

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky



**Optovláknové senzorické technologie pro
zvýšení bezpečnosti železniční dopravy**

HABILITAČNÍ PRÁCE

2024

Ing. Marcel Fajkus, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou habilitační práci vypracoval samostatně za použití odborné literatury a dalších informačních zdrojů. Všechny použité zdroje jsou řádně citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci této práce.

Vyjádření k použití umělé inteligence

Při tvorbě této práce byl v omezené míře využit nástroj umělé inteligence (ChatGPT). Tento nástroj byl použit pro návrh koncepce a struktury práce a pro korekci některých textů. Všechny podněty získané prostřednictvím umělé inteligence byly důkladně analyzovány a následně přepracovány do podoby, která je v souladu s mým jazykovým a odborným projevem.

V Ostravě 21.8.2024

.....

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval za podporu všem, díky kterým mohla tato práce vzniknout. Primárně se jedná o doc. Ing. Jana Nedomu, Ph.D., prof. Ing. Miroslava Vozňáka, Ph.D., prof. Ing. Radka Martinka, Ph.D. a také Katedru telekomunikační techniky. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům za podporu a toleranci při realizaci této práce.

Abstrakt

Habilitační práce se zabývá základním výzkumem a praktickými aplikacemi optovláknových senzorů, zejména Braggovských mřížek v oblasti železniční dopravy. Práce poskytuje komplexní teoretický i praktický pohled na možnosti využití těchto senzorů pro zvýšení bezpečnosti a efektivity železničního provozu. V teoretické části je kladen důraz na edukační aspekty a na důkladný přehled existujících zabezpečovacích systémů a technologií používaných v železniční dopravě. V odborné části jsou prezentovány vlastní výzkumné výsledky, včetně vývoje nových metod zapouzdření senzorů a technik multiplexace, které umožňují jejich efektivnější nasazení. Zvláštní pozornost je věnována inovativnímu využití optovláknových senzorů pro monitorování a zabezpečení železničních přejezdů a traťových úseků. Práce tak přináší nové poznatky do oblasti aplikované optovláknové sensoriky a demonstruje jejich praktický potenciál pro zlepšení bezpečnostních standardů v železničním sektoru.

Klíčová slova: Optické vlákno; Braggovská mřížka; železniční doprava; bezpečnost;

Abstract

The habilitation thesis deals with basic research and practical applications of fiber optic sensors, particularly Bragg gratings, in the field of rail transport. The work provides a comprehensive theoretical and practical perspective on the possibilities of using these sensors to enhance safety and efficiency in railway operations. The theoretical part emphasizes educational aspects and a thorough overview of existing security systems and technologies used in rail transport. In the practical part, original research results are presented, including the development of new encapsulation methods for sensors and multiplexing techniques, which enable their more effective deployment. Special attention is given to the innovative use of fiber optic sensors for monitoring and securing railway crossings and track sections. The work thus brings new insights into the field of applied fiber optic sensor technology and demonstrates their practical potential to improve safety standards in the railway sector.

Key Words: Optical fiber; Bragg grating; interferometer; rail transport, safety

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Seznam tabulek	10
Seznam obrázků	12
1 Motivace	13
2 Aktuální stav v železniční dopravě	15
2.1 Motivace pro monitorování v železniční dopravě	16
2.2 Analýza možných rizik v železniční dopravě	16
2.3 Způsoby zajišťování bezpečnosti v železniční dopravě	17
2.4 Konvenční snímače v železniční dopravě	17
2.5 Železniční zabezpečovací systémy	22
3 Optovláknové snímače	27
3.1 Optické vlákno	27
3.2 Principy optovláknových senzorů	27
3.3 Optovláknové Braggovské mřížky	28
3.4 Optovláknový interferometr	30
3.5 Optovláknové snímače v železniční dopravě	32
4 Vlastní výsledky v oblasti zabezpečení železniční dopravy	34
4.1 Multiplexace a vyhodnocování FBG senzorů	34
4.2 Zabezpečení železničních přejezdů	40
4.3 Zabezpečení provozu na železničních tratích	46
5 Shrnutí a přínosy práce	55
6 Hlavní zařazené výsledky	56
6.1 Design of fiber Bragg grating sensor networks	57
6.2 PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas	69
6.3 Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě	81
6.4 Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání	91
6.5 Portable optical fiber Bragg grating sensor for monitoring traffic density	111

7	Pedagogická a vědeckovýzkumná činnost	124
7.1	Pedagogická činnost	124
7.2	Vědeckovýzkumná činnost	125
	Vlastní Bibliografie	127
	Bibliografie	131

Seznam použitých zkratk a symbolů

DAS	– Distributed Acoustic Sensing
DSTS	– Distributed Strain and Temperature Sensing
DTS	– Distributed Temperature Sensing
ELCF	– The European Level Crossing Forum
ERTMS	– European Rail Traffic Management System
ETCS	– European Train Control System
FBG	– Fiber Bragg Grating
FRMCS	– Future Rail Mobile Communications System
FWHM	– Full Width at Half Maximum
GSM-R	– Global System for Mobile Communications – Railway
LED	– Light-Emitting Diode
LEU	– Lineside Electronic Unit
OSA	– Optical Spectrum Analyzer
PD	– Photodetector
RBC	– Radio Block Centre
SLED	– Superluminescent Diode
SŽ	– Správa železnic
α_Λ	– koeficient teplotní roztažnosti
α_n	– teplotně optický koeficient
λ	– vlnová délka
λ_B	– Braggovská vlnová délka
Λ	– perioda změn
ϕ	– fázový posuv světelné vlny
ε	– deformace
$\Delta\lambda_B$	– změna Braggovské vlnové délky
$\Delta\varepsilon$	– změna deformace
ΔT	– změna teploty
c	– rychlost šíření světla ve vakuu
C	– přeslech prvního řádu
$FWHM_{FBG}$	– šířka odrazného spektra FBG
$FWHM_{LED}$	– šířka spektra LED
GB	– ochranné pásmo
GB_{min}	– minimální ochranné pásmo
I	– intenzita světelného záření
k	– citlivostní koeficient Braggovské mřížky

L	– délka optického vlákna
MR_N	– negativní měřicí rozsah
MR_P	– pozitivní měřicí rozsah
n	– index lomu
n_{eff}	– efektivní index lomu
N_{TDM}	– kapacita časového multiplexu
N_{WDM}	– kapacita vlnového multiplexu
ν	– Poissonův poměr
p_{11}	– komponenta napětově-optického tenzoru
p_{12}	– komponenta napětově-optického tenzoru
p_e	– foto-elastický koeficient
P	– výkon světelného záření
R	– odrazivost Braggovské mřížky
T_{FBG}	– výrobní tolerance Braggovské vlnové délky FBG
T_S	– výrobní tolerance Braggovské vlnové délky FBG senzoru
v	– rychlost šíření světla v prostředí

Seznam tabulek

1	Hodnoty koeficientů související s deformační citlivostí Braggovských mřížek. . . .	30
2	Hodnoty koeficientů související s teplotní citlivostí Braggovských mřížek.	30
3	Průměrná odezva 3D-FBG senzoru a AL-FBG senzoru v pikometrech.	54
4	Počet článků v časopisech a jejich umístění v kvartile dle průměrného pořadí v oborech podle univerzitního nástroje https://db.cs.vsb.cz/scis/journals/search . .	125
5	Počet článků v časopisech a jejich umístění v decilech dle průměrného pořadí v oborech podle univerzitního nástroje https://db.cs.vsb.cz/scis/journals/search . .	125
6	Citační ohlas autora a h-index.	125
7	Aplikované výsledky autora	125

Seznam obrázků

2.1	Železniční síť České republiky 2024.	15
2.2	Elektronické kolejové obvody pro signalizaci volnosti/obsazenosti vlakového úseku: sériový kolejový obvod (a); paralelní kolejový obvod (b).	18
2.3	Princip činnosti elektromagnetického kolejnicového snímače Alcatel 6221-A3. . .	20
2.4	Instalace počítače náprav Alcatel 6221-A3 na kolejnici.	20
2.5	Uspořádání kolového snímače RSR180 na kolejnici.	21
2.6	Montáž kolového senzoru RSR180 na kolejnici pomocí šroubů (a), pomocí upevňovací soupravy (b), reálná instalace na koleji pomocí upevňovací soupravy (c). .	21
2.7	Ocelový kontakt v kolejnici, systém Krokodýl (a); indukční kontakt vedle kolejnice, systém Indusi (b).	23
2.8	Národní železniční zabezpečovací systémy v Evropě.	25
2.9	Struktura komunikace mezi traťovou a mobilní částí zabezpečovače ETCS. . . .	26
3.1	Princip Braggovské mřížky.	28
3.2	Konstruktivní a destruktivní interference.	31
3.3	Konstrukční schéma Mach-Zehnderova interferometru.	31
4.1	Vlnový multiplex využívající (a) širokospektrální zdroj záření a optický spektrální analyzátor; (b) laditelný úzkopásmový laser a optický fotodetektor.	35
4.2	Spektrální zobrazení matematického modelu M4T.	36
4.3	Spektrální využití měřicích kanálů a ochranných pásem v závislosti na různých velikostech ochranných pásem v modelové větvi senzoru M3 (a). Část spektrálního využití ochranných pásem pro různé hodnoty měřicích rozsahů a různé hodnoty ochranných pásem (b).	37
4.4	Princip konverze změny spektrální polohy na změnu optického výkonu (a); Schéma zapojení (b).	38
4.5	Schéma vyhodnocení n-intenzitních FBG senzorů.	39
4.6	Konstrukce FBG snímače zapouzdřeného do polymeru PDMS umístěného mezi dvě ocelové desky.	41
4.7	Numerické modelování zatížení betonového pražce (a); realizace betonového pražce (b); odezva FBG snímače na najetí automobilu na betonový pražec (c).	42
4.8	Vyfrézovaná vozovka s umístěným FBG snímačem zapouzdřeným do polymeru PDMS (a); zalití vyfrézovaných děr s FBG snímačem tekutým asfaltem (b). . . .	42
4.9	Schéma umístěných FBG snímačů v jízdním pruhu širokým 3,2 m (a); pracovní spektrální oblast a Braggovské vlnové délky senzorického řetízku s 5ti FBG snímači instalovanými do vozovky (b).	43
4.10	Odezva 5ti FBG snímačů na průjezd automobilu (a); výsledný signál získaný součtem všech signálů z FBG snímačů (b).	44

4.11	Boční pohled na mobilní pás (a); příčný pohled na mobilní pás (b); reálná instalace mobilního pásu na vozovku (c).	45
4.12	Odezva mobilního FBG pásu na průjezd osobního automobilu (a) a osobního automobilu s přívěsným vozíkem (b).	45
4.13	Interferometrický Mach-Zehnder snímač optimalizovaný pro železniční aplikace (a); umístění snímače a vyhodnocovací jednotky vedle kolejnice (b).	47
4.14	Frekvenční odezva (a) a amplitudová odezva (b) Mach-Zehnderova interferometru na průjezd osmi nápravové tramvaje.	47
4.15	Princip ohybového deformačního členu (a); instalace snímače mezi podkladnicí a kolejnicí (b).	48
4.16	Amplitudová odezva intenzitního pod-kolejnicového snímače na průjezdy tramvají.	49
4.17	Umístění FBG na stojinu a patu kolejnice (a) a pod patu kolejnice (b); průběh deformace FBG při zatěžování v hydraulickém lisu (c); odezva Braggovské mřížky na průjezd tramvajového vozidla v reálných podmínkách (d).	50
4.18	Konstrukce pouzdra pro instalaci FBG senzorů na spodní část paty kolejnice.	51
4.19	Konstrukce (a) a fotografie (b) pouzdra pro instalaci FBG senzorů na kolejnici s možností přizpůsobení na různé šíře paty kolejnic a možnosti nastavení přitlačné síly FBG senzorů na kolejnici.	51
4.20	Nákres FBG senzorů vkládajících se do pouzdra.	52
4.21	FBG senzor zapouzdřený pomocí technologie 3D tisku s filamentem PLA (a) případně PC-ABS (b) nebo zapouzdřený do hliníkového plíšku s vyfrézovanou drážkou (c).	53
4.22	Záznam z průjezdů kolejových vozidel získaný 3D-FBG senzorem (a); detail na průjezd čtyřnápravového vozidla (b).	53
4.23	Záznam z průjezdu kolejového vozidla s ploškou na kole způsobující sekundární vibrace kolejnice.	54
6.1	Grafický abstrakt publikace Design of fiber bragg grating sensor networks.	57
6.2	Grafický abstrakt publikace PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas.	69
6.3	Grafický abstrakt patentu Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě.	81
6.4	Grafický abstrakt patentu Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání.	91
6.5	Grafický abstrakt publikace Portable optical fiber Bragg grating sensor for monitoring traffic density.	111

1 Motivace

Od rozvoje prvních lokomotiv v 19. století se železniční doprava stala páteří průmyslové revoluce a poskytovala efektivní prostředek pro přepravu zboží a osob na dlouhé vzdálenosti. Vývoj bezpečnostních systémů, od mechanických zařízení až po dnešní elektronické a digitální technologie, poukazuje na stálou potřebu inovací v oblasti monitorování a zabezpečení železniční dopravy.

V rámci identifikace problémů v současných zabezpečovacích systémech narážíme na řadu kritických aspektů, které omezují jejich efektivitu a spolehlivost. Jedním z hlavních problémů je omezená adaptabilita na nové technologie. Mnohé ze stávajících zabezpečovacích zařízení jsou založeny na zastaralých technologických principech, které neumožňují snadnou integraci s nejnovějšími digitálními a komunikačními inovacemi. Dalším závažným problémem je omezená efektivita v prevenci nehod. Současné systémy často selhávají ve včasné identifikaci potenciálních rizik, jako jsou poškození kolejí, pohyb dvou vlaků ve vzájemně nebezpečné vzdálenosti, překážky na trati, nebo nestandardní stavy vozidel, což může mít fatální následky. Tento nedostatek okamžité detekce snižuje celkovou bezpečnost železničního provozu.

Náchylnost k vnějšímu rušení je dalším kritickým problémem. Elektromagnetické rušení může vést k nesprávným výstrahám nebo dokonce k úplnému výpadku systémů. v prostředí s vysokonapětovými zařízeními může být spolehlivost tradičních senzorů a zabezpečovacích systémů vážně ohrožena. Problémy přináší i omezené monitorování v reálném čase. Mnohé současné systémy nedokážou poskytovat kontinuální sledování v reálném čase, což je klíčové pro rychlou reakci na proměnlivé podmínky a potenciální bezpečnostní hrozby.

Vysoké náklady na údržbu představují další významný problém. Tradiční sensorové a zabezpečovací systémy vyžadují pravidelnou údržbu a kalibraci, což znamená vysoké finanční i časové náklady.

Tyto identifikované problémy ukazují na potřebu inovací v oblasti zabezpečení a monitorování železniční dopravy, kde optovláknové senzory mohou hrát klíčovou roli díky svým jedinečným vlastnostem a schopnostem. Optovláknové sensorické technologie nabízejí řešení těchto problémů díky své vysoké přesnosti, citlivosti a odolnosti vůči elektromagnetickému rušení. Jejich schopnost kvazi-distribuovaného měření umožňuje detailní monitorování železniční infrastruktury a vozidel v reálném čase, což značně zvyšuje efektivitu detekce potenciálních rizik a zlepšuje úroveň bezpečnostních systémů.

Hlavním cílem této habilitační práce je demonstrovat, jak mohou optovláknové senzory přispět ke zvýšení bezpečnosti železniční dopravy. Práce se zaměřuje na základní výzkum a praktické aplikace těchto senzorů v železniční dopravě.

Struktura této habilitační práce je navržena tak, aby poskytovala teoretický přehled i detailní vědeckou analýzu použití optovláknových senzorů v železniční dopravě. v úvodních kapitolách je kladen důraz na edukační aspekty. Kapitola 2 poskytuje komplexní přehled o aktuálním stavu zabezpečovacích systémů využívaných v železniční dopravě v České republice a v Evropě. Ka-

pitola 3 pak čtenáře seznamuje s nezbytným teoretickým základem optovláknových mřížkových senzorů, přičemž klade důraz na jejich principy a výhody.

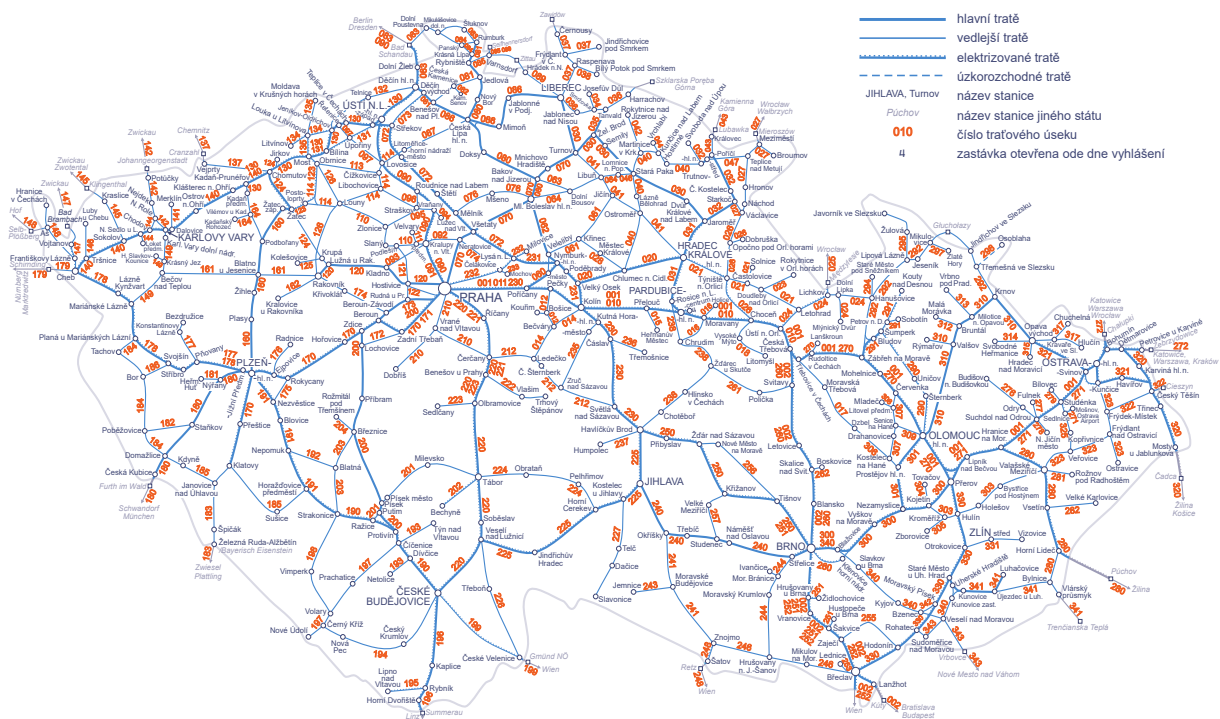
Odborná část práce, rozepsaná ve 4 kapitole, představuje soubor vlastních aplikovaných výsledků, včetně patentových řešení a významných publikací v impaktovaných časopisech. Kapitola 4.1 se zaměřuje na technologie a metody multiplexace mřížkových snímačů, což je klíčové pro jejich efektivní nasazení v rozsáhlých monitorovaných systémech, jako je železniční doprava. Kapitola 4.2 zkoumá využití optovláknových senzorů pro zvýšení bezpečnosti na železničních přejezdech a kapitola 4.3 se věnuje aplikacím optovláknových snímačů pro monitorování a zabezpečení staničních a traťových úseků v železniční dopravě. Shrnutí a přínosy této habilitační práce jsou uvedeny v kapitole 5. V kapitole 6 jsou zařazeny hlavní výsledky vztahující se k tématu této habilitační práce a poslední kapitola 7 pojednává o pedagogické a vědeckovýzkumné činnosti autora na Katedře telekomunikační techniky.

