:

$\lambda_{\text{Bragg}}$  (nm) je Braggova rezonanční vlnová délka,

$n_{\text{eff}}$  efektivní vidový index,

$\Lambda$  prostorová perioda mřížky (nm),

$N$  přirozené číslo vyjadřující řád periody mřížky.

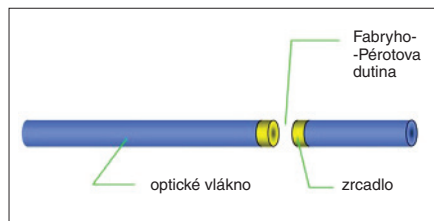
Zjednodušeně řečeno, vláknové mřížky fungují jako optické pásmové filtry – odrážejí optické záření o vlnové délce blízké Braggově rezonanční vlnové délce, záření ostatních vlnových délek propouštějí. Přenos mřížky je ale ve skutečnosti ovlivněn mnoha vstupními parametry a jejich vhodnou změnou lze dosáhnout požadované odezvy.

Struktury FBG se nejčastěji zapisují UV laserem pomocí bočního osvětlení skrze fázovou masku. Moderním způsobem je rovněž zápis metodou bod po bodu femtosekundovým laserem. Oba způsoby zápisu FBG mají charakteristické parametry, výhody a nevýhody.

Pouze FBG fungují jako pásmové filtry, což se hojně využívá v telekomunikačních sítích v systémech vlnového multiplexu WDM (Wavelength Division Multiplex). Zde je však nutné zajistit, aby na FBG nebylo přenášeno žádné mechanické napětí a okolní teplota byla konstantní, aby nedocházelo ke změně Braggovy vlnové délky  $\lambda_{\text{Bragg}}$ .

Tu je totiž možné měnit právě změnou okolní teploty nebo mechanickým protažením či smrštěním (obr. 8), protože se změní perioda mřížky. Tento princip je využit v senzorech s FBG, kde je Braggova vlnová délka modulována měřenou veličinou. Vhodnou úpravou pouzdra konkrétního senzoru a kalibrací je možné při použití FBG senzoru měřit teplotu, tlak, průtah, mechanické deformace, vibrace, náklon, zrychlení apod.

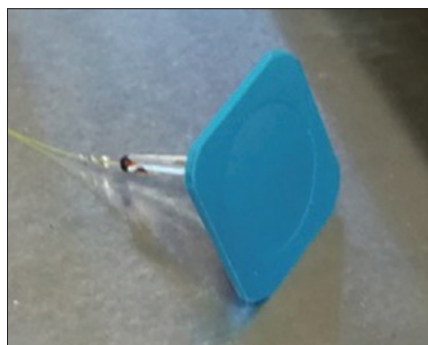
Spektrální citlivost FBG na teplotu je 10 pm/K, citlivost na tah je 1,3 pm/μe (microstrain)<sup>1)</sup>. Obecně platí, že jestliže se FBG senzor využívá k měření jakékoliv jiné veličiny než teploty, je nutné provést teplotní kompenzaci, tzn. v pouzdře jednoho senzoru (např. senzoru průtahu) musí být jedna



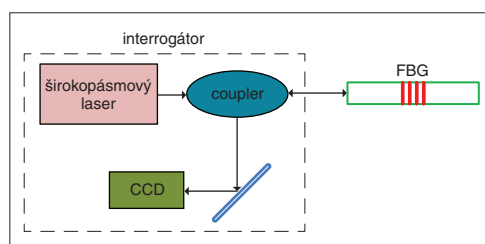
Obr. 9. Princip FP rezonátoru

FBG fixovaná pro měření průtahu a druhá musí být volná, nefixovaná, určená k měření teploty. Kompenzace je pak provedena softwarově ve vyhodnocovací jednotce, tzv. interrogátoru, popř. v PC.