2 Aktuální stav v železniční dopravě

Historie železniční dopravy v České republice sahá do 20. let 19. století, kdy byla budována a provozována komerčními subjekty převážně kvůli potřebě převozu nákladu v těžkém průmyslu, ale také pro přepravu lidí. Později byla železniční infrastruktura zestátněna a v současnosti je spravována Správou železnic (SŽ).

Železniční doprava umožňuje přepravu velkého množství nákladu nebo osob s nízkým dopadem na životní prostředí a vyšší bezpečností provozu ve srovnání s jinými druhy dopravy, což je umožněno rozsáhlou sítí tratí o délce 9 355 km. Vzhledem k velké hustotě dopravy, dlouhým vlakovým soupravám, jejich značným hmotnostem a vysokým rychlostem je bezpečnost považována za primární prioritu provozovatelů železniční dopravy. V případě nehody dvou vlaků dochází k obrovským majetkovým škodám, včetně zranění a úmrtí mnoha lidí, což zdůrazňuje kritický význam bezpečnostních opatření a používaných zabezpečovacích zařízení.

Rozsáhlá železniční síť (Obr. 2.1) z roku 2024 zveřejněná Správou železnic [1] obsahuje také velké množství křížení se silnicemi, přičemž na každých 10 km trati připadá přibližně 9 železničních přejezdů. Srážka vlaku s automobilem na železničním přejezdu může mít rovněž fatální důsledky, proto kromě využívání zabezpečovacích zařízení přejezdů byla také sestavena pracovní skupina The European Level Crossing Forum (ELCF), která provádí školení vedoucích pracovníků zodpovědných za zabezpečování železničních přejezdů. [2]



Obrázek 2.1: Železniční síť České republiky 2024.

2.1 Motivace pro monitorování v železniční dopravě

V železniční a kolejové dopravě se provádí monitorování různých parametrů z důvodů zajišťování její bezpečnosti, udržitelnosti a efektivity. Kolejová doprava může být zdrojem vážných nehod a incidentů s fatálními důsledky. Monitorování provozu a jednotlivých částí železniční infrastruktury je jedním ze základních způsobů, jak snižovat tato rizika prostřednictvím včasné detekce potenciálních problémů. Ve spojení s optimalizací řízení dopravy je umožněno dodržování jízdních řádů, což zvyšuje spokojenost cestujících a obecně kvalitu poskytovaných služeb. Z hlediska technologického vývoje a zvyšování nároků na propustnost a efektivnost železniční dopravy musí být monitorování nedílnou součástí vysokorychlostních tratí a autonomních vlaků. Mezi sledované parametry v železniční dopravě patří:

- obsazenost koleje vlakovou soupravou,
- poloha, směr a rychlost jízdy,
- počítání kolejových vozů a náprav,
- stav a opotřebení kolejí, kolejových vozidel a jiných součástí infrastruktury.

2.2 Analýza možných rizik v železniční dopravě

V kolejové dopravě existují různá potenciální rizika, která mohou vést k vážným nehodám. Mezi nejčastější rizika patří:

- Srážka mezi dvěma vlaky, vlakem a vozidlem na přejezdu nebo vlakem a chodcem. Mezi příčiny srážek lze zařadit chyby v řízení, selhání signalizace, nesprávné chování řidičů, chodců nebo technické selhání zařízení.
- Vykolejení vlaku může být způsobeno technickými problémy kolejového vozidla, koly nebo kolejemi včetně opotřebení, špatnou údržbou, selhání dílů, překážkou na koleji apod.
- Požáry a havárie na mostech a v tunelech.
- Technické selhání prostředků kolejové dopravy, může se jednat např. o selhání brzdového systému, signalizace, výpadek napájení, selhání motoru apod.
- Nesprávná manipulace s nákladem v případě nákladních vlaků převážející těžké nebo nebezpečné náklady.

2.3 Způsoby zajišťování bezpečnosti v železniční dopravě

Zajištění bezpečnosti v kolejové dopravě vyžaduje sledování provozu na železnici a na železničních přejezdech, identifikování možných rizik a jejich předcházení. Mezi nejčastější nehody a incidenty lze zařadit srážku dvou vlaků na trati nebo srážku vlaku s automobilem na železničním přejezdu.

2.3.1 Předcházení srážek dvou vlaků

Základním přístupem k předcházení srážkám dvou vlaků je systém signalizace a řízení provozu, který rozděluje trať na jednotlivé úseky dvou typů:

- Pevné blokové úseky – systém dělí trať na pevné úseky, kdy na každém úseku může být přítomen pouze jeden vlak. Pokud vlak vjede na pevný úsek, systém jej uzavře, dokud daný úsek vlak neopustí. Tento systém je základem pro mnoho tradičních železničních signalizačních systémů.
- Pohyblivé blokové úseky (moving block) – každý vlak vytváří pohyblivý úsek kolem sebe, který se s ním posouvá. Vzdálenost mezi vlaky se tedy může automaticky přizpůsobovat podle rychlosti jízdy, směru a dalších faktorech (typ vlaku, jeho hmotnost, brzdový systém, stav trati, počasí nebo viditelnost). Tento systém umožňuje vyšší propustnost tratí a je využíván s modernějšími železničními systémy.

2.3.2 Předcházení srážky vlaku a automobilu

Předcházení srážkám mezi vlakem a automobilem na přejezdu je zajišťováno pomocí signalizačních zařízení a závor, které upozorňují řidiče na příježdějící vlak. Tento základní systém může být doplněn o senzory a detektory monitorující vozidlo na přejezdu případně kamerový systém. Monitorovací systém musí komunikovat s příježdějícím vlakem nebo dispečerem, aby mohla být přijata potřebná opatření, jako například zastavení vlaku. V některých případech mohou být použity pokročilé technologie, jako je umělá inteligence a prediktivní analýza. Tyto pokročilé technologie mohou předvídat potenciální problémy na základě vzorců chování a identifikovat rizikové situace ještě dříve, než se stanou kritickými.

2.4 Konvenční snímače v železniční dopravě

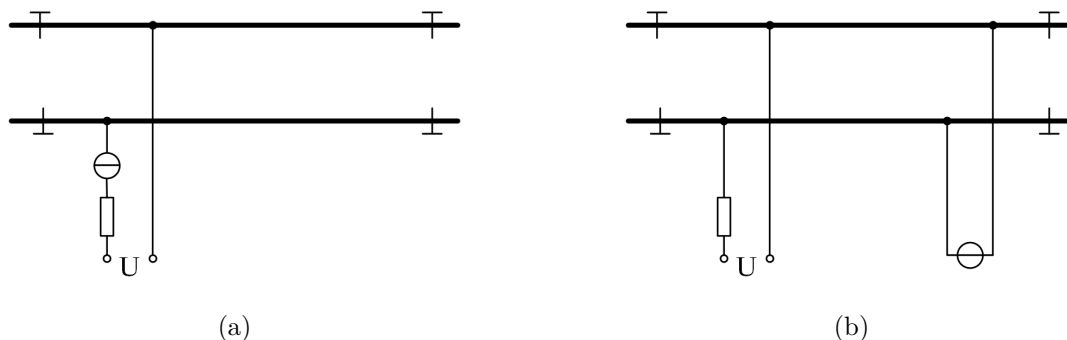
Z hlediska bezpečnosti se provádí sledování určitých parametrů, jako je volnost kolejového úseku, aktuální počet náprav v úseku, směr nebo rychlost jízdy. V následující části jsou popsány základní snímače používané pro sledování uvedených parametrů.

2.4.1 Elektronický kolejový obvod

Elektronický kolejový obvod detekuje přítomnost kolejového vozidla v určitém úseku a poskytuje informaci o jeho obsazenosti nebo volnosti. V reálných podmínkách se používá několik variant kolejových obvodů, obecně tyto obvody můžeme rozdělit na dvě skupiny: sériové a paralelní.

Sériový kolejový obvod využívá zdroj napětí, které je přes odpor a relé připojeno ke kolejnici, která plní funkci elektrického vodiče (Obr. 2.2a). Pokud se v daném úseku nachází vlak, prostřednictvím jeho odporu (šunt) dojde k uzavření obvodu a detektorem začne protékat elektrický proud, což signalizuje obsazenost daného úseku. Nevýhodou je, že tato varianta v případě poruchy signalizuje volnost úseku, i když je obsazen.

Paralelní kolejový obvod je používanější variantou. Ke kolejnici je paralelně připojeno jak napájecí napětí, tak senzor detekující protékající proud (Obr. 2.2b). Pokud se v daném úseku nenachází vlak, detektorem procházející vysoký elektrický proud signalizuje volnost kolejového úseku. Při obsazenosti kolejového úseku dojde ke zkratování elektrického proudu přes nápravu kolejového vozu, čímž se sníží proud protékající detektorem. Tento stav je signalizován jako obsazenost daného úseku. Výhodou tohoto paralelního uspořádání je, že i v případě poruchy systém signalizuje stav obsazenosti.



Obrázek 2.2: Elektronické kolejové obvody pro signalizaci volnosti/obsazenosti vlakového úseku: sériový kolejový obvod (a); paralelní kolejový obvod (b).

V ČR se využívají oba uvedené typy kolejových obvodů, konkrétně SKO-05 [3] a KOA1 [4], schválené v roce 2008 a to v následujících případech [5].

- Rušení závěru ve staničních a traťových úsecích – když vlak vjede do určitého úseku trati nebo do stanice, kolejový obvod detekuje jeho přítomnost a signalizuje, že úsek je obsazený, což vede ke zrušení předem nastavené jízdní cesty pro následující vlaky.
- Kontrola průjezdu vlaku přes železniční přejezd – jakmile vlak vjede do úseku blízko přejezdu, zabezpečovací systém aktivuje přejezdovou signalizaci a závory.

2.4.2 Počítač náprav

Počítač náprav počítá nápravy kolejových vozidel, které projíždějí určitým místem nebo úsekem trati. Počítače náprav využívají senzory, které mohou být založeny na různých principech (magnetický, induktivní nebo optický). V případě umístění počítače náprav na začátku a na konci úseku je možné signalizovat jeho volnost nebo obsazenost na základě počtu náprav v daném úseku.

V souvislosti s modernizací železniční infrastruktury v České republice byly postupně nasazovány do provozu následující počítače náprav:

- rok 1992: počítač náprav Alcatel 6221-A3, který představoval významný pokrok v technologii detekce náprav,
- rok 1999: systém AZF využívající senzory RSR180 (Frauscher),
- rok 2006: počítač náprav PNS-03 od firmy Starmon s.r.o., který využíval senzory RSR180,
- rok 2006: počítač náprav PZN-1 od AŽD Praha, jenž využíval speciálně vyvinutý kolový senzor složený ze tří systémů pro zvýšenou přesnost detekce,
- rok 2007: počítač náprav AZF (Frauscher) využívající senzory RSR180,
- rok 2014: počítač náprav ACS2000 (Frauscher) využívající senzory RSR180,
- rok 2018: systém FAdC-R2, který umožňuje použití senzorů RSR180 nebo RSR123, což umožňuje větší flexibilitu a přizpůsobivost pro různé železniční aplikace.

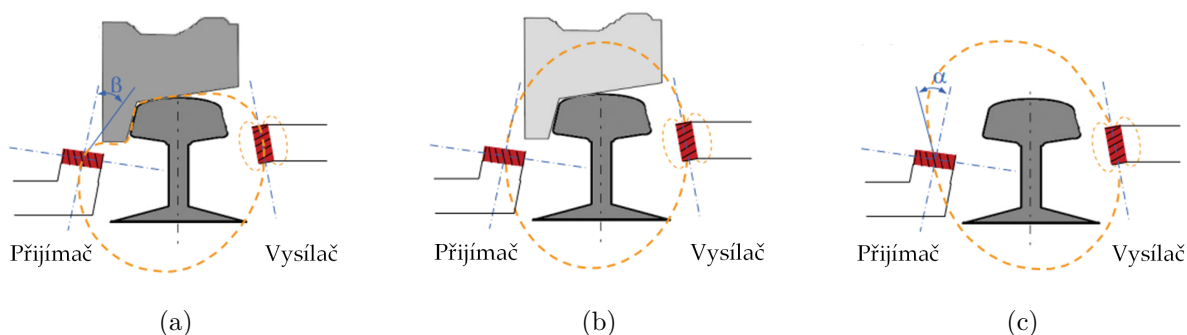
V další části textu budou popsány nejčastěji používané senzory počítačů náprav v České republice.

Počítač náprav Alcatel 6221-A3

Nejrozšířenějším počítačem náprav je elektromagnetický systém Alcatel 6221-A3 [6]. Tento systém zahrnuje vnitřní zařízení (vyhodnocovací jednotka), přenosové vedení a venkovní zařízení (snímací část) s kolejnicovým kontaktem SK-30. Kolejnicový kontakt je tvořen dvojicí sousedních vysílacích hlav upevněných na vnější straně kolejnice (generování elektromagnetického pole) a dvojicí sousedních přijímacích hlav upevněných na vnitřní straně kolejnice (snímání elektromagnetického pole). Dvojice sousedních hlav zajišťuje, že průjezd kola je zachycen dvakrát, což umožňuje určit směr pohybu.

Pokud se v blízkosti nevyskytuje kolo, siločáry elektromagnetického pole dopadají na přijímač pod úhlem α , což způsobí indukci referenčního střídavého napětí v přijímací hlavě (Obr. 2.3a). V okamžiku, kdy se kolo přiblíží na vzdálenost cca 200 mm, budou dopadat siločáry kolmo na přijímací hlavu a indukované střídavé napětí bude nulové (Obr. 2.3b). V okamžiku, kdy se kolo nachází nad snímačem, siločáry se natolik deformují, že dopadají na přijímací hlavu pod negativním úhlem β , což způsobí indukci střídavého napětí posunutého o 180° (Obr. 2.3c).

Nevýhodou tohoto způsobu počítání náprav je mechanická instalace na kolejnici, která vyžaduje provrtání tří otvorů pro šrouby (Obr. 2.4).



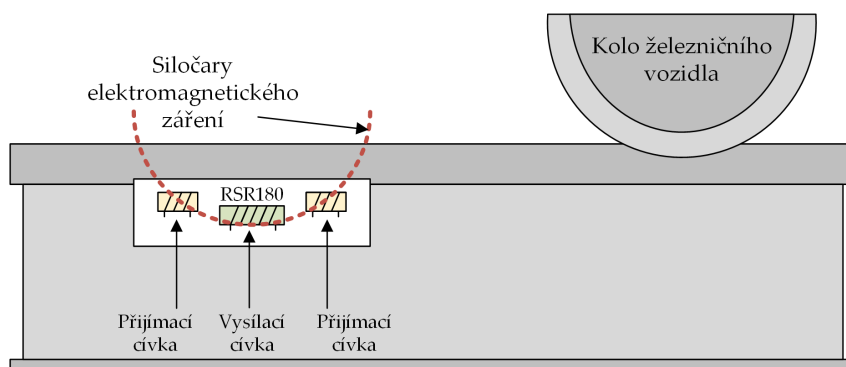
Obrázek 2.3: Princip činnosti elektromagnetického kolejnicového snímače Alcatel 6221-A3.



Obrázek 2.4: Instalace počítače náprav Alcatel 6221-A3 na kolejnici.

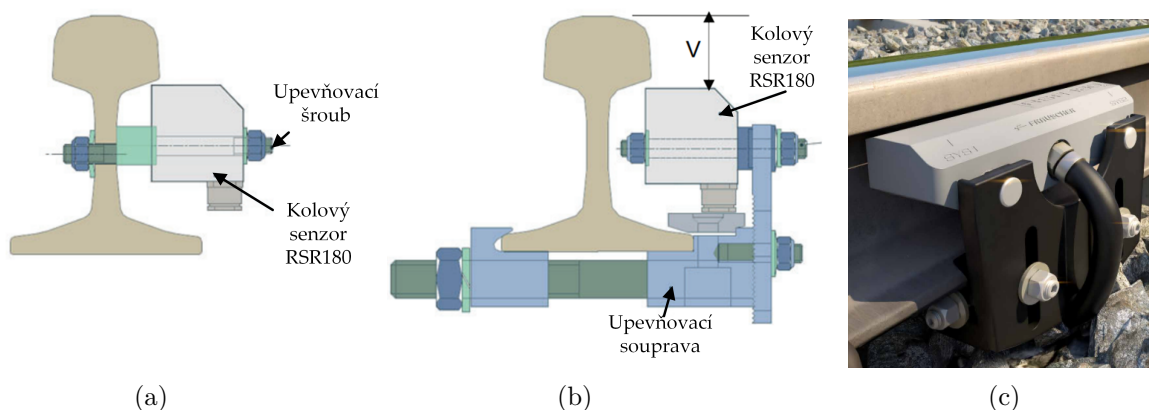
Počítač náprav Frauscher AZF

Počítač náprav Frauscher AZF zahrnuje vnitřní zařízení (vyhodnocovací jednotka), přenosové vedení a venkovní zařízení (snímací část) s kolovým snímačem RSR180 [7]. Tento snímač je tvořen vysílací cívkou a symetricky umístěnými přijímacími cívkami po obou stranách vysílací cívky (Obr. 2.5).



Obrázek 2.5: Uspořádání kolového snímače RSR180 na kolejnici.

Princip je opět založen na ovlivnění tvaru elektromagnetických siločar projíždějícími koly, což se projevuje změnou indukovaného napětí v přijímacích cívkách. Průběh indukovaného napětí z obou cívek umožňuje nejen detekovat průjezd kola, ale také jeho směr. Montáž kolového senzoru RSR180 se provádí na stojinu kolejnice pomocí dvou šroubů (Obr. 2.6a) nebo na patu kolejnice pomocí upevňovací soupravy (Obr. 2.6b). Implementace kolového senzoru RSR180 pomocí upevňovací soupravy je zobrazena na Obr. 2.6c.



Obrázek 2.6: Montáž kolového senzoru RSR180 na kolejnici pomocí šroubů (a), pomocí upevňovací soupravy (b), reálná instalace na koleji pomocí upevňovací soupravy (c).

2.4.3 Snímače přítomnosti automobilu na přejezdu

Přítomnost automobilu na železničním přejezdu lze zjistit jak pomocí kamerového systému, tak pomocí různých typů senzorů. Mezi nejpoužívanější patří indukční smyčky, které detekují přítomnost vozidla v určité části silnice, typicky před a za železničním přejezdem. Indukční smyčka je tvořena vodičem, který je instalován pod povrchem vozovky. Protékající elektrický proud tímto vodičem vytváří elektromagnetické pole, které je monitorováno. Když se nad smyčkou nachází vozidlo, dochází ke změně tohoto pole, což může aktivovat signalizaci nebo jiné bezpečnostní systémy. Nevýhodou indukčních smyček je jejich omezená spolehlivost při detekci menších vozidel, jako jsou motocykly nebo malé automobily.

Infračervené senzory detekují přítomnost vozidla ve hlídaném perimetru sledováním změn infračerveného záření způsobených přítomností vozidla. Tyto systémy nejsou tak robustní jako indukční smyčky, mohou ale velmi snadno detekovat například uvízlé vozidlo na přejezdu.

Ultrazvukové senzory slouží pro detekci polohy nebo přítomnosti vozidla ve hlídaném perimetru pomocí ultrazvukových vln, které se od vozidla odrážejí. Ultrazvukové senzory poskytují flexibilní instalaci a mohou být vhodné pro složité přejezdové situace.

Podobnými technologiemi založenými na odrazu vln jsou radarové senzory, které využívají rádiové vlny, a LIDARové senzory, které pracují s laserovým zářením.

2.5 Železniční zabezpečovací systémy

Železniční zabezpečovací systémy jsou klíčové pro udržení bezpečnosti a efektivity železniční dopravy. Železniční zabezpečovací systém je soubor technických prostředků, který umožňuje efektivní komunikaci a kontrolu nad pohybem vlaků a přispívá k bezpečnosti železničního provozu. Tyto systémy je možné rozdělit na staniční, traťové a přejezdové.

Staniční zabezpečovací zařízení zajišťuje plnění podmínek pro bezpečný průjezd vlaku vlakovou stanicí. Mezi základní podmínky bezpečného průjezdu patří volnost jízdní cesty, správná konfigurace všech výhybek v jízdní cestě a vyloučení současně zakázaných jízdních cest z důvodu zamezení možné kolize s jízdou jiného vlaku. Bezpečnou jízdu na širých tratích mezi dopravami s kolejovým větvením (železniční stanice) zajišťují traťové zabezpečovací zařízení. V místech křížení železniční a silniční cesty je bezpečnost zajišťována pomocí přejezdových zabezpečovacích zařízení.

Vlakové zabezpečovací zařízení je souhrnem traťových a staničních zařízení a přispívá ke zvýšení bezpečnosti železniční dopravy tím, že kontroluje činnost strojvedoucího a dodržování limitních parametrů jízdy vlaku jako je rychlost jízdy, nepovolený průjezd návěstidlem apod. Vlakový zabezpečovač se dělí na část traťovou a na část mobilní.

Traťová část zahrnuje dohledové centrum a zabezpečovací zařízení, která přenášejí důležitá data do mobilní části instalované ve vlacích pomocí přenosového média. Tato data mohou mít různý charakter, jako jsou informační, příkazové, kontrolní nebo ovládací signály a jsou nezbytná

pro řízení a monitorování pohybu vlaků, zajištění jejich bezpečného průjezdu a prevenci kolizí. Traťová část může být realizována buď bodově, při průjezdu určitým bodem, nebo liniově, kdy jsou informace přenášeny podél celého úseku před návěstídem

Mobilní část vlakového zabezpečovacího systému, která je součástí řídicích kolejových vozů, zajišťuje příjem informací z traťové části a jejich zobrazení na stanovišti strojvedoucího. Dále kontroluje bdělost strojvedoucího, který musí v pravidelných intervalech nebo jako potvrzení přijaté informace stisknout tzv. tlačítko bdělosti.

2.5.1 Bodový vlakový zabezpečovač

Bodový vlakový zabezpečovač zajišťuje přenos informací z traťové části do mobilní části v konkrétních bodech. Například ve Francii, Belgii a Lucembursku je v provozu systém Krokodýl, který využívá kontakt tvořený třemi prolamovanými ocelovými pásy v ose kolejnice (Obr. 2.7a) a štetinky na vlaku. Volbou polarity přivedeného napětí na kontakt se přenáší do vlaku informace „Stůj“ nebo „Volno“. V Německu, Rakousku a Rumunsku se zase využívá systém Indusi, který využívá indukčních obvodů umístěných na pravé vnější straně kolejnice (Obr. 2.7b).



Obrázek 2.7: Ocelový kontakt v kolejnici, systém Krokodýl (a); indukční kontakt vedle kolejnice, systém Indusi (b).

2.5.2 Liniový vlakový zabezpečovač (LS)

V České republice se začal zavádět liniový vlakový zabezpečovač v 60. letech 20. století a jeho úkolem byla kontrola bdělosti a akceschopnosti strojvedoucího a přenos čtyř návěstních informací na stanoviště strojvedoucího pomocí pulzně modulovaných signálů prostřednictvím izolovaných kolejnic a prvního dvojkolí železničního vozidla. Základní čtyři návěstní informace jsou „Volno“, „Nařizuji začít zpomalovat“, „Nařizuji jízdu nižší rychlostí“ a „Stůj“. Novější mobilní část vlakového zabezpečovače MIREL VZ1 umožňuje kromě sledování bdělosti strojvedoucího a přenosu návěstních znaků na stanoviště strojvedoucího také sledování rychlosti vlaku. V Evropě se liniové vlakové zabezpečovače používají také na Slovensku, v Maďarsku, Itálii nebo Nizozemsku.

2.5.3 Rádiové sítě liniových zabezpečovačů

Liniová zabezpečovací zařízení mohou využívat také rádiový přenos informací z traťové do mobilní části. Pro lokální účely, například v rámci depa nebo nádraží, se využívá analogový místní rádiový systém se simplexními kanály v pásmu 150 MHz. Pro komunikaci na tratích se naopak využívá analogový traťový rádiový systém s duplexními kanály v pásmu 450 MHz. Systém v případě ohrožení provozu umožňuje dispečerem vysílat signál pro zastavení vozidla nebo zastavení všech vlaků na trati.

Aktuálně používaným mezinárodním standardem bezdrátové komunikace pro železniční aplikace je digitální síť GSM-R v pásmu 900 MHz. Tato síť se využívá pro hlasovou i datovou komunikaci mezi provozními zaměstnanci železnic, jako jsou strojvedoucí, dispečeri, výpravčí, posunovači nebo vozmistři. GSM-R je založen na sítích druhé generace (2G), což způsobuje delší dobu navazování spojení a nízkou propustnost dat. Z těchto důvodů se aktuálně vyvíjí nový komunikační systém FRMCS (Future Rail Mobile Communications System), který bude založen na sítích páté generace (5G). Tento nový systém bude výrazně modernější, rychlejší a nabídne vyšší kapacitu pro datovou komunikaci.

2.5.4 Evropský traťový zabezpečovací systém (ETCS)

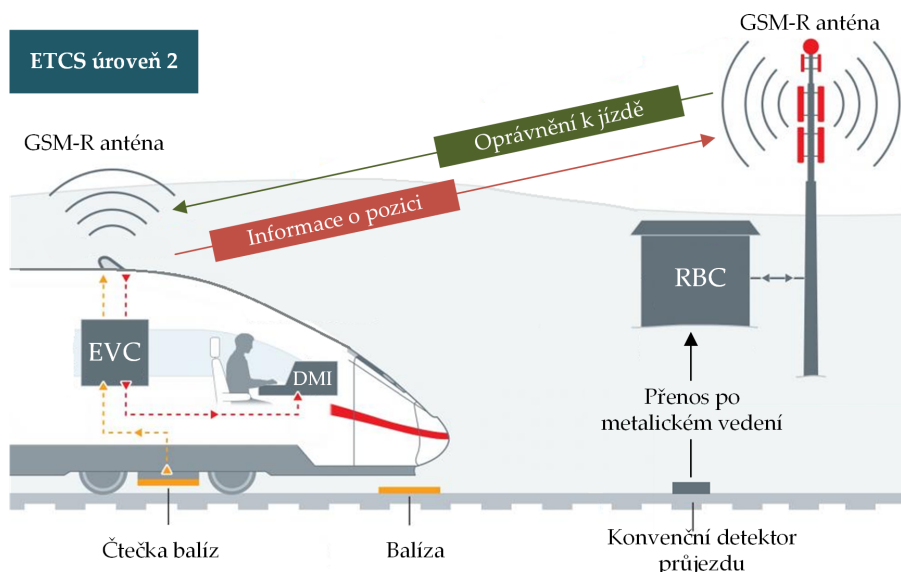
S rozvojem železniční dopravy vyvíjely a zaváděly evropské státy vlastní systémy vlakového zabezpečení pro řízení a monitorování železničního provozu na svém území. Každý z těchto systémů byl navržen specificky pro potřeby dané země, což vedlo k jejich vzájemné nekompatibilitě. Nekompatibilita těchto zabezpečovacích systémů značně komplikuje přeshraniční železniční dopravu. Jízda vlaku napříč různými zeměmi často vyžaduje buď výměnu hnacího vozidla, nebo doplnění specifického zařízení pro spolupráci se zabezpečovačem dané země. Historicky zavedené a dosud používané systémy vlakových zabezpečovačů v jednotlivých členských státech Evropské unie (Obr. 2.8) se vyznačují vedle typové rozdílnosti také technickou zastaralostí a rozdílnou úrovní funkčnosti a bezpečnosti.



Obrázek 2.8: Národní železniční zabezpečovací systémy v Evropě.

Na základě uvedených nedostatků bylo v roce 1990 rozhodnuto o vývoji jednotného evropského vlakového zabezpečovacího systému ERTMS (European Rail Traffic Management System) [8]. Součástí tohoto systému je způsob zajištění bezpečnosti železniční dopravy označený jako ETCS (European Train Control System) [9], který využívá přenos informací přes rádiové datové sítě GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) [10]. Cílem je nahradit různorodé, mezi sebou navzájem nekompatibilní systémy zabezpečení železniční dopravy evropských států novým jednotným způsobem pro celou Evropu, zvýšení propustnosti tratí a zvýšení rychlostních profilů vyšší úrovní zabezpečení.

ETCS využívá pro přenos informací z traťové části do vlaku jak liniovou rádiovou síť GSM-R, tak bodové vysílače, tzv. balízy (Obr. 2.9). Balíza je elektricky pasivní zařízení umístované v ose kolejnice, která je elektricky napájena vlakem při jeho průjezdu. Nepřepínatelná balíza posílá projíždějícím vlakům neměnnou informaci, tzv. telegram (např. maximální povolená rychlost v následujícím úseku, aktuální poloha apod.). Naopak přepínatelná balíza může odesílat libovolné informace, protože informace jsou generované prostřednictvím traťové elektronické jednotky (LEU) na základě informací přijatých radio blokovou centrálou (RBC) z externích traťových systémů. Pro zvýšení spolehlivosti systému se využívají redundantní balízy, které jsou seskupeny do balízových skupin.



Obrázek 2.9: Struktura komunikace mezi traťovou a mobilní částí zabezpečovače ETCS.

V České republice se plánuje nasazování systému ETCS ve dvou variantách neboli úrovních. Úroveň L1 je založená na jednosměrném přenosu informací z balíz do vlaku. Využívány jsou jak pevné, tak přepínatelné balízy. Tato úroveň je nasazována na vedlejší tratě.

Úroveň L2 využívá kontinuální obousměrný přenos informací mezi tratí a vlakem prostřednictvím železniční rádiové sítě GSM-R. Přenos informací zajišťuje rádio bloková centrála, která na základě informací z tratě sestavuje oprávnění k jízdě a posílá jej přes GSM-R vlaku. V úrovni L2 se využívají také pevné balízy, které slouží pro určení polohy vlaku. Vlak do traťové části odesílá následující informace: identifikace poslední přečtené balízové skupiny, poloha vlaku, směr pohybu, aktuální rychlost apod.

Pro zvýšení bezpečnosti na tratích s provozem jednotného zabezpečovacího systému ETCS se doporučuje integrace s konvenčními kolejovými obvody a počítači náprav. Tyto tradiční senzorové systémy, i přes svou zastaralou technologii a omezení, zůstávají klíčové pro kontrolu volnosti tratě a vyhodnocení průjezdu vozidel. Přestože systém ETCS představuje významný pokrok ve standardizaci zabezpečení na evropských železnicích, jeho schopnosti předvídat a efektivně řešit všechny potenciální mimořádné události jsou omezené. Proto se stále využívá integrace s národními železničními systémy, což zaručuje komplexnější bezpečnostní pokrytí.

V této souvislosti nabízí optovláknové senzory moderní a efektivní řešení, schopné překonat mnohé z těchto nedostatků a posílit tak celkovou úroveň bezpečnosti v železniční dopravě. V následujících kapitolách jsou proto podrobně rozebrány principy fungování optovláknových senzorů, jejich specifické výhody a příklady aplikací v rámci železniční dopravy, což naznačuje jejich významný potenciál pro další rozvoj a zvyšování zabezpečení železniční dopravy.

3 Optovláknové snímače

3.1 Optické vlákno

Světlo je elektromagnetické záření, které se šíří homogenním prostředím přímočaře v podobě paprsků rychlostí, která je dána hodnotou indexu lomu. Index lomu n je materiálová veličina, která určuje rychlost šíření světla v daném materiálu dle rovnice:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (1)$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu ($c = 3 \times 10^8$ m/s) a v je rychlost šíření světla v daném materiálu. Světlo dopadající na rozhraní dvou prostředí pod úhlem α se částečně odráží pod úhlem $\alpha' = \alpha$ a částečně se láme do druhého prostředí pod úhlem β . Lom světla ve druhém prostředí s indexem lomu n_2 je definován Snellovým zákonem:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (2)$$

kde n_1 je index lomu materiálu, ze kterého dopadá paprsek na rozhraní pod úhlem α (vzhledem k normále) a n_2 je index lomu materiálu, ve kterém se paprsek láme pod úhlem β .

Optické vlákno je komunikační médium používané pro přenos informací v podobě modulovaného světla. Optické vlákno je tvořeno jádrem obaleným pláštěm a standardně se vyrábějí ze skla s indexem lomu kolem 1,5.

Aby se světlo nevyvazovalo z optického vlákna, musí být splněny dvě podmínky: jednak index lomu jádra musí být o něco větší než index lomu pláště, a jednak úhel dopadu světla α na toto rozhraní musí být menší než mezní úhel Θ_m definovaný následujícím vztahem:

$$\Theta_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Díky jevu totálního odrazu je zajištěno, že světlo vedené optickým vláknem zůstává uvnitř jádra a neuniká do okolního prostředí, což minimalizuje výkonové ztráty. K malým ztrátám při přenosu světla dochází kvůli rozptylu a absorpci světla na nehomogenitách uvnitř optického vlákna. Tyto ztráty jsou u dnes využívaných optických vláken velmi malé a dosahují hodnot útlumu 0,2 dB/km. Díky tomu je možné provozovat přenosy informací na velké vzdálenosti vysokou přenosovou rychlostí.

3.2 Principy optovláknových senzorů

Z historického hlediska se technologie výroby optických vláken zaměřovala na snižování vložného útlumu a zvyšování dosahu signálu. V případě optovláknových senzorů je naopak požadavkem zvyšovat vliv vnějších podnětů na procházející světlo. Tyto senzory se vyznačují schopností

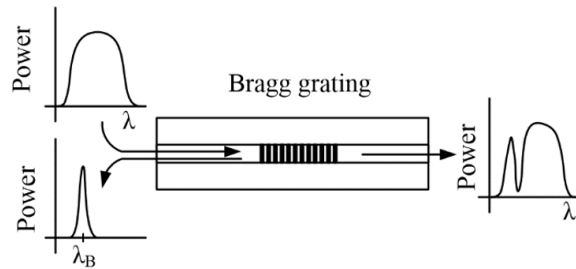
optického vlákna reagovat na změny v okolním prostředí, jako je teplota, tlak nebo napětí, což mění vlastnosti procházejícího světla. Tato vlastnost umožňuje optovláknovým sensorům detekovat a monitorovat různé fyzikální veličiny, což je klíčové pro jejich využití v širokém rozsahu aplikací od stavebnictví a dopravy po biomedicínu.

Optovláknové senzory se podle místa měření rozdělují do tří základních kategorií: jednobodové, kvazi-distribované a distribuované. Jednobodové senzory, jako jsou interferometry nebo intenzitní senzory se specializují na měření veličin v jednom bodě. Kvazi-distribované senzory, reprezentované především Braggovskými mřížkami FBG (Fiber Bragg Grating) umožňují simultánní měření v několika bodech díky technice multiplexování [11]. Distribuované senzory pak reprezentují skupinu umožňující kontinuální monitorování podél celé délky vlákna. Mezi tyto systémy patří zařízení využívající Ramanův rozptyl pro měření teploty DTS (Distributed Temperature Sensing) [12], Brillouinův rozptyl pro měření teploty a mechanických deformací DSTS (Distributed Strain and Temperature Sensing) [13] nebo Rayleighův rozptyl pro měření vibrací DAS (Distributed Acoustic Sensing) [14].

3.3 Optovláknové Braggovské mřížky

Braggovské mřížky patří k nejrozšířenějším optovláknovým strukturám, které se využívají v optických komunikačních řetězcích, a v posledních dvou dekáдах nacházejí uplatnění také v sensorických aplikacích.

Optovláknové Braggovské mřížky jsou tvořeny periodickou změnou indexu lomu v jádře optického vlákna, což umožňuje odraz pouze úzké spektrální části světla, zatímco zbytek záření prochází bez ovlivnění (Obr. 3.1).



Obrázek 3.1: Princip Braggovské mřížky.

Střední vlnová délka odrazného spektra se nazývá Braggovská vlnová délka a je dána vztahem:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (4)$$

kde λ_B je Braggovská vlnová délka, n_{eff} je efektivní index lomu periodické struktury Braggovské

mřížky a Λ je perioda změn indexu lomu. Struktura FBG je tedy tvořena periodickou změnou indexu lomu n_1 (index lomu jádra optického vlákna) a indexu lomu $n_1 + \delta n$, kde δn je indukovaná hodnota indexu lomu.

Kromě parametru Braggovské vlnové délky se Braggovské mřížky popisují odrazivostí a šířkou odrazného spektra. Odrazivost určuje, jaký podíl světla na Braggovské vlnové délce se odrazí, označuje se parametrem R a nabývá hodnoty 0 až 1, popřípadě 0 až 100 %. Šířka spektra je udávána jako maximální šířka spektra v polovině maxima $FWHM$ (Full Width at Half Maximum) a standardně se pohybuje od stovek pikometrů až po jednotky nm..

Braggovské mřížky lze využít pro měření téměř libovolné fyzikální veličiny a dle publikačních výstupů také pro měření některých chemických parametrů. Princip snímání je založen na vhodně zvoleném způsobu zapouzdření, které má za úkol posílit citlivost na měřenou veličinu a pokud možno maximalizovat rezistenci vůči ostatním veličinám.

Braggovské mřížky se vyznačují základní citlivostí na mechanické a teplotní namáhání periodické struktury mřížky. Tyto vnější vlivy mění geometrické a materiálové vlastnosti struktury, což se projevuje posunem Braggovské vlnové délky.

Braggovská mřížka tedy vykazuje elementární citlivost na deformaci a teplotní namáhání dle následujícího vztahu:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T, \quad (5)$$

kde k je deformační citlivostní koeficient, ε je působící deformace, α_Λ je koeficient teplotní roztažnosti, α_n je teplotně optický koeficient a ΔT je změna okolní teploty [15]. První část rovnice (5) představuje vliv deformace ε a druhá část vliv změny okolní teploty ΔT . Intenzita vlivu deformace se popisuje deformačním koeficientem k dle vztahu:

$$k = 1 - p_e, \quad (6)$$

kde p_e je foto-elastický koeficient vyjadřovaný vztahem:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (7)$$

kde p_{11} a p_{12} jsou komponenty napětově-optického tenzoru a parametr ν je Poissonův poměr. Tabulka 1 uvádí hodnoty těchto parametrů pro křemenné sklo, z něhož se vyrábějí standardní optická vlákna.

Druhá část rovnice (5) popisuje teplotní citlivost a obsahuje koeficient teplotní roztažnosti α_Λ , který udává míru změny geometrických vlastností a teplotně optický koeficient α_n , který vyjadřuje míru vlivu působící teploty na materiálovou změnu optického vlákna, tedy změnu indexu lomu. Hodnoty těchto parametrů pro křemenné sklo jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Hodnoty koeficientů související s deformační citlivostí Braggovských mřížek.

Parametr	Materiál	Hodnota	Jednotka
p_{11}	Křemenné sklo	0,113	-
p_{12}	Křemenné sklo	0,252	-
ν	Křemenné sklo	0,17	-
n_{eff}	Křemenné sklo	1,482	-

Tabulka 2: Hodnoty koeficientů související s teplotní citlivostí Braggovských mřížek.