Senzory založené na Fabryho-Pérotových rezonátorech mohou pro vytvoření samotného rezonátoru využívat různé metody. Nejčastěji je FP rezonátor vytvořen na rozhraní sklo-vzduch. FP rezonátory je možné stejně jako FBG vyhodnocovat spektrálně, interferometricky (FP interferometr), popř. měřením odraženého výkonu. FP rezonátory se často použí-



Obr. 10. Senzor tlaku s FP rezonátorem s membránou LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramic)



Obr. 11. Blokové schéma interogátoru se širokospektrálním zdrojem světla a senzorem CCD

vají k měření tlaku, avšak s vhodnou úpravou pouzdra senzoru a membrány lze měřit také teplotu a mechanické napětí. Pro spektrální vyhodnocení je v podstatě měřena vzdálenost

konce vlákna od membrány, která se v důsledku působení vnější veličiny deformuje (obr. 9).

Pro spektrální vyhodnocování senzorů s FBG a FP rezonátory se používají interogátory neboli vyhodnocovací jednotky – často se lze setkat i s pojmem FBG analyzátor či evaluační jednotky. Všechna tato pojmenování označují zařízení, která jsou určena k vyhodnocování signálu ze senzorů založených na bázi FBG i FP rezonátorů.

FBG interogátory na rozdíl od optických spektrálních analyzátorů nebo spektrometrů obsahují vlastní zdroj optického záření, často širokospektrální zdroj ASE (Amplified Spontaneous Emission) nebo S-LED (Superluminescent Light-Emitting Diodes). Světlo z tohoto širokospektrálního zdroje se prostřednictvím splitteru nebo cirkulátoru šíří k FBG senzorům (obr. 11). Podle Braggovy vlnové délky použité FBG mřížky se optický signál odráží právě na této vlnové délce. Spektrum zpětně odraženého signálu tedy koresponduje s tvarem FBG mřížky. Odražený signál je v interogační jednotce vyhodnocen na fotodetektorech nebo snímačích CCD (Charge-Coupled Device).

Optovláknové senzorické systémy založené na FBG senzorech a interogátorech mají mnoho výhod (zvláště v porovnání s přenosem elektrického signálu), které plynou ze sa-

<sup>1)</sup> Pozn. red.: Microstrain je poměrné prodloužení (průtah) v μm/m.

## Vědci, kteří přispěli ke zkoumání rozptylu světla v prostředí

Rayleighův rozptyl je pojmenován po Johnu Williamovi Struttovi, třetím baronu Rayleighovi (1842–1919). Byl to britský fyzik, profesor experimentální fyziky a ředitel Cavendishovy laboratoře na Univerzitě v Cambridgi. Zabýval se optikou a kmitáním, později zkoumal zvuk, vlnovou teorii, barevné vidění, elektrodynamiku, elektromagnetismus, rozptyl světla, proudění kapalin, hydrodynamiku, hustotu plynů, viskozitu a telekinézi. V roce 1894 objevil s W. Ramsayem při zkoumání hustoty plynů argon, v roce 1904 dostal za tento objev Nobelovu cenu. Byl také oblíbeným pedagogem a napsal několik učebnic. Se svou ženou Evelyn, sestrou významného britského politika a premiéra hraběte Balfoura, vychoval tři syny.

Ramanův rozptyl se jmenuje podle indického fyzika sira Chandrasekhary Venkаты Ramana (1888–1970). Byl profesorem na univerzitě v Kalkatě a později působil v Indickém vědeckém ústavu v Bengalúru. Zabýval se zejména akustikou a optikou. Rozptyl světla, který vzniká interakcí fotonů s vibračními a rotačními energetickými stavy atomů nebo molekul, objevil v roce 1928. V roce 1930 dostal za tento objev Nobelovu

cenu. Byl velmi aktivní v rozvoji vědeckého bádání v Indii a byl hrdý na svůj indický původ. Proto také nosil tradiční turban: nikoliv z náboženských, ale z národnostních důvodů (byl agnostikem a věřícím ateistou). Se svou ženou měl dvě děti.

León Brillouin (1889–1969) byl francouzský fyzik, který se zabýval kmitáním atomů v krystalech a jeho šířením a interakcemi světla s akustickými vlnami, při nichž dochází ke změně vlnové délky (Brillouinův rozptyl). Kromě toho studoval šíření rádiových vln atmosférou, kvantovou mechaniku, fyziku pevných látek (jmenují se po něm Brillouinovy zóny) a teorii informace, kde razil pojem negentropy – negativní entropie (objevený Erwinem Schrödingerem) a hledal spojitost mezi fyzikou pevných látek a informatikou. Před první světovou válkou působil v Mnichově (1912 až 1913). Za války musel narukovat do francouzské armády. Po válce pracoval na Pařížské univerzitě a v dalších předních francouzských laboratořích a vládních institucích. Po přepadení Francie nacistickým Německem roku 1940 odešel jako člen vlády nejdříve z Paříže do Vichy a koncem roku, protože jeho žena byla Židovka,

s ní emigroval do USA, kde žil až do konce svého života v roce 1969. Zde se podílel mj. na výzkumu radarů na Kolumbijské univerzitě, přednášel aplikovanou matematiku na Harvardově univerzitě a pracoval pro IBM.