Parametr	Materiál	Hodnota	Jednotka
α_Λ	Křemenné sklo	$0,55 \times 10^{-6}$	$^{\circ}C^{-1}$
α_n	Křemenné sklo	$(6.4 - 8.6) \times 10^{-6}$	$^{\circ}C^{-1}$

Teplotní a deformační citlivost je závislá na hodnotě Braggovské vlnové délky, proto se deformační a teplotní citlivost vyjadřuje pomocí normalizovaných vztahů. Pokud zohledníme hodnoty koeficientů uvedených v tabulkách Tab. 1 a Tab. 2, můžeme vyjádřit normalizovaný deformační koeficient při konstantní teplotě:

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta \varepsilon} = 0,78 \times 10^{-6} \mu strain^{-1}, \quad (8)$$

a normalizovaný teplotní koeficient při konstantní deformaci

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = 6,678 \times 10^{-6} ^{\circ}C^{-1}. \quad (9)$$

Oba zmíněné normalizované tvary popisují citlivosti za podmínky, že druhá veličina je konstantní. Pro standardní Braggovskou vlnovou délku na vlnové délce 1550 nm lze vyjádřit deformační citlivost 1,209 pm/ $\mu strain$ a teplotní citlivost 10,351 pm/ $^{\circ}C$. Braggovské mřížky patří mezi nejpoužívanější senzory pro měření různých fyzikálních veličin a své uplatnění nacházejí také v oblasti monitorování automobilů (kapitola 4.2) a monitorování kolejových vozidel (kapitola 4.3).

3.4 Optovláknový interferometr

Interferometr je zařízení, které využívá princip interferometrie, kde dvě světelné vlny spolu interagují. Popíšeme-li dvě vlnění rovnicemi:

$$y_1 = \sqrt{I_1} \cos \varphi_1, \quad (10)$$

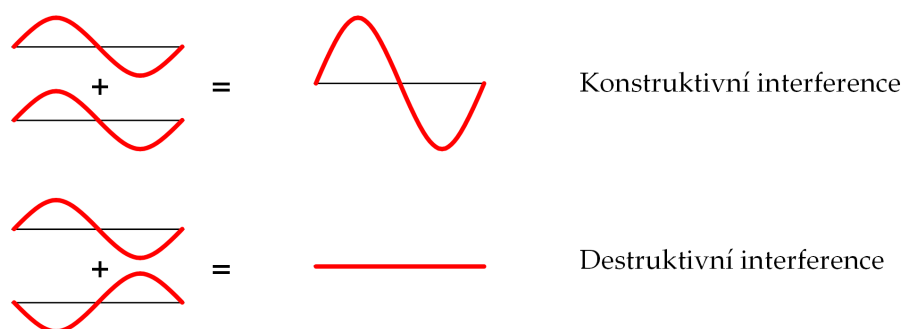
$$y_2 = \sqrt{I_2} \cos \varphi_2, \quad (11)$$

3 OPTOVÁKNOVÉ SNÍMAČE

kde I_1 a φ_1 jsou intenzita a fáze prvního vlnění, I_2 a φ_2 jsou intenzita a fáze druhého vlnění, potom intenzitu součtu obou vlnění I můžeme vyjádřit vztahem:

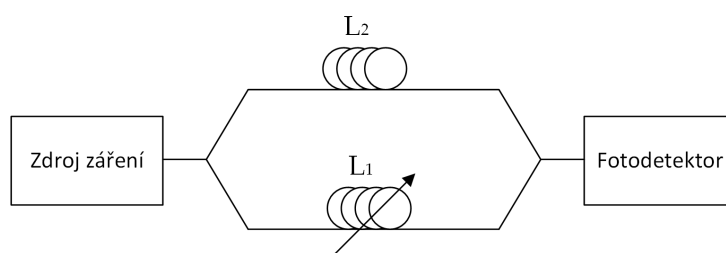
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (12)$$

kde φ je fázový rozdíl mezi oběma vlněními $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Z rovnice (12) je zřejmé, že mohou nastat dvě hraniční situace: konstruktivní interference pokud $\varphi = 0$ a destruktivní interference pokud $\varphi = \pi$ (Obr. 3.2). [16]



Obrázek 3.2: Konstruktivní a destruktivní interference.

Interference světla v interferometru, jako je Mach-Zehnderův interferometr (Obr. 3.3), hraje klíčovou roli v měření a analýze optických vlastností. V tomto typu interferometru je laserové záření nejprve rozděleno do dvou ramen, nazývaných měřicí a referenční. Následně jsou obě ramena spojena a v místě spojení dochází k interferenci obou vlnění v závislosti na jejich fázovém rozdílu. Důsledkem je, že tato interference mění intenzitu světla, která je detekována fotodetektorem.



Obrázek 3.3: Konstrukční schéma Mach-Zehnderova interferometru.

Interferometry patří mezi nejcitlivější optovláknové senzory mechanických vibrací a jsou tedy vhodné pro neinvazivní monitorování v automobilové a kolejové dopravě, více o jejich využití v této oblasti bude pojednáno v kapitole 4.3.

3.5 Optovláknové snímače v železniční dopravě

Přestože jsou kolejové obvody nahrazovány novějšími počítači náprav [17], stále probíhá výzkum zaměřený na co největší eliminaci elektromagnetického rušení [18]. Optovláknové senzory zcela eliminují tento nedostatek, a proto se následující část zaměřuje pouze na publikační výstupy týkající se optovláknových senzorických technologií pro detekci kolejových vozidel [19].

3.5.1 FBG snímače v železniční dopravě

Rešerše vědeckých článků zabývajících se využití FBG senzorů pro počítání náprav v železniční dopravě ukázala, že nejběžnější metodou instalace je lepení optických vláken přímo na stojinu [20] nebo patu kolejnice [21], s odezvou v řádu desítek μstrain . Například vlákno s FBG přilepené na patu kolejnice pomocí UV-fotopolymerizovaného uretan-akrylátového lepidla bylo úspěšně použito pro detekci jednotlivých náprav a měření rychlosti [22]. Lepení vláken s FBG na kolejnici bylo využito také ve studiích [23],[24],[25].

Pokročilejší přístup představuje instalace FBG senzorů na ocelový plíšek o tloušťce 1 mm, který je následně přivařen na kolejnici, což umožňuje dosáhnout maximální deformace 250 μstrain [26]. Další alternativou je použití hliníkové podložky s drážkou, do které je vlákno s FBG přilepeno. Tato podložka se umísťuje pod patu kolejnice mezi sousední pražce a je fixována pomocí mechanických držáků [27]. Obdobný přístup představuje senzor vyrobený z nerezové oceli s polymerovými částmi, instalovaný rovněž pod patu kolejnice [28]. Oba typy senzorů poskytují odezvu snímače kolem 150 μstrain , ale na rozdíl od přímého lepení nebo svařování na kolejnici, nabízí lepší přístup k údržbě a výměně senzorů, čímž zvyšuje celkovou životnost a funkčnost systému.

Další přístup využití Braggovských mřížek představují komerčně dostupné FBG akcelerometry. Jeden z nich byl instalován na pražec kolejnice a s použitím filtrování signálu dolní propustí bylo možné úspěšně detekovat jednotlivé nápravy kolejových vozidel. [29], [30].

3.5.2 Interferometrické snímače v železniční dopravě

V případě interferometrů aplikovaných v železniční dopravě lze identifikovat několik přístupů k jejich implementaci pro detekci kolejových vozidel nebo jejich náprav. Jedním z nich je použití Fabry-Pérotova interferometru, který byl implementován do hliníkové destičky a připevněn na patu kolejnice pomocí silyl-modified (MS) polymerů. Tento přístup však trpí značnou citlivostí interferometru, což vede k výraznému šumu při vyšších rychlostech průjezdu a neschopnosti spolehlivě detekovat všechny nápravy [31].

Další studie se zabývala obdobným přístupem, který řeší problém citlivosti izolací interferometru pomocí materiálu na bázi minerální vlny. Tento způsob izolace zlepšuje přesnost detekce náprav tím, že eliminuje vliv vnějších vibrací a změn teploty [32].

Mach-Zehnderův interferometr byl naopak instalován do samostatného boxu umístěného

vedle kolejnice, který detekuje průjezdy kolejových vozidel. s ohledem na velmi vysokou citlivost interferometru nelze v šumu spolehlivě zaznamenat jednotlivé nápravy [33].

Z provedené rešerše vyplývá, že uvedené metody, i když poskytují cenné výsledky, mají určité nevýhody. Patří mezi ně nadměrná citlivost vedoucí k šumu, omezená spolehlivost při detekci všech náprav a obtížná údržba a výměna senzorů. Tyto faktory zdůrazňují potřebu dalšího vývoje a optimalizace senzorických systémů v železniční dopravě, jak je uvedeno v následující kapitole 4

4 Vlastní výsledky v oblasti zabezpečení železniční dopravy

Optovláknové senzory jsou vhodnou alternativou ke konvenčním sensorům v železniční dopravě. Mezi hlavní výhody optovláknových sensorů patří: imunita vůči elektromagnetickému rušení, elektrická pasivita v místě měření, měření na dlouhé vzdálenosti, vysoká citlivost v případě interferometrů a vícebodové měření pomocí jediného přírodního vlákna v případě FBG sensorů.

Na druhou stranu využití optovláknových sensorických technologií v železniční dopravě musí splňovat následující požadavky: zajištění citlivosti na požadovanou veličinu, eliminace vlivu nežádoucích veličin, dostatečná ochrana optických vláken před vnějšími mechanickými a chemickými vlivy, vhodná implementace a fixace k monitorovanému objektu (kolejnice, vozovka apod.) a vhodná volba zapouzďovaných materiálů pro dané prostředí pro zajištění potřebné životnosti senzoru.

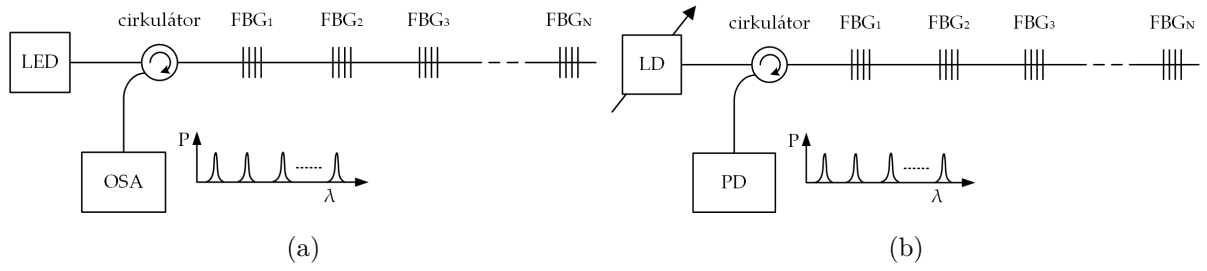
V následující části budou diskutovány vlastní výsledky z oblasti metod vyhodnocování mřížkových sensorů a optovláknových sensorů určených pro zvýšení bezpečnosti v železniční dopravě. Pro rozlišení vlastních citovaných výsledků je u těchto citací před číselným označením použit prefix 'A'.

4.1 Multiplexace a vyhodnocování FBG sensorů

Pro zajištění komplexního a efektivního monitorování v železniční dopravě je nezbytné nasadit technologie, které umožňují sledovat více bodů současně. Jednou z takových technologií je multiplexace FBG sensorů, která umožňuje efektivní využití optovláknových sensorů v rozsáhlých monitorovacích systémech, jako je železniční doprava. Pro vícebodové měření je klíčové rozlišení signálů od jednotlivých sensorů, čehož lze dosáhnout pomocí vlnového nebo časového multiplexu. Vlnový multiplex je praktický a vhodný pro vyhodnocování desítek sensorů současně, zatímco časový multiplex se využívá jen ve speciálních případech kvůli vysokým nárokům na rychlost elektronických a optických komponent. Zvláštní skupinu tvoří intenzitní FBG snímače, které jsou finančně nenáročné a vhodné pro monitorování malého počtu sensorů na odlehklých místech. Multiplexace a vyhodnocování intenzitních FBG snímačů jsou podrobněji diskutovány v této kapitole

4.1.1 Vlnový multiplex

Vlnový multiplex je metoda založená na rozdílných Braggovských vlnových délkách jednotlivých snímačů. Vyhodnocení odražených spektrálních příspěvků od jednotlivých snímačů se nejčastěji provádí pomocí širokospektrálního zdroje záření SLED (Superluminescent Diode) a optického spektrálního analyzátoru OSA (Optical Spectrum Analyzer) (Obr. 4.1a). Alternativně lze použít laditelný laser LD (Laser Diode) a fotodetektor PD (Photodetector) (Obr. 4.1b).



Obrázek 4.1: Vlnový multiplex využívající (a) širokospektrální zdroj záření a optický spektrální analyzátor; (b) laditelný úzkopásmový laser a optický fotodetektor.

Varianta s LED a OSA je nejpoužívanější metodou, která poskytuje vyšší vzorkovací frekvence a nižší nároky na zpracování signálu. Umožňuje také rekonstrukci spektra, které je tvořeno sumou dílčích, nepřekrývajících se odrazných spekter jednotlivých mřížkových snímačů. Teoreticky lze maximální kapacitu vlnového multiplexu, tedy počet současně vyhodnocovaných FBG, vyjádřit následujícím vztahem:

$$N_{WDM} \leq \frac{FWHM_{LED}}{FWHM_{FBG}}, \quad (13)$$

kde $FWHM_{LED}$ je šířka spektra zdroje záření v polovině maxima a $FWHM_{FBG}$ je šířka odrazného spektra FBG v polovině maxima. V reálných podmínkách se odrazné spektrum posouvá vlivem měřených veličin, a proto je pro každý FBG senzor přidělen spektrální prostor, který je nazván měřicím kanálem.

Při návrhu senzorické větve založené na vlnovém multiplexu je nutné zohlednit několik parametrů, které lze rozdělit do tří skupin:

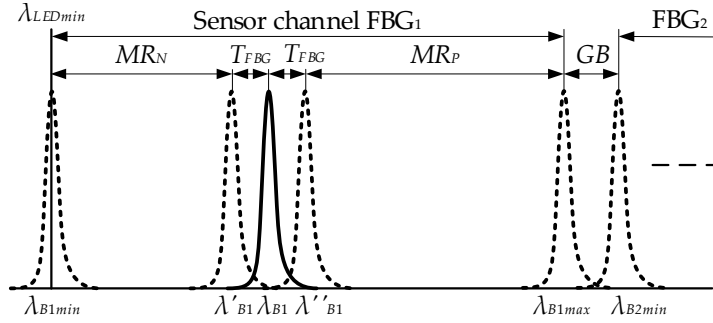
- parametry pracovní spektrální oblasti: centrální vlnová délka zdroje záření λ_{LED} a jeho šířka spektra $FWHM_{LED}$,
- parametry definující Braggovské mřížky, senzory a jejich výrobu: šířka odrazného spektra $FWHM_{FBG}$, výrobní tolerance Braggovské vlnové délky T_{FBG} ,
- parametry definující požadavky na měření: citlivostní koeficient k_{Nx} , pozitivní měřicí rozsah MR_P , negativní měřicí rozsah MR_N , výrobní tolerance Braggovské vlnové délky výsledného senzoru T_S , minimální velikost ochranného pásma GB_{min} a celková velikost ochranného pásma GB .

Výstupem jsou parametry senzorické větve, které zahrnují Braggovské vlnové délky jednotlivých FBG snímačů λ_{Bn} , počet měřicích kanálů N a jejich spektrální šířka. [A1]

Podmínkou správného vyhodnocování Braggovských senzorů je, aby v žádném případě nedošlo k překrytí spekter jakýchkoliv dvou sousedních FBG senzorů. V článku [A2] bylo analyzováno

celkem 8 senzorických modelů s různými kombinacemi použití parametrů MR_P , MR_N , GB_{min} a T_{FBG} .

Nejkomplexnější senzorický model s označením M4T (Obr. 4.2) zahrnuje všechny uvedené parametry. Spektrální zobrazení prvního měřicího kanálu modelu M4T je tvořeno Braggovskou vlnovou délkou λ_{B1} s tolerančními pásy T_{FBG} , které představují výrobní toleranci Braggovské vlnové délky při výrobě FBG senzoru. Kolem těchto pásů jsou měřicí rozsahy MR_N resp. MR_P , které představují spektrální pracovní prostor Braggovského senzoru, ve kterém se může Braggovský vlnová délka pohybovat vlivem působení měřené veličiny. Mezi měřicími kanály je pak ochranné pásmo GB , které zahrnuje minimální ochranné pásmo GB_{min} pro rozlišení dvou sousedních spekter v limitním případě, a dodatečné pásmo, které zajišťuje ochranu před nečekanými překryvy sousedních spekter způsobenými vnějšími vlivy, jako je výrazné kolísání teplot apod.



Obrázek 4.2: Spektrální zobrazení matematického modelu M4T.

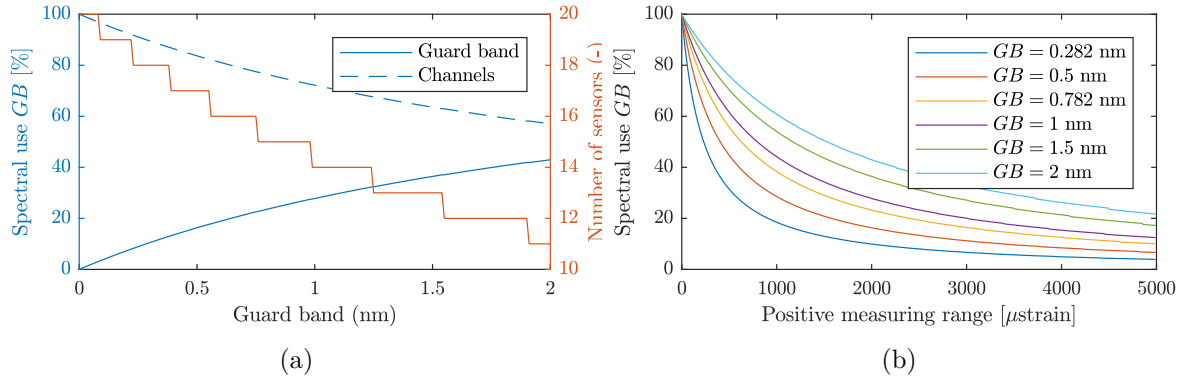
Výpočet Braggovských vlnových délek FBG senzorů v rámci komplexního modelu M4T je možné realizovat následujícím vztahem:

$$\begin{aligned} \lambda_{Bn} = & \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + \\ & GB \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^{i-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + \\ & 2T_{FBG} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^i}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + T_{FBG}. \end{aligned} \quad (14)$$

který zohledňuje jak měřicí rozsahy (pozitivní i negativní), tak velikost ochranného pásma a výrobní toleranci Braggovských vlnových délek. Ostatní vztahy pro výpočet počtu měřicích kanálů a jejich šíře jsou uvedeny v publikaci [A2]. Publikované modely umožňují analyzovat dopady jednotlivých parametrů na kapacitu vlnového multiplexu.

Příklad senzorické větve s parametry šířka spektra LED zdroje $FWHM_{LED}=50$ nm, pozitivní měřicí rozsah $MR_P=1000$ μ strain, šířka odrazných spekter $FWHM_{FBG}=200$ pm ukazují,

že ochranné pásmo je nejvíce limitující pro maximální počet senzorů v sensorické větvi. V případě minimálního ochranného pásma s hodnotou $GB_{min}=0,282$ nm poklesne maximální počet senzorů z 20 na 18 (Obr. 4.3a). V případě navýšení ochranného pásma GB na hodnotu cca 1 nm, kapacita sensorického modelu klesne na 14 senzorů, protože ochranná pásma zabírají přibližně 25% pracovní spektrální oblasti. Spektrální využití ochranného pásma pro různé velikosti pozitivních měřicích rozsahů a velikosti ochranných pásem je zobrazeno na Obr. 4.3b. Výsledky ukazují, že velikost ochranného pásma má významný vliv na odolnost vůči přeslechům mezi sousedními kanály, ale zároveň významně omezuje kapacitu vlnového multiplexu. Proto je nutné tento parametr při návrhu sensorické větve zodpovědně nastavit. Detailnější analýza jednotlivých parametrů je uvedena v publikaci [A2].



Obrázek 4.3: Spektrální využití měřicích kanálů a ochranných pásem v závislosti na různých velikostech ochranných pásem v modelové větvi senzoru M3 (a). Část spektrálního využití ochranných pásem pro různé hodnoty měřicích rozsahů a různé hodnoty ochranných pásem (b).

V případě sensorické větve, která je tvořena FBG snímači různých veličin, je nutné provést návrh podle specifikovaného postupu [A2]:

$$\lambda_{B(n)min} = \lambda_{LEDmin} \quad \text{pro } (n = 1), \quad (15)$$

$$\lambda_{B(n)min} = \lambda_{B(n-1)max} + GB_{n-1} \quad \text{pro } (n > 1), \quad (16)$$

$$\lambda'_{B(n)} = \lambda_{B(n)min} + k_{x(n)} MR_{N(n)}, \quad (17)$$

$$\lambda_{B(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)}, \quad (18)$$

$$\lambda''_{B(n)} = \lambda_{B(n)} + T_n = \lambda_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)}, \quad (19)$$

$$\lambda_{B(n)max} = \lambda''_{B(n)} + k_{x(n)} MR_{P(n)}. \quad (20)$$

kde $k_{x(n)}$ je citlivostní koeficient FBG snímače na požadovaný měřený parametr v i -tém měřicím kanálu, T_n je výrobní tolerance Braggovské vlnové délky FBG snímače, která je tvořena výrobní

tolerancí při výrobě Braggovské mřížky $T_{FBG(n)}$ a výrobní tolerancí při výrobě FBG snímače $T_{S(n)}$. Na základě uvedené analýzy umožňuje vlnový multiplex vyhodnocovat až několik desítek snímačů současně. [A2]

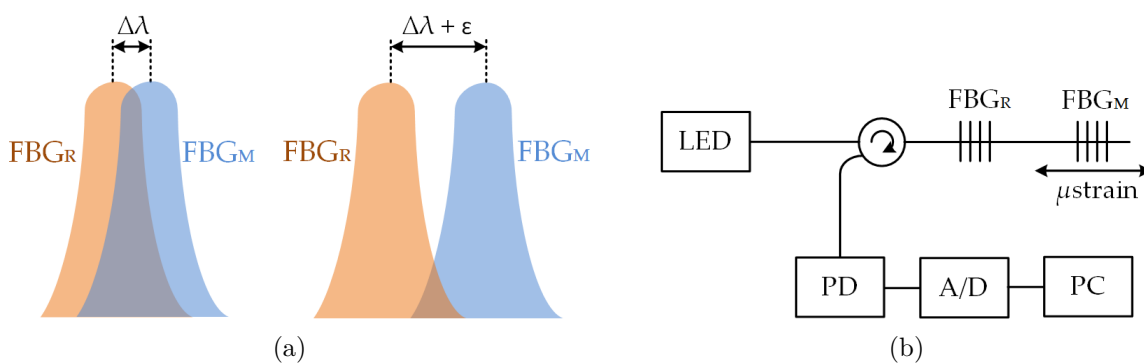
Vlnový multiplex se ukazuje jako vhodný pro monitorování jízdy vlaků na středně dlouhých úsecích, kde je možné vyhodnocovat desítky FBG senzorů současně. Tento přístup umožňuje efektivní sledování různých parametrů podél železniční tratě, což může poskytnout vyšší úroveň zabezpečení železničního provozu, viz kapitola ??.

4.1.2 Vyhodnocování intenzitních FBG snímačů

Jak již bylo diskutováno, v případě Braggovských snímačů je informace o měřené veličině modulována ve spektrální oblasti. Pro demodulaci informace je nutné určit posun Braggovské vlnové délky pomocí širokospektrálního zdroje záření SLED a optického spektrálního analyzátoru OSA.

Spektrální vyhodnocování je ovšem finančně náročné pro aplikace, kde je nutné měřit nebo vyhodnocovat malý počet mřížkových snímačů v řádu jednotek. V případě vyhodnocování malého počtu snímačů se využívají další metody, které zajišťují konverzi změny spektra na změnu jiného parametru, například výkonu světla. Toho lze dosáhnout uspořádáním dvojice Braggovských mřížek s částečně se překrývajícími spektry.

Princip dvojice spektrálně se překrývajících FBG je založen na vyhodnocení výkonu, který je dán plochou odrazných spekter obou Braggovských mřížek, kdy referenční mřížka FBG_R není ovlivňována měřenou veličinou, zatímco měřicí mřížka FBG_M je na ni citlivá (Obr. 4.4a). Podmínkou je, aby se spektra v klidovém režimu částečně překrývala. Při změně vlivu měřené veličiny dochází k posunu odrazného spektra měřicí FBG_M , čímž se mění plocha odrazných spekter, a tedy i výkon detekovaného světla fotodetektorem. Zdrojem je širokospektrální zdroj LED a výkon je detekován fotodetektorem PD (Obr. 4.4b).

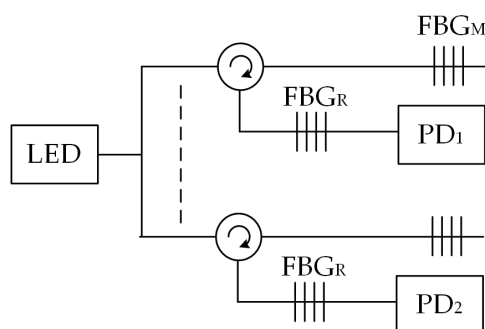


Obrázek 4.4: Princip konverze změny spektrální polohy na změnu optického výkonu (a); Schéma zapojení (b).

Dvojice Braggovských mřížek se spektrálně se překrývajícími spektry má jednu hlavní nevý-

hodu. Pracovní oblast je limitována počátečním uspořádáním obou spekter v nezátíženém stavu a uspořádáním, kdy se obě spektra oddálí natolik, že se již nepřekrývají. Analýza parametrů obou Braggovských mřížek (vzdálenost mezi Braggovskými vlnovými délkami, šířka odrazných spekter a jejich odrazivosti) ukazuje, že princip je vhodný pro měření malých deformací v rozsahu do $300 \mu\text{strain}$ s velmi dobrou linearitou a opakovatelností. [A3]

Vyhodnocování několika FBG intenzitních senzorů vyžaduje rozdělení vstupního světla do několika samostatných větví, ve kterých se nachází cirkulátor, intenzitní FBG snímač a foto-detektor, který vyhodnocuje odražený výkon od intenzitního FBG senzoru (Obr. 4.5).



Obrázek 4.5: Schéma vyhodnocení n -intenzitních FBG senzorů.

Výhodou tohoto zapojení je jednoduchý a finančně méně náročný způsob vyhodnocování malého počtu FBG senzorů, protože nevyžaduje použití drahého optického spektrálního analyzátoru. Pro vyhodnocování byla navržena vyhodnocovací jednotka pro vyhodnocování intenzitních FBG senzorů [A4], což je ideální pro sledování průjezdů tramvají a vlakových souprav na menších železničních stanicích, viz kapitola 4.3.

4.2 Zabezpečení železničních přejezdů

V České republice se ke dni 31.12.2023 nachází 7580 železničních přejezdů, z toho 3290 přejezdů je zabezpečeno pouze výstražným křížem, 4053 přejezdů světelným zabezpečovacím zařízením a z toho 1866 přejezdů světelným zabezpečovacím zařízením se závorami. Každý rok dochází k desítkám mimořádných událostí na železničních přejezdech, jejichž důsledkem jsou vysoké škody na majetku, zranění a smrti cestujících, cyklistů a chodců. Jen v roce 2022 přišlo při 151 událostech o život 35 lidí a dalších 92 bylo zraněno. I proto je jednou z priorit Správy železnic zvyšování bezpečnosti na železničních přejezdech. Ve spolupráci s Policií České republiky a Drážním úřadem se každý rok modernizují desítky železničních přejezdů, u kterých dochází ke zvyšování zabezpečení. Převážně se jedná o přejezdy, na kterých se v minulosti stávaly opakovaně dopravní nehody nebo jsou vybavené nejstaršími typy zabezpečovacího zařízení či pouze výstražnými kříži.

Kromě uvedených zabezpečovacích zařízení, která informují o blížícím se vlaku nebo zabrání vjezdu automobilu na přejezd pomocí závor, je možné využít i systémy monitorující přítomnost automobilu na železničním přejezdu. V případě, že se na přejezdu nachází automobil a k přejezdu přijíždí vlak, je tato informace přenesena strojvedoucím. Ten může srážce zabránit zastavením nebo alespoň snížit její dopady zpomalením vlaku. Mezi takové systémy lze zařadit kamerové systémy, které vyhodnocují obrazový záznam automaticky. Dále to mohou být indukční smyčky instalované ve vozovce před a za přejezdem, které neustále sledují počet vozidel, které na přejezd vjely a z přejezdu vyjely. Kromě zmíněných systémů je možné využít také ultrazvukové nebo radarové systémy.

Alternativou k indukčním smyčkám jsou optovláknové Braggovské senzory a interferometry, které je možné implementovat buď na vozovku, nebo přímo do vozovky, aby monitorovaly přítomnost automobilu na železničním přejezdu. Výhodou oproti indukčním smyčkám pak je to, že zatímco indukční smyčky detekují jednotlivá vozidla, FBG snímače mohou detekovat i jednotlivé nápravy, motocykly a případně také cyklisty.

4.2.1 FBG snímače instalované do vozovky

Instalace optických snímačů do vozovky je náročná kvůli velmi malým rozměrům optických vláken a jejich náchylnosti k mechanickému poškození. Betonové prostředí totiž vystavuje vlákna drsným chemickým a mechanickým podmínkám. Integrace optovláknových technologií pro potřeby zabezpečení železničních přejezdů proto představuje revoluční krok v oblasti železniční bezpečnosti.

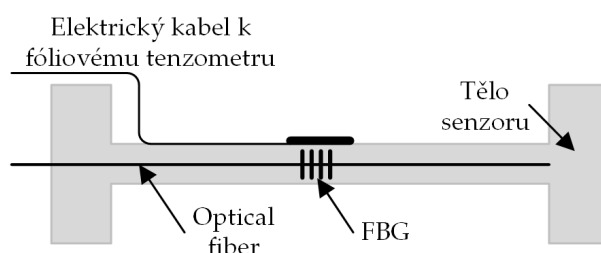
Předchozí výzkumy demonstrují významný potenciál využití distribuovaných systémů v oblasti měření deformací betonových struktur. Experimenty prokazují schopnost kontinuálního monitorování deformací betonových konstrukcí s vysokou přesností a rozlišením, a to s různými typy ochrany optických vláken od standardních využívaných v komunikačních aplikacích,

po speciální senzorické kabely vyvinuté pro potřeby měření deformací. [A5], [A6]

V kontextu železničních přejezdů se otevírá možnost využití těchto pokročilých systémů založených na distribuovaném monitorování deformací DSTS (Distributed Strain Temperature Sensing) pro detekci vozidel. Výhodou těchto systémů je možnost sledování deformace podél celé jeho délky, nevýhodou ale je poměrně dlouhá akviziční doba pro provedení a uložení jednoho naměru. Alternativou pak mohou být distribuované akustické systémy DAS (Distributed Acoustic Sensing), které se vyznačují vzorkovací frekvencí až 2 KHz s vláknem dlouhým 50 km.

V rámci Braggovských jednobodových snímačů je možné snímací element zapouzdřený do různých materiálů a implementovaný v betonové konstrukci využít pro měření deformací v konkrétním bodě.

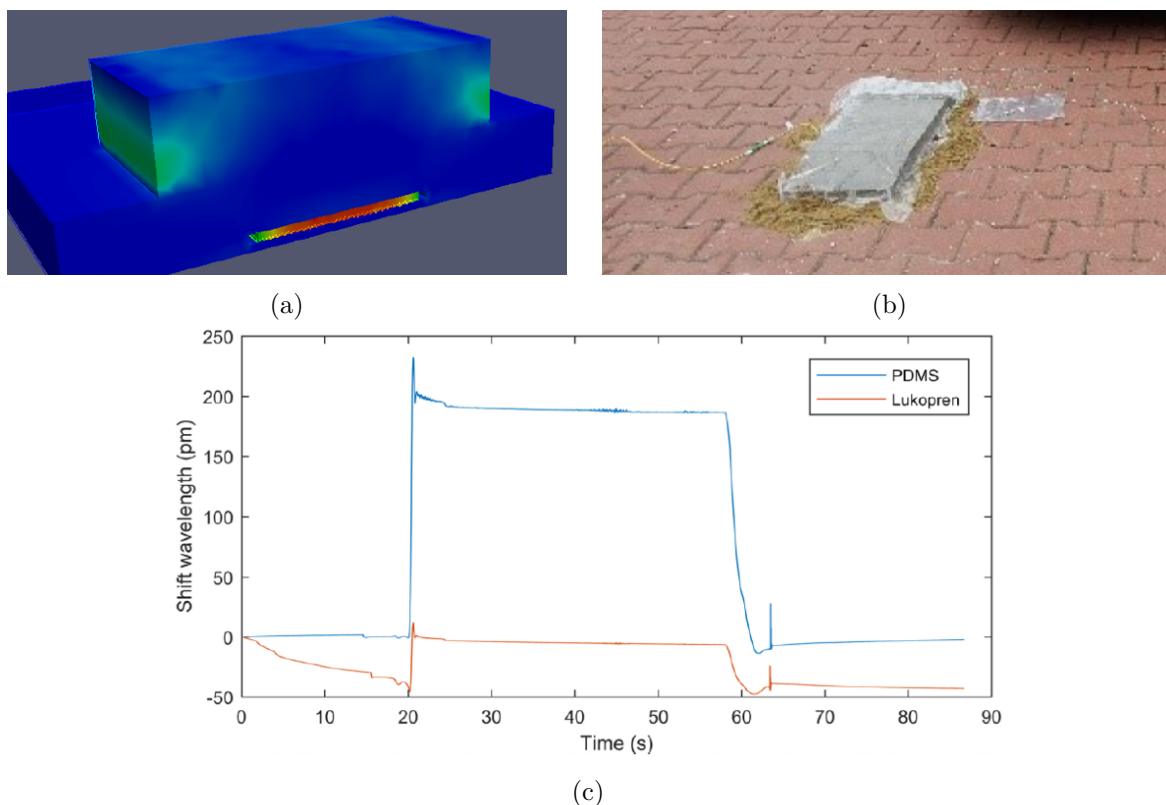
Z hlediska životnosti je vhodné FBG zapouzdřit např. do železných nebo hliníkových profilů (Obr. 4.6). Takto zkonstruovaný senzor s referenčním tenzometrem byl instalován do betonového trámce a zatěžován v hydraulickém lisu. Výsledky měření s FBG snímačem ukazují těsnou korelaci s referenčním snímačem. Velké rozměry jsou však z hlediska instalace do vozovky nevýhodou, protože dochází k velkému narušení integrity vozovky a proto nejsou vhodné pro všeobecné použití. [A7]



Obrázek 4.6: Konstrukce FBG snímače zapouzdřeného do polymeru PDMS umístěného mezi dvě ocelové desky.

Alternativou jsou zalévací polymery, pomocí kterých se dosahuje zlepšení mechanických a environmentálních vlastností výsledných senzorů. Na základě provedeného výzkumu byla simulována zátěž FBG snímače zapouzdřeného do polymeru PDMS (Polydimethylsiloxane) nebo silikonového kaučuku a umístěného v betonové pražci. Výsledky numerického modelování zatížení pražce hmotností 400 kg na ploše 200×200 mm ukazují deformace v místě umístění FBG kolem 200 μ strain (Obr. 4.7a). Na základě provedeného numerického modelování byly vyrobeny dva betonové pražce, jeden s FBG zapouzdřeným do PDMS a druhý s FBG zapouzdřeným do silikonového kaučuku (Obr. 4.7b).

Výsledky ukazují, že chování FBG zapouzdřeného do polymeru PDMS vykazuje dobrou korelaci s numerickým modelováním, zatímco u polymeru Lukapren byla odezva snímače podstatně horší (Obr. 4.7c). To může být způsobeno velmi nízkou přilnavostí Lukaprenu k ostatním materiálům, což vede k nízké odezvě FBG v tomto typu silikonového kaučuku. [A8]



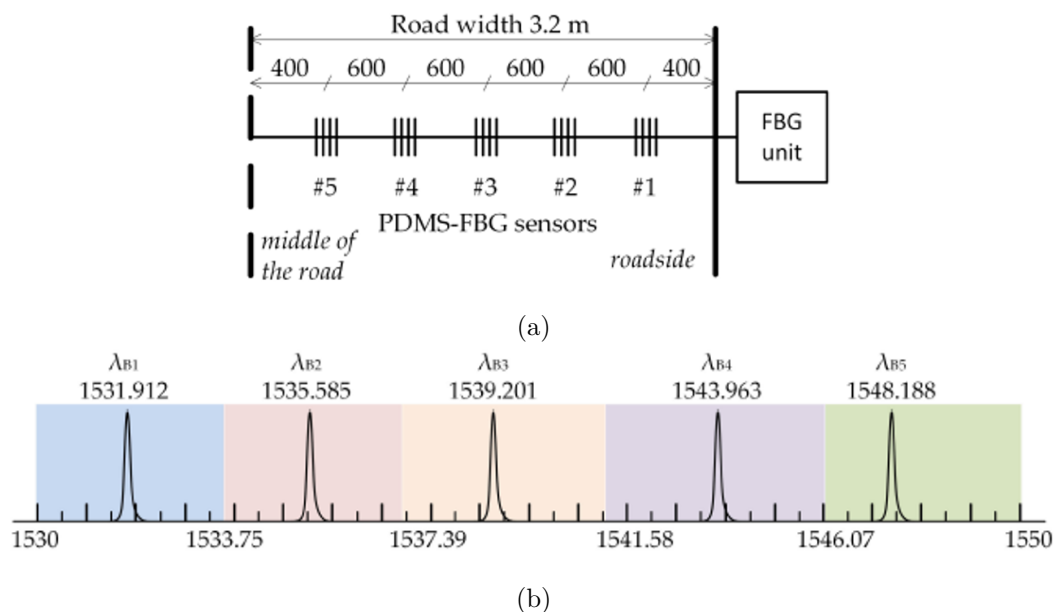
Obrázek 4.7: Numerické modelování zatížení betonového pražce (a); realizace betonového pražce (b); odezva FBG snímače na najetí automobilu na betonový pražec (c).

Výsledky výzkumu potvrdily vhodnost polymeru PDMS pro monitorování zatížení betonových konstrukcí, a proto byl tento typ snímače zvolen pro reálnou instalaci do vozovky. Ve vozovce byla vyfrézována místa pro instalaci FBG snímačů a také drážek pro přívodní kabely (Obr. 4.8a) a následně zalité tekutým asfaltem (Obr. 4.8b).



Obrázek 4.8: Vyfrézovaná vozovka s umístěným FBG snímačem zapouzdřeným do polymeru PDMS (a); zalití vyfrézovaných děr s FBG snímačem tekutým asfaltem (b).