Sir George Gabriel Stokes (1819–1903) byl irský matematik, fyzik a teolog. V letech 1849 až 1903 byl profesorem matematiky na Univerzitě v Cambridgi. Ačkoliv je znám zejména jako zakladatel hydrodynamiky (je spoluautorem pohybové rovnice tekutin, tzv. Navierovy-Stokesovy rovnice, a jmenuje se po něm jednotka kinematické viskozity – stokes), pracoval i v oboru optiky a je po něm pojmenován Stokesův zákon: vlnová délka vyzářeného fotoluminiscenčního záření je větší než vlnová délka budícího záření. Ve skutečnosti bylo jen málo oborů fyziky, jimž by se G. G. Stokes nevěnoval; byl též žadáným přednášejícím. Z teologické oblasti je známá jeho kniha Natural Theology. Ačkoliv se považoval za vědce neschopného manželského života, nakonec se oženil a měl se svou ženou pět dětí. Na konci svého života žil u své dcery, která ho jako jediná z jeho potomků přežila (tři potomci zemřeli v dětství, syn ve třiceti letech).

motného principu přenosu optického signálu optickým vláknem. Optické vlákno je nevodivé – dielektrické, a je tudíž zcela imunní proti elektromagnetickému záření. Vláknové senzory je proto možné použít v prostředí se silným rušením i v prostředí s nebezpečím výbuchu. Vzhledem k malému vložnému útlumu optického vlákna lze senzory umístit až několik kilometrů od vyhodnocovací elektroniky bez ztráty kvality signálu. Mezi další výhody patří i malé rozměry a hmotnost, dlouhodobá stabilita parametrů v širokém rozsahu pracovních teplot a možnost multiplexování velkého množství senzorů [5].

Měřená vlnová délka je převáděna na požadovanou veličinu různými postupy vyvinutými na míru dané úloze. Stejně tak se pouzdra senzorů přizpůsobují konkrétnímu použití. Nejčastěji se FBG senzory užívají k měření teploty, kde změna vlnové délky o 1 pm odpovídá změně teploty přibližně 0,1 K. Často se rovněž měří průtah (*strain*), kde změna vlnové délky o 1 pm odpovídá protažení nebo zkrácení přibližně 1,3  $\mu\text{e}$ .

## 5. Závěr

Většina čtenářů zná elektrické, popř. elektromechanické senzory teploty, tlaku apod. Optovláknové senzory, které dosud stály trochu stranou, však rychle nabývají na významu. Běžné elektromechanické snímače jsou mnohdy v náročných úlohách nepoužitelné, a proto se optovláknové snímače s výhodou uplatní tam, kde konvenční měřicí prvky není možné použít – např. termočlávkové snímače teploty v silně zarušeném prostředí. Článek souhrnně popisuje používané optovláknové senzory, jejich princip a použití. Autor věří, že článek pomůže rozšířit obzory čtenářů v této nové, perspektivní oblasti techniky.

### Literatura:

- [1] KERSEY, A. D. a A. DANDRIDGE. Applications of fiber-optic sensors. In: *Proceedings., 39<sup>th</sup> Electronic Components Conference* [online]. IEEE, 1989, s. 472–478 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1109/ECC.1989.77791. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/77791/>

- [2] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc., a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [3] RAJAN, Ginu. *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. ISBN 978-148-2228-250.
- [4] IOCCO, A. *Tunable fiber Bragg grating filters, chap. 2*. Lausanne, 1999. Ph.D. thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [5] KASHYAP, Raman. *Fiber Bragg gratings*. 2<sup>nd</sup> ed. Burlington: Academic Press, c2010. ISBN 978-012-3725-790.
- [6] HELÁN, Radek. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*. Brno, 2009, 128 s. Disertační práce. VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. František Urban, CSc.