Na základě testovacího měření bylo zjištěno, že FBG snímač je schopen spolehlivě detekovat průjezd automobilu do vzdáleností cca 300 mm, a dále, že odezva snímače na průjezd automobilu se pohybuje v závislosti na typu automobilu a místa průjezdu od $2,1 \mu\text{strain}$ do $236,9 \mu\text{strain}$. Na základě získaných údajů byl instalován do jízdního pruhu o šířce 3,2 m řetízek s 5 FBG senzorů dle nákresu na Obr. 4.9a. s využitím senzorického modelu M4T (viz kapitola 4.1.1) byly navrženy Braggovské vlnové délky jednotlivých FBG snímačů, jak je zobrazeno na Obr. 4.9b.

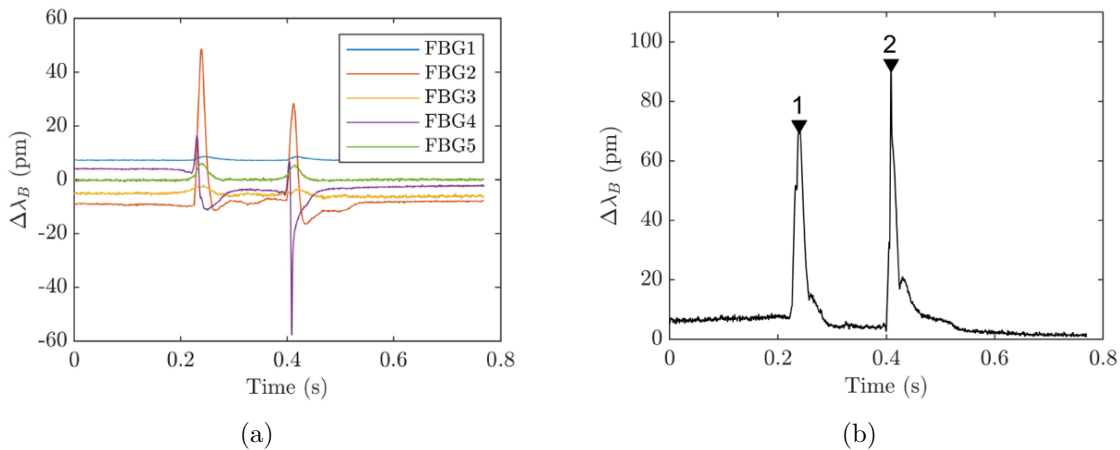


Obrázek 4.9: Schéma umístění FBG snímačů v jízdním pruhu širokým 3,2 m (a); pracovní spektrální oblast a Braggovské vlnové délky senzorického řetízku s 5ti FBG snímači instalovanými do vozovky (b).

Na Obr. 4.10a jsou zobrazeny odezvy jednotlivých FBG snímačů na průjezd automobilu, což ilustruje jejich reakce na zátěž. Pro dosažení robustního a spolehlivého monitorovacího systému se tyto signály sčítají, výsledný průběh ze senzorického řetízku je zobrazen na Obr. 4.10b.

V následném dlouhodobém výzkumu bylo zaznamenáno 3 978 průjezdů osobních a nákladních automobilů. Jako referenční systémy byly použity jak kamerový záznam, tak optické brány detekující jednotlivé průjezdy automobilů. Výsledky osmnáctidenního měření odhalily, že systém dosáhl vysoké přesnosti detekce vozidel, která činila 99,62%. Mezi výhody prezentovaného systému patří snadná instalace v horní části vozovky, možnost připojení ke stávajícímu monitorovacímu systému a možnost implementace dálkového vyhodnocování v rámci koncepce SMART cities.

Stěžejní aplikací v kontextu této práce je využití tohoto přístupu pro zvýšení úrovně zabezpečení železničních přejezdů s ohledem na přesnější informace o výskytu automobilu v místě přejezdu. Tato zvýšená přesnost a spolehlivost je dána schopností rozlišit jednotlivé nápravy,



Obrázek 4.10: Odezva 5ti FBG snímačů na průjezd automobilu (a); výsledný signál získaný součtem všech signálů z FBG snímačů (b).

což u konvenčních indukčních přístupů není možné. [A9]

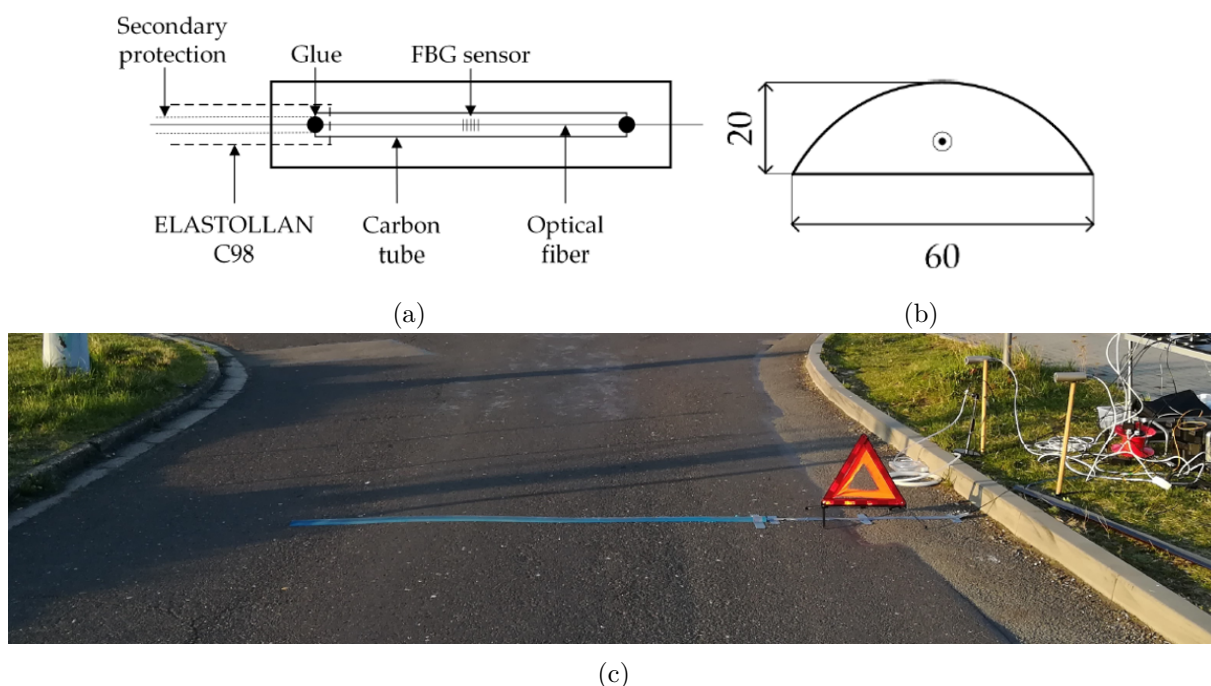
4.2.2 Mobilní optovláknové snímače instalované na vozovku

Způsob monitorování automobilů u železničních přejezdů uvedený v předchozí kapitole vyžaduje invazivní a trvalou instalaci FBG snímačů do vozovky po obou stranách železničního přejezdu. Alternativně je možné realizovat tzv. přenositelné interferometrické senzory nebo FBG snímače pro zajištění dočasného monitorování.

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.4, interferometry poskytují vysokou citlivost na vnější mechanické vibrační nebo akustické působení. Tato vlastnost může být využita také pro sledování průjezdu automobilů kolem sensorického prvku. Výsledky v této oblasti ukazují schopnost detekce průjezdu jak osobních, tak nákladních automobilů s úspěšností přes 94% a to i v případě, že interferometrický senzor je umístěn mimo vozovku [A10],[A11]. V případě použití dvou senzorů umístěných v předem známé vzdálenosti od sebe umožňují interferometry měřit také rychlost jízdy s chybou kolem 2% až 4% [A12],[A13],[A14].

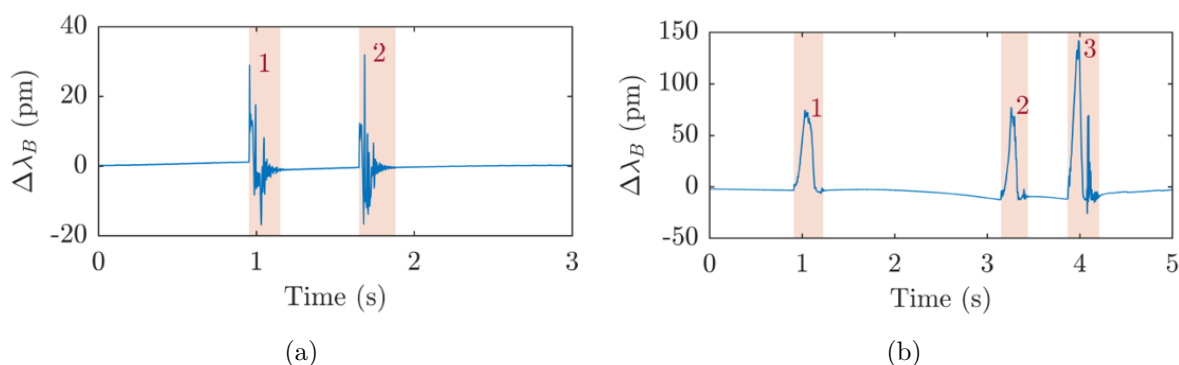
Přenositelný nebo tzv. mobilní snímací pás je realizován vložení optického vlákna s Braggovskou mřížkou do uhlíkové trubičky s vnitřním průměrem 0,3 mm a vnějším průměrem 0,7 mm. Následně je vlákno předepnuto a fixováno na obou koncích k trubičce pomocí dvousložkového lepidla. Toto uspořádání je schopné monitorovat deformaci mezi oběma konci trubičky, proto je možné použít ve vlákne pouze jednu Braggovskou mřížku. Poté je trubička s Braggovskou mřížkou zalita polymerem (Obr. 4.11a), příčný řez mobilního pásu je znázorněn na Obr. 4.11b. Vzhledem k tomu, že v tomto případě automobily přejíždějí přímo přes mobilní pás, bylo nutné zvolit polymer s dostatečnou odolností vůči mechanickému poškození. Na základě testů byl zvolen polymer ZA50LT s tvrdostí 50 Shore A. Mobilní pás o délce 2400 mm byl následně umís-

těm do střední části vozovky s jednosměrným provozem Obr. 4.11c. Díky dostatečné citlivosti je možné úspěšně detekovat automobil, který najede na mobilní pás pouze jednou stranou, je možné detekovat motocykly a dokonce také přejezdy cyklistů. [A12],[A15]



Obrázek 4.11: Boční pohled na mobilní pás (a); příčný pohled na mobilní pás (b); reálná instalace mobilního pásu na vozovku (c).

Citlivost mobilního pásu je natolik vysoká, že dokáže rozlišit jednotlivé nápravy. Typická odezva na průjezd osobního automobilu je zobrazena na (Obr. 4.12a), zatímco odezva na průjezd osobního automobilu s přívěsným vozíkem je zobrazena na (Obr. 4.12b).



Obrázek 4.12: Odezva mobilního FBG pásu na průjezd osobního automobilu (a) a osobního automobilu s přívěsným vozíkem (b).

4.3 Zabezpečení provozu na železničních tratích

Monitorování vlakových vozidel na širých tratích se provádí konvenčními snímači, jako jsou kolejové obvody nebo počítače náprav, o kterých bylo pojednáno v kapitole 2.4. Oba typy snímačů se využívají jako doplňkové snímače v rámci železničního zabezpečovacího systému ETCS, který sice pro identifikaci vlaku v určitém úseku primárně využívá balízy, ale obecně je doporučováno pro zvýšení úrovně zabezpečení rozšířit tento přístup právě o redundantní kolejové obvody a počítače náprav.

Funkčnost kolejových obvodů může být ovlivněna vnějšími podmínkami, jako jsou koroze kolejnic, vlhkost, teplotní výkyvy a elektromagnetické rušení. Další problém představuje izolace traťových úseků, která je klíčová pro správnou funkci těchto obvodů. Počítače náprav mohou být naopak ovlivněny vibracemi a mechanickými šoky, které jsou v železničním prostředí běžné. To může vést k nesprávné funkčnosti, zejména u starších a špatně udržovaných počítačů náprav. [34]

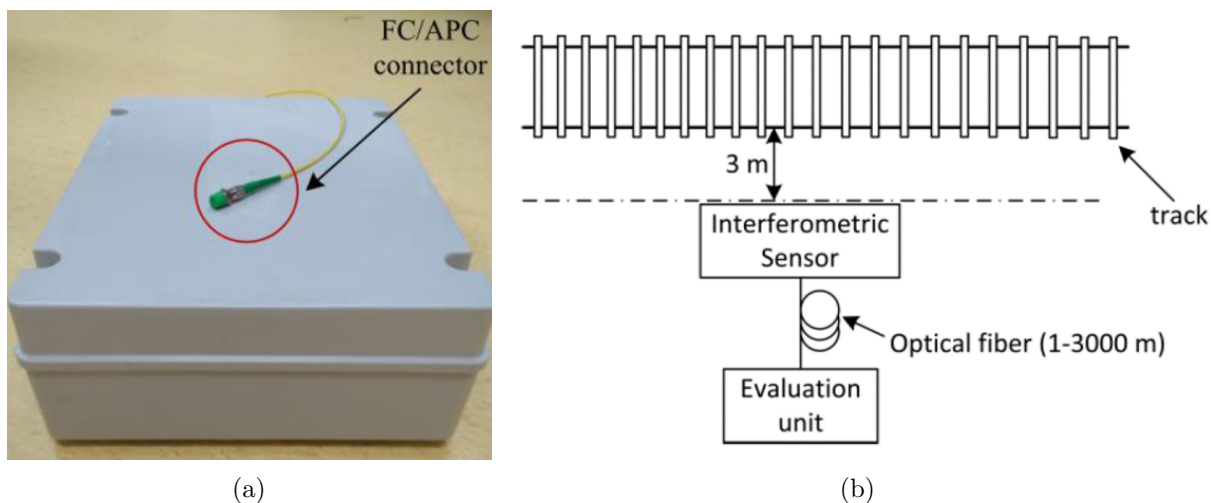
Hlavní výhodou optovláknových snímačů je jejich imunita vůči elektromagnetickému rušení. Proto mohou tyto snímače přidat další vrstvu redundantního zabezpečení nezávislou na elektrických obvodech. Tyto snímače mohou poskytovat křížovou kontrolu dat z konvenčních senzorů a v případě selhání primárního systému nabízet záložní data pro bezpečnostní opatření. V následující části jsou tedy popsány vlastní výsledky z oblasti výzkumu a vývoje optovláknových snímačů pro železniční a tramvajovou dopravu.

4.3.1 Interferometrický přístup detekce kolejových vozidel

Alternativní způsob monitorování průjezdu kolejových vozidel představují seismické snímače vybavené akcelerometry [A16]. Tento způsob monitorování je pro železniční dopravu výhodný, protože nevyžaduje žádný zásah do železniční trasy ani do kolejnice. Pro neinvazivní monitorování průjezdu kolejových vozidel jsou tedy vhodné optovláknové interferometry, které patří mezi nejcitlivější optovláknové senzorické technologie pro měření vibrací, viz kapitola 3.4. Optovláknový Mach-Zehnder interferometr je možné využít v řadě aplikací na základě optimalizace jeho frekvenční citlivosti na působení vnějších veličin, a to vhodným výběrem optického vlákna [A17], vhodnou fixační metodu [A18],[A19] nebo vhodným zapouzdřením [A20].

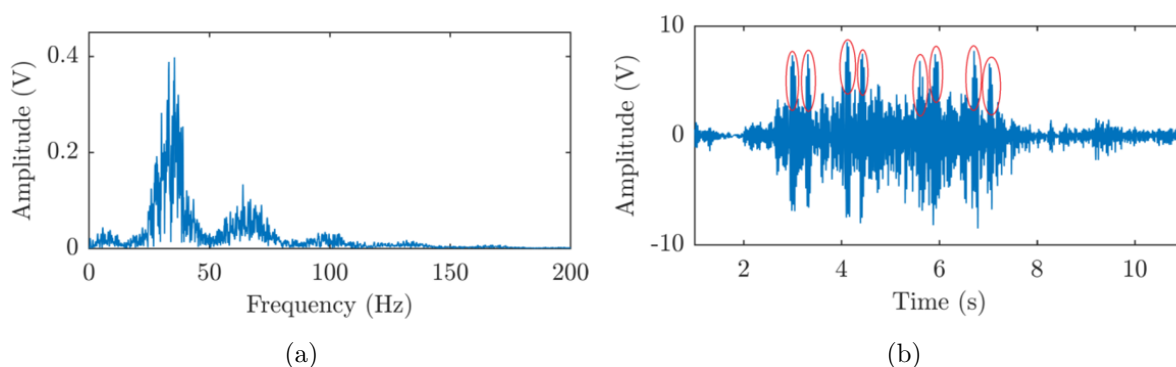
Optovláknový interferometr v provedení Mach-Zehnder optimalizovaný pro snímání frekvencí v rozsahu od 1 do 100 Hz je realizován v plastovém boxu tak, že měřicí rameno je v přímém kontaktu se spodní plochou boxu a referenční rameno je uloženo ve vibrace tlumícím materiálu (Obr. 4.13a). Takto sestavený interferometrický snímač je možné umístit v ose kolejnice nebo vedle kolejnice, jak je zobrazeno na Obr. 4.13b. [A21],[A22]

Konstrukce snímače je realizována z materiálů, které se vyznačují imunitou vůči elektromagnetickým interferencím. Další výhodou tohoto přístupu je možnost umístit vyhodnocovací jednotku až několik kilometrů od místa měření. Propojení snímací a vyhodnocovací části je



Obrázek 4.13: Interferometrický Mach-Zehnder snímač optimalizovaný pro železniční aplikace (a); umístění snímače a vyhodnocovací jednotky vedle kolejnice (b).

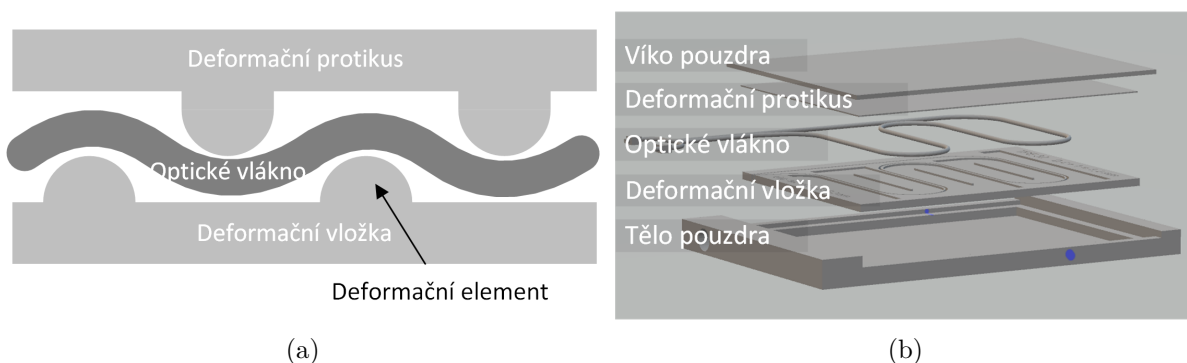
možné realizovat jednovírovým optickým vláknem, případně je možné využít standardní nepoužívaná optická vlákna, která jsou instalována kolem železniční cesty [A23]. Frekvenční odezva interferometru obsahuje nejvýraznější složky v rozmezí od 25 do 45 Hz (Obr. 4.14a). Analýzou amplitudové odezvy je možné kromě detekce průjezdu detekovat také jednotlivé nápravy (Obr. 4.14b).



Obrázek 4.14: Frekvenční odezva (a) a amplitudová odezva (b) Mach-Zehnderova interferometru na průjezd osmi nápravové tramvaje.