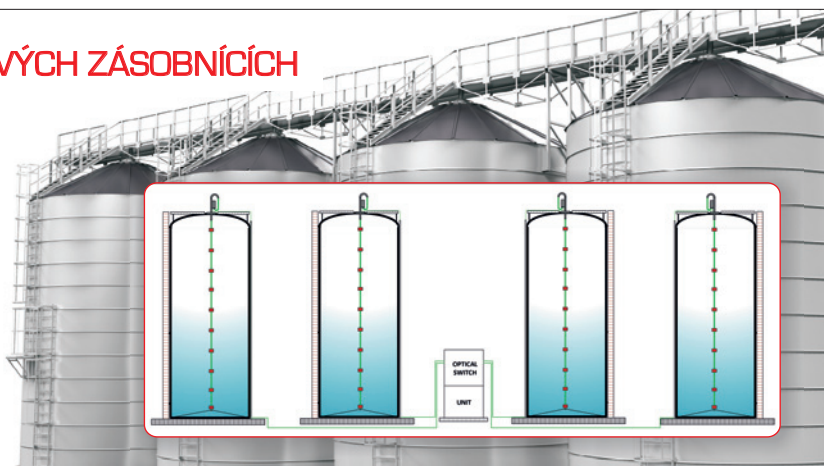
Ing. Radim Šifta, Ph.D.,  
NETWORK GROUP, s. r. o.,  
středisko speciální vláknové optiky  
([r.sifta@nwg.cz](mailto:r.sifta@nwg.cz))

## MĚŘENÍ TEPLoty V PRŮMYSLOVÝCH ZÁSOBNÍCÍCH

- Optovláknový kvazi-distribučovaný měřicí systém
- Variabilní délka senzoru až 30 m
- Měřicí rozsah -50 až 100 °C
- Samonosný systém imunní vůči ELM
- Vhodné do výbušných prostor
- Není nutné napájení v místě měření
- Umístění elektroniky až několik km od měřeného zásobníku

**NETWORK**  
group  
SPECIAL FIBER OPTICS

<http://sfo.nwg.cz>



## ► Komplex veletrhů Wire a Tube bude v prosinci

Odložené veletrhy Wire a Tube se uskuteční na výstavišti v Düsseldorfu ve dnech 7. až 11. prosince 2020. Návštěvníkům představí stroje a zařízení na výrobu a zpracování drátů, kabelů a trubek, hotoové produkty a služby. Pořadatelé očekávají 2 000 vystavovatelů z 50 zemí světa.

Hlavní témata, která průmyslové firmy chtějí na veletrzích prezentovat, jsou udržitelná výroba, produkty ohleduplné k životnímu prostředí, úspory energie a inovace. Messe Düsseldorf se soustředí také na

iniciativu ecoMetals Campaign: návštěvníci se budou moci zúčastnit speciálních komentovaných prohlídek představujících udržitelné technologie šetřící energii i suroviny a omezující emise.

V nomenklatuře veletrhu Wire nejsou jen samotné dráty, ale také kabely, včetně světlovodných, a technika pro měření, řízení a testování při výrobě drátů a kabelů. Specifitou, která upoutá pozornost, jsou stroje na svařování drátových konstrukcí. Představeny budou i stroje na výrobu produktů z drátů, např. pružin a pružných spon.

V nomenklatuře veletrhu Tube jsou kromě trubek všech velikostí, od potrubí pro těž-

bu a dopravu ropy a zemního plynu po plastové trubky a hadičky, a kromě strojů na jejich výrobu, včetně měřicí a řídicí techniky, také suroviny a polotovary nebo stroje na kontrolu a zpracování trubek. Část veletrhu bude věnována retrofitovaným strojům. Premiéru bude mít přehlídka strojů na řezání trubek Saw Expo, která bude uspořádána ve spolupráci s odborným veletrhem Saw Expo, jenž se jako samostatný specializovaný veletrh uskuteční 8. až 11. června 2021 ve Friedrichshafenu. Druhou premiérou bude přehlídka tepelných výměníků a techniky pro přenos tepla WTT-Expo (7. až 9. prosince 2020).

(Bk)