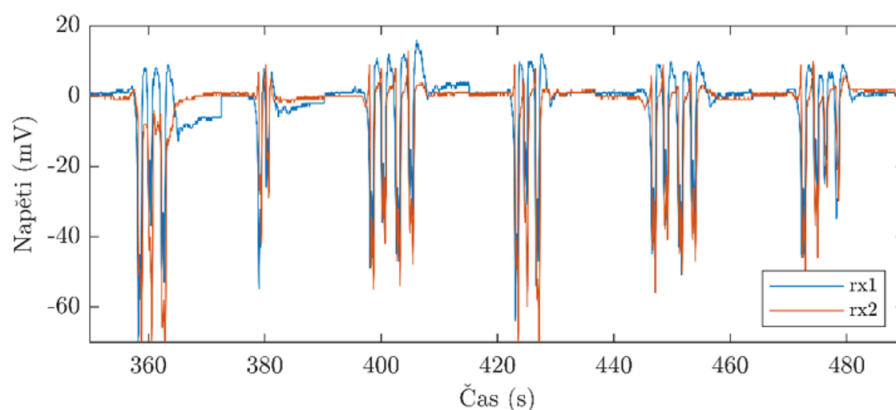
4.3.2 Intenzitní přístup detekce kolejových vozidel

V rámci řešení projektu TAČR DOPRAVA +2020 s názvem Unikátní vláknově optický senzor pro detekci kolejových vozidel (CK01000098) probíhal výzkum intenzitního snímače. Intenzitní snímač funguje na principu mikro a makro ohybů, které porušují podmínku totálního odrazu, což vede k vyvazování světla z optického vlákna. Optické vlákno je umístěno mezi dvěma deformačními deskami s deformačními elementy (Obr. 4.15a). Při vertikálním stlačování ohyby optického vlákna modulují procházející optický signál, který je poté detekován fotodetektorem. Deformační struktura se umísťuje do pryžového pouzdra a výsledný intenzitní kompozitní senzor je instalován mezi podkladnicí a kolejnicí. [A24]



Obrázek 4.15: Princip ohybového deformačního členu (a); instalace snímače mezi podkladnicí a kolejnicí (b).

Typický amplitudový průběh z intenzitního snímače je zobrazen na Obr. 4.16, ve kterém je zaznamenáno 6 průjezdů tramvají, a to dvojicí snímačů označených *rx1* a *rx2* umístěných ve stejné úrovni na obou kolejích. Dlouhodobé testování v Dopravním podniku Ostrava ukázalo, že snímač má 100% úspěšnost v detekci průjezdu tramvaje. Díky vysoké citlivosti jsou snímače kromě detekce průjezdu schopny také detekovat a počítat jednotlivé nápravy vozidel.



Obrázek 4.16: Amplitudová odezva intenzitního pod-kolejnicového snímače na průjezdy tramvají.

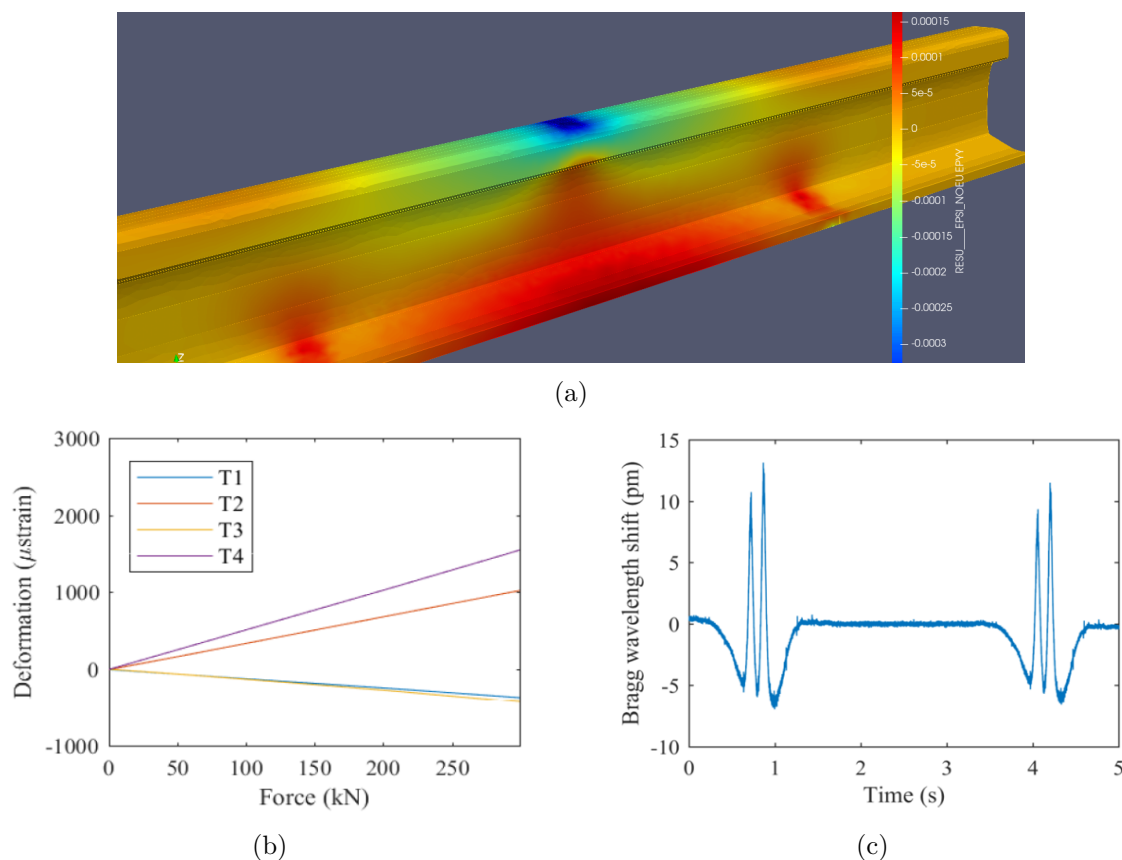
Intenzitní pod-kolejnicový snímač je chráněn patentovou přihláškou [A24] a licencován prostřednictvím výhradní licence firmě Hroší stavby s.r.o., která provádí zkušební testy a optimalizaci snímače pro plánované nasazení do reálného provozu.

4.3.3 Mřížkový přístup detekce kolejových vozidel

Výše byly popsány alternativní přístupy monitorování kolejových vozidel. Stěžejní pro tuto habilitační práci je technologie využívající optovláknové Braggovské mřížky. Braggovské mřížky je možné instalovat na stojinu, horní nebo spodní část paty kolejnice. Před úvodními experimenty byla provedena simulace zatížení kolejnice pro zjištění jejího deformačních chování. Výsledky provedené simulace ukazují, že největší deformace se projevuje podélně na patě kolejnice (Obr. 4.17a). Ověření předpokladu bylo provedeno implementací optických vláken s FBG na kolejnici pomocí lepidla, protože tenká vrstva lepidla a absence dalších vrstev zapouzdřovacích materiálů zajišťuje maximální přenos deformace z měřeného objektu na samotné optické vlákno [A25],[A26]. Umístění jednotlivých Braggovských mřížek na kolejnici jsou následující: T1 - vertikálně na stojinu kolejnice, T2 - podélně na horní část paty kolejnice, T3 - příčně na spodní část paty kolejnice, a T4 - podélně na spodní část kolejnice.

Zatěžování kolejnice v hydraulickém lisu s rozsahem sil od 0 do 300 kN potvrzuje optimální umístění FBG senzorů na spodní straně paty kolejnice (Obr. 4.17b). Vzhledem k obtížnému přístupu ke spodní části paty kolejnice v reálných provozních podmínkách, byla pro účely testování instalována FBG na horní straně paty kolejnice rovněž v podélném směru. Typický průběh z reálného přejezdu tramvajového vozidla je zobrazen na Obr. 4.17c, na kterém jsou jasně rozlišitelné jednotlivé nápravy vozidla.

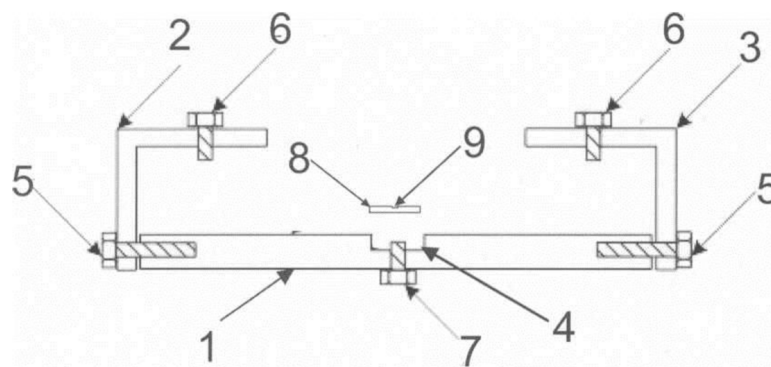
Na základě třináctidenního měření v reálném provozu bylo realizováno celkem 1741 průjezdů a všechny průjezdy byly úspěšně detekovány. Výsledky tedy ukazují, že Braggovské mřížky instalované na stojinu kolejnice jsou vhodné pro monitorování kolejových vozidel jak v tramvajové,



Obrázek 4.17: Umístění FBG na stojinu a patu kolejnice (a) a pod patu kolejnice (b); průběh deformace FBG při zatěžování v hydraulickém lisu (c); odezva Braggovské mřížky na průjezd tramvajového vozidla v reálných podmínkách (d).

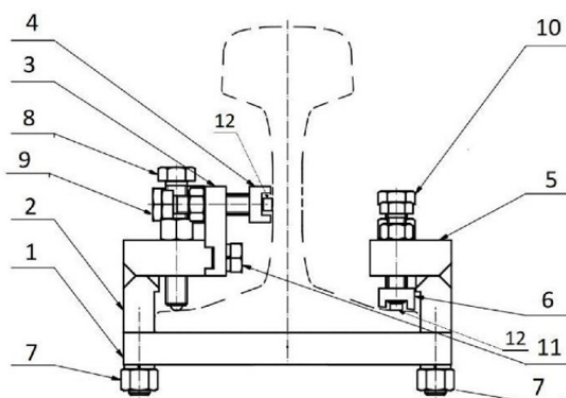
tak i v železniční dopravě. Nevýhodou ale je způsob instalace a omezená odolnost vůči povětrnostním podmínkám a mechanickým vlivům. [A27]

Uvedené nevýhody jsou eliminovány speciálně navrženým pouzdrem [A28] optovláknových FBG snímačů, který se instaluje na kolejnici pomocí šroubů (Obr. 4.18). Toto pouzdro je navrženo s drážkou ve spodní části, do které se umísťuje vyměnitelná lišta s vláknově optickou Braggovskou mřížkou. Toto umístění koreluje s laboratorním zatěžováním a místem s největší deformací vlivem vertikálního zatížení. Konstrukce pouzdra chrání vláknově optické FBG senzory před nechtěným vnějším zásahem a vnějšími vlivy, zároveň zajišťuje kontaktní styk FBG senzoru bez snížení jeho citlivosti a bez potřeby lepení na kolejnici.

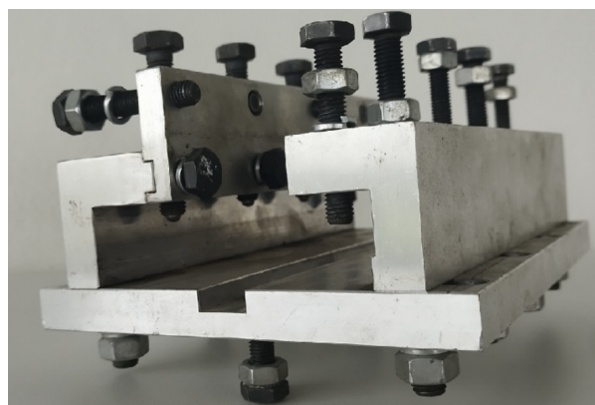


Obrázek 4.18: Konstrukce pouzdra pro instalaci FBG senzorů na spodní část paty kolejnice.

Uvedené pouzdro umožňuje jednoduchý způsob instalace FBG senzorů pro monitorování kolejových vozidel na základě měření deformací spodní části paty kolejnice. Nevýhodou této konstrukce je, že ji nelze jednoduše překonfigurovat na rozměry jiných typů kolejnic. Tento nedostatek je vyřešen pouzdem použitelným v železniční i tramvajové dopravě pro celou řadu kolejnic, které spadají pod označení širokopatní (např., UIC60, R65, S49 apod.) nebo žlábkové (např. NT, NT1, NT3 apod.) a to pomocí nastavitelné šíře základny od 120 do 150 mm (Obr. 4.19a a Obr. 4.19b). Dále je konstrukce upravena tak, aby bylo možné FBG senzory instalovat také na horní část paty kolejnice a na stojinu kolejnice. Další vylepšení spočívá v možnosti nastavení přitlačné síly FBG senzoru na kolejnici pomocí šroubů. Na uvedené řešení pouzdra je udělen národní patent [A29] a v rámci spolupráce s Dopravním podnikem Ostrava a.s. byla dopravnímu podniku prodána licence k užívání tohoto vynálezu v hodnotě 423 500,- Kč s DPH.



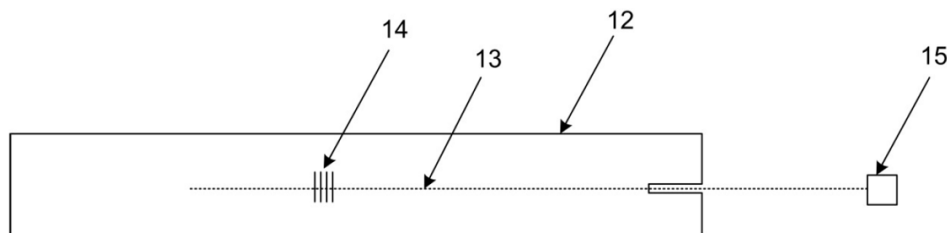
(a)



(b)

Obrázek 4.19: Konstrukce (a) a fotografie (b) pouzdra pro instalaci FBG senzorů na kolejnici s možností přizpůsobení na různé šíře paty kolejnic a možnosti nastavení přitlačné síly FBG senzorů na kolejnici.

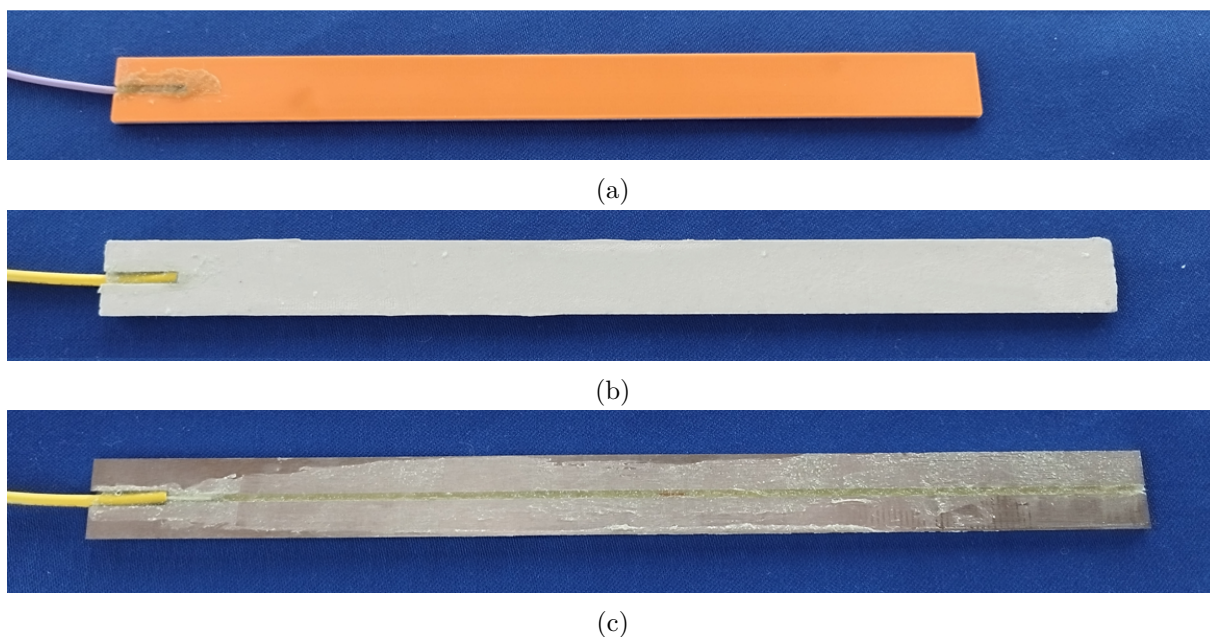
Do pouzdra se vkládají FBG senzory o rozměrech $250 \times 20 \times 3$ mm, jejichž nákres je na Obr. 4.20. FBG senzor je navržen tak, že optické vlákno se nachází ve střední části tloušťky, aby byl schopen monitorovat deformace nezávisle na orientaci uložení v pouzdru.



Obrázek 4.20: Nákres FBG senzorů vkládajících se do pouzdra.

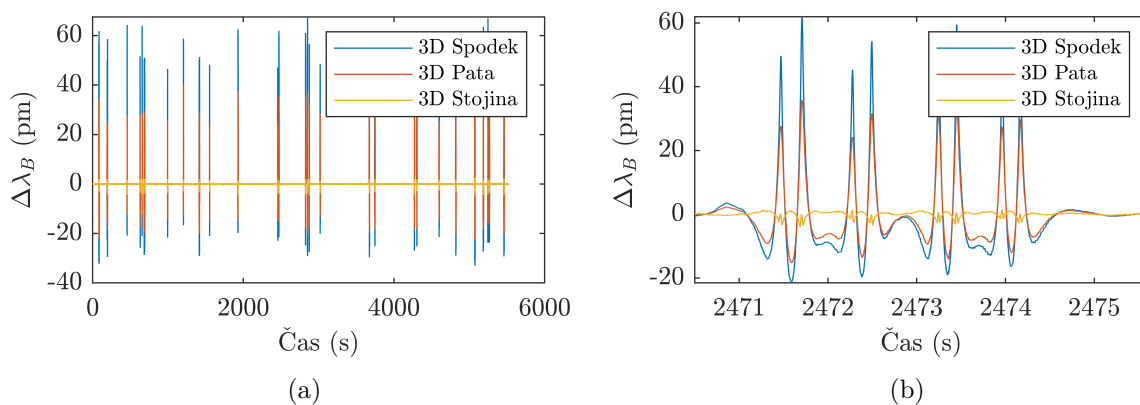
Materiál a konstrukce FBG senzoru je libovolná, doposud byly testovány následující způsoby zapouzdření optického vlákna:

- Technologie 3D tisku: zatisknutí optického vlákna s Braggovskou mřížkou pomocí filamentu PLA (Obr. 4.21a), případně s pomocí odolnějšího filamentu PC-ABS s následnou aplikací pryskyřicového filmu (Obr. 4.21b). Kromě zmíněných filamentů je možné využít zapouzdření pomocí filamentů PET-G, ABS, ASA a jiných. Způsob realizace senzorů zatisknutých pomocí technologie 3D tisku: [A30],[A31].
- Zapouzdření do kovového nebo hliníkového plíšku s vyfrézovanou drážkou pro uložení optického vlákna (Obr. 4.21c).
- Zapouzdření pomocí sklolaminátu tvořeného z vysoce pevných skelných vláken kombinovaných s epoxidovou pryskyřicí poskytuje vynikající mechanickou pevnost, odolnost proti korozivnímu prostředí a vysokou chemickou stálost. Způsob realizace senzorů zapouzdřených do sklolaminátu:[A32],[A33].



Obrázek 4.21: FBG senzor zapouzdřený pomocí technologie 3D tisku s filamentem PLA (a) případně PC-ABS (b) nebo zapouzdřený do hliníkového plíšku s vyfrézovanou drážkou (c).

Záznam měření z reálného provozu s 3D-FBG senzory (FBG senzor zapouzdřený technologií 3D tisku) umístěnými na spodku paty, na patě a stojině kolejnice je zobrazen na Obr. 4.22a. Podrobnější pohled na průjezd čtyřnápravového vozidla je zobrazen na Obr. 4.22b.



Obrázek 4.22: Záznam z průjezdů kolejových vozidel získaný 3D-FBG senzorem (a); detail na průjezd čtyřnápravového vozidla (b).

Spektrální odezvy senzorů 3D-FBG a AL-FBG (FBG senzor zapouzdřený do hliníkové lišty) jsou shrnuty v tabulce 3. Získaná data pocházejí z průjezdů 837 kolejových vozidel. Porovnání ukázalo, že 3D-FBG senzor umístěný na patě kolejnice vykazuje v průměru o 31% větší odezvu

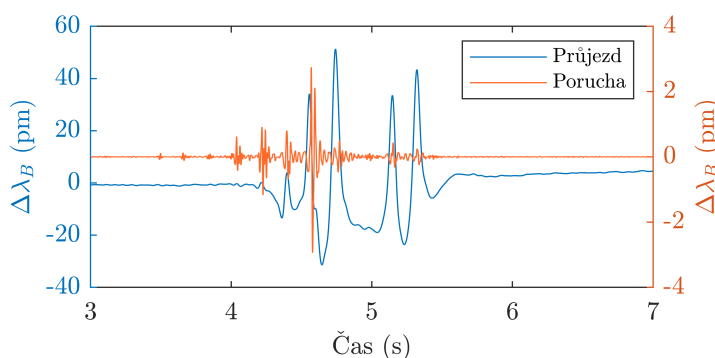
než AL-FBG senzor. Co se týče detekce, oba senzory (3D-FBG i AL-FBG) umístěné na patě kolejnice dosáhly 100% úspěšnosti nejen v detekci jednotlivých vozidel, ale také jejich náprav.

Tabulka 3: Průměrná odezva 3D-FBG senzoru a AL-FBG senzoru v pikometrech.

	Spodek paty (pm)	Pata (pm)	Stojina (pm)
3D-FBG	63	44	4
AL-FBG	48	31	3

V navazujícím výzkumu v rámci řešení dílčího projektu na VŠB-TU Ostrava bylo vyvinuto softwarové řešení specializované na detekci plochých kol a kvantifikování míry poškození. Tento pokrok umožňuje přesnější diagnostiku stavu kolejových vozidel v reálném provozu. Záznam průjezdu kolejového vozidla s poškozeným kolem je uveden na Obr. 4.23. Modrá křivka představuje naměřený signál a oranžová poté signál, který odpovídá vibračním rázům kolejnice způsobených ploškou na kole.

Navržené signálové zpracování je nad rámec této habilitační práce, nicméně umožňuje nejen detekovat poškození, ale určit míru tohoto poškození a přesně identifikovat, o které kolo kolejového vozidla se jedná. Uvedená technologie poskytuje ve srovnání s konvenčními přístupy efektivní detekční metodu, která může přispět k preventivní údržbě a bezpečnosti v železniční dopravě.



Obrázek 4.23: Záznam z průjezdu kolejového vozidla s ploškou na kole způsobující sekundární vibrace kolejnice.

Výsledky dlouhodobého provedeného výzkumu, které jsou prezentovány v této habilitační práci, jasně ukazují, že optovláknové senzorické technologie mají vysoký potenciál pro nasazení v reálném provozu. Tyto technologie prokazují značnou efektivitu v detekci průjezdů kolejových vozidel a přesném počítání jejich náprav. Optovláknové senzory jsou schopny poskytovat vysokou míru přesnosti a spolehlivosti, což je klíčové pro provádění bezpečnostních opatření v železniční dopravě.

5 Shrnutí a přínosy práce

Habilitační práce se věnuje důkladnému zkoumání a vývoji optovláknových senzorických technologií, se zvláštním důrazem na jejich aplikaci v železniční dopravě. Edukační část práce poskytuje přehled zabezpečovacích systémů v železniční dopravě, zdůrazňuje potřebu inovací v této oblasti a ukazuje potenciál nových optovláknových technologií pro zvýšení bezpečnosti a efektivity dopravy.

Odborná část se zaměřuje na výzkum multiplexních a vyhodnocovacích technik, které umožňují efektivní monitorování železniční infrastruktury na desítkách až stovkách míst současně, a to prostřednictvím jediného optického vlákna bez potřeby elektrického napájení v místech měření. Zvláštní pozornost je věnována praktickému využití optovláknových senzorů pro zvýšení bezpečnosti na železničních přejezdech a traťových úsecích, což ilustruje široký rozsah potenciálních aplikací těchto technologií v železniční dopravě. Výzkum má značný praktický význam pro zvýšení bezpečnosti a efektivity železničního provozu, což dokazují i dva licencované patenty, které podtrhují komerční potenciál těchto inovací.

Tato práce představuje významný milník v oblasti optovláknových senzorických technologií, zejména s ohledem na jejich praktické využití pro zvýšení bezpečnosti železniční dopravy. Skrze důkladnou analýzu stávajících systémů a potřeb práce identifikuje klíčové oblasti, kde inovace a vývoj nových technologií mohou mít zásadní dopad. Přínos práce pro vědeckou komunitu je neméně důležitý; poskytuje hluboký teoretický základ a rozšiřuje současné poznatky o optovláknových senzorech.

Tato práce nejen významně přispívá k teoretickým základům optovláknových senzorů a jejich aplikacím, ale také demonstruje jejich praktické využití ve prospěch společnosti. Její dopady jsou důležité jak pro akademický svět, tak pro praxi, a otevírají nové cesty pro budoucí výzkum a komerční využití.

Budoucí rozvoj optovláknových senzorických technologií nabízí řadu možností pro zvýšení bezpečnosti a efektivity železniční dopravy. Na základě této habilitační práce lze identifikovat několik klíčových směrů, které mohou přinést další inovace. Patří sem vývoj pokročilých algoritmů pro analýzu dat pomocí strojového učení a umělé inteligence, což umožní rychlejší a přesnější detekci anomálií v reálném čase. Další výzkum by se mohl zaměřit také na rozšíření aplikací senzorů, například na monitorování stavebních struktur mostů a tunelů s železničními tratěmi. Rovněž by se měl klást důraz na miniaturizaci senzorů a zvýšení jejich odolnosti vůči extrémním podmínkám, což by umožnilo jejich širší využití v náročných prostředích a zlepšení celkové bezpečnosti a životnosti železniční infrastruktury.

6 Hlavní zařazené výsledky

Ve vědecké části habilitační práce jsou zařazeny dvě publikace publikované v prestižních časopisech. Publikace "Design of fiber bragg grating sensor networks" v časopise "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement" a publikace "PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas" v časopise "IEEE Access".

Dále jsou do výběru zahrnuty dva licencované patenty "Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě" a "Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání". Hlavním důvodem jejich výběru je fakt, že oba patenty byly úspěšně licencovány, což nejen potvrzuje jejich excelenci, ale také demonstrovuje jejich vysoký komerční potenciál a připravenost pro implementaci v reálných provozních podmínkách.

Posledním zařazeným výsledkem je publikace s názvem "Portable optical fiber Bragg grating sensor for monitoring traffic density", která byla vybrána s ohledem na své praktické využití reálných aplikací. Tato publikace ilustruje, jak výzkumné aktivity autora přesahují teoretické hranice a mají konkrétní využití v praxi.

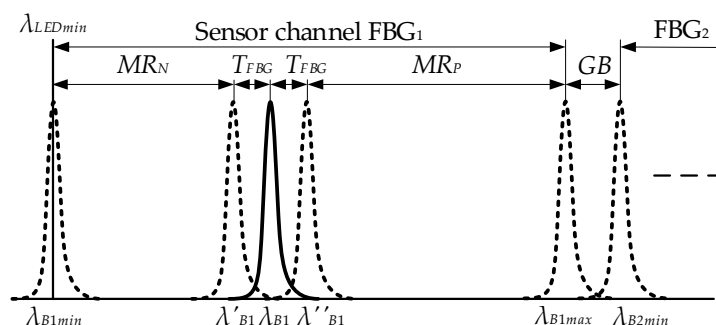
Tato kombinace patentů a publikací poukazuje nejen na vědeckou důležitost výzkumu autora, ale také na praktickou aplikovatelnost.

1. Fajkus, M., Kovar, P., Skapa, J., Nedoma, J., Martinek, R., Vasinek, V. (2022) Design of fiber Bragg grating sensor networks. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, doi:10.1109/TIM.2021.3127642, **IF=5,6**
2. Fajkus, M., Fridrich, M., Nedoma, J., Kahankova, R., Martinek, R., Bednar, E., Kolarik, J. (2020) PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas. IEEE Access, 8, 127648-127658. doi:10.1109/ACCESS.2020.3006985, **IF=3,7**
3. Fajkus, M., Nedoma, J., Partila, P., Továrek, J., Martinek, R. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě. 309233, Patent. Uděleno 27.4.2022. **Licencovaný patent 423 500,- Kč s DPH**
4. Jargus, J., Jaroš, J., Fajkus, M., Nedoma, J., Vašinek, V., Krenželok, T., Soural, T. Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání. 309746, Patent. Uděleno 28.7.2023. **Licencovaný patent 1 210 000,- Kč s DPH**
5. Fridrich, M., Fajkus, M., Mec, P., Nedoma, J., Kostelansky, M., Bednar, E. (2019) Portable optical fiber Bragg grating sensor for monitoring traffic density, Applied Sciences 9 (22), doi: 10.3390/app9224796, **IF=2,7**

6.1 Design of fiber Bragg grating sensor networks

Nejvýznamnější výsledky

Předložená studie popisuje návrh senzorické sítě optovláknových senzorů založených na Braggových mřížkách, který umožňuje efektivní multiplexaci a rozlišení jednotlivých senzorů v rozsáhlých aplikacích. Výsledky ukazují, že tento přístup umožňuje stabilní a přesné měření v různých podmínkách, což je klíčové pro realizaci monitorování provozu v železniční dopravě.



Obrázek 6.1: Grafický abstrakt publikace Design of fiber bragg grating sensor networks.

Hlavní přínosy a závěry

Hlavním přínosem této práce je inovativní návrh sítě FBG senzorů, který umožňuje monitorovat sledované parametry na desítkách míst současně, což přispívá ke zvýšení bezpečnosti a efektivity monitorovacích systémů. Závěry práce potvrzují potenciál tohoto přístupu pro široké spektrum aplikací včetně návrhu senzorických sítí v železniční dopravě.

Další směřování výzkumu

Navazující výzkum by se měl zaměřit na další optimalizaci návrhu sítě FBG senzorů, zejména pro další navýšení kapacity multiplexu s využitím pokročilých algoritmů umožňující např. překrývání sousedních spekter apod. [35] Důležitým krokem bude také implementace a testování navržených systémů v reálných provozních podmínkách, což umožní vyhodnotit jejich dlouhodobou spolehlivost a efektivitu.

Design of Fiber Bragg Grating Sensor Networks

Marcel Fajkus^{ID}, Petr Kovar^{ID}, Jan Skapa^{ID}, Jan Nedoma^{ID}, *Senior Member, IEEE*,
Radek Martinek^{ID}, *Member, IEEE*, and Vladimir Vasinek^{ID}

Abstract—This study explores the effective use of a spectral area defined by a radiation source for multipoint measurements with fiber Bragg grating (FBG) sensors. The capacity of the sensor network based on a wavelength multiplex is limited by the spectral work area of the used radiation source and by several other parameters, such as the spectral parameters of individual sensors, type of the measured quantity and measurement range, sensitivity coefficients, production tolerances, and protection zones among the measuring channels. This is why it is necessary to use this limited area in an “economical” manner. The initial part of this article explores modeling of sensor networks using Bragg gratings, an output of which is an analysis of the impact of individual parameters on the capacity of a sensor network. These models are then applied to the mathematical definition of the given network proposal formed by real sensors. At the end, the stated principles are verified by real measurements with a sensor network formed by five Bragg sensors. The study points to the necessity of paying close attention to the proposals of sensor networks with FBG for the purpose of the effective use of the given spectral work area, increasing capacity, and reducing the possibility of crosstalk when assessing the Bragg sensors.

Index Terms—Bragg grating, sensor networks, wavelength multiplex.

I. INTRODUCTION

FIBER-OPTIC sensors are based on the modulation of a parameter, such as the power, the wavelength, the phase, or the polarization of the light propagating in the optical fiber. The modulation signal can be a mechanical strain, pressure, temperature, or another effect of the measured quantity. A significant group of fiber-optic sensors is the group of Bragg gratings that can form network structures.

Manuscript received September 5, 2021; revised October 20, 2021; accepted October 31, 2021. Date of publication November 18, 2021; date of current version March 1, 2022. This work was supported in part by the European Regional Development Fund in Research Platform focused on Industry 4.0 and Robotics in Ostrava Project through the Operational Programme Research, Development and Education under Grant CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008425; in part by the Ministry of Education of the Czech Republic under Project SP2021/32 and Project SP2021/45; and in part by the European Regional Development Fund in the Research Centre of Advanced Mechatronic Systems Project through the Operational Programme Research, Development and Education under Project CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000867. The Associate Editor coordinating the review process was Dr. Xiangchen Qian. (*Corresponding author: Marcel Fajkus.*)

Marcel Fajkus, Jan Skapa, Jan Nedoma, and Vladimir Vasinek were with the Department of Telecommunications, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VSB—Technical University of Ostrava, 70800 Ostrava, Czech Republic (e-mail: marcel.fajkus@vsb.cz; jan.skapa@vsb.cz; jan.nedoma@vsb.cz; vladimir.vasinek@vsb.cz).

Petr Kovar is with the Department of Applied Mathematics, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VSB—Technical University of Ostrava, 70800 Ostrava, Czech Republic (e-mail: petr.kovar@vsb.cz).

Radek Martinek was with the Department of Cybernetics and Biomedical Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VSB—Technical University of Ostrava, 70800 Ostrava, Czech Republic (e-mail: radek.martinek@vsb.cz).

Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2021.3127642

Bragg gratings offer high flexibility, which is given by the possibility of using the sensor in both reflection and transport modes. A big advantage of Bragg gratings is the possibility of serial connection of several of fiber Bragg grating (FBG), which significantly reduces the requirements for incoming cabling [1], [2]

The connection of several Bragg sensors creates a sensor branch in the case of series arrangement or a sensor network in the case of more complex structures. The condition is that all sensors in a sensor branch or a sensor network can be evaluated at the same time. The sensor branch or the sensor network together with an evaluation unit constitute a multiple-point sensor system. In some applications, it is a requirement to simultaneously sense as many FBG sensors as possible with one evaluation unit. This number of FBG sensors on use of wavelength-division multiplexing (WDM) method depends on multiple parameters. Taking them into account will make it possible to efficiently utilize the spectrum of light sources and integrate as many FBG sensors as possible into the sensor network. Designing sensor networks is currently based on empirical experience, neglects many input parameters, and reduces the capacity of the WDM method. In Section II, a mathematical apparatus will be proposed to model the sensory branches with minimal consumption of limited spectral space.

II. FIBER BRAGG GRATINGS

A Bragg grating is a fiber-optic device that is used for many applications, such as tunable optical filters [3], WDM multiplexers and switches [4], chromatic dispersion compensators [5], or sensors. A Bragg grating is formed in the optical fiber core by a periodic change of the refractive index. This periodic structure results from the exposure of a photosensitive optical fiber to UV radiation, which causes permanent changes of the refractive index [6]. Fig. 1 shows the structure of a uniform Bragg grating in which there are periodically changing layers of the refractive index of core n_1 with a higher refractive index n_3 , which is induced by UV radiation. The induced refractive index is expressed by $\delta n = n_3 - n_1$ and is dependent on the intensity of UV laser beam and time of exposure of the germanium-doped photosensitive optical fiber [7]. On the structure of the Bragg grating, when the broadband spectrum light passes through, there is a selective reflection in which a narrow part of the spectrum is reflected and other wavelengths are transmitted.

The reflected part of the spectrum is called the Bragg wavelength λ_B and is expressed by the following formula:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

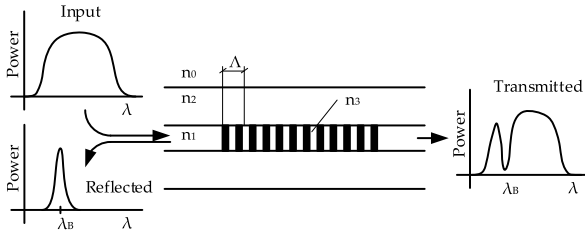


Fig. 1. Principle of Bragg grating operation.

where n_{eff} is the effective refractive index defined by the structure of the Bragg grating and Λ is the distance between the periodical changes to the refractive index in the core of the optical fiber [8].

A. Bragg Grating Sensor

In sensor applications, the dependence of optical and geometrical features of a grating structure on temperature and strain is used, which is reflected in the change in the Bragg wavelength $\Delta\lambda_B$. The relation between the Bragg wavelength change, the relative deformation, and temperature change is expressed by the following equation:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T. \quad (2)$$

The first part of (2) presents the influence of the deformation on the Bragg wavelength change, where ε is the relative deformation and k is the deformation coefficient. This coefficient can be described by $k = 1 - p_e$, where p_e is the photoelastic coefficient with value 0.21 for standard single-mode (SM) telecom fibers (SMF-28). The second part of the relation (2) describes the effect of temperature on the Bragg grating, where α_Λ is the coefficient of thermal expansion and α_n is the thermo-optic coefficient.

The relation (2) suggests that temperature and deformation sensitivity changes with the absolute value of the Bragg wavelength. With regard to the values of the coefficients stated in the above relations, the standardized deformation coefficient at a constant temperature is expressed by the following equation:

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 0.78 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{strain}^{-1} \quad (3)$$

and a standardized temperature coefficient at a constant deformation is expressed by the following equation:

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 6.678 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (4)$$

where $\Delta\varepsilon$ is the deformation change and ΔT is the temperature change. The FGB inscribed in standard SM telecom fibers (SMF-28) has a deformation sensitivity of 1.2 pm/ μstrain and a temperature sensitivity of 10.3 pm/ $^\circ\text{C}$ at the wavelength of 1550 nm.

In sensor applications, the method of the encapsulation of the Bragg grating plays an important role in reaching a suitable sensitivity to the measured quantity. Various types of encapsulations allow the application of Bragg sensors in various areas to measure almost any physical quantity. Bragg sensors

TABLE I
COMPARISON OF THE FEATURES OF BRAGG GRATING METHODS

Method	Bragg wavelength	Spectrum width
Phase mask [18]	- fluctuation of the ambient temperature - tension of the optical fiber	- configuration of beam intensity
Point by point [19]	- fluctuation of the ambient temperature - tension of the optical fiber	- pulse energy setting

are commonly used in rail transport [9]–[11] or automobile transportation [12]. FBG sensors are very often analyzed with regard to their use in biomedical applications [13], in which one measuring probe can monitor the temperature, breathing, and cardiac activity at the same time [14]–[16]. Grating sensors are also used for the monitoring of line constructions, such as bridges or tunnels [17].

Most applications require a higher number of grating sensors, whether to increase the measurement accuracy, to carry out the measurement itself, or to get a large number of measuring points, as is the case for line constructions and monitoring more patients at the same time. For this reason, Bragg gratings are very popular because of the possibility of connecting FBG sensors in cascades.

B. Most Common FBG Production Methods

Most common FBG production methods include exposure of optical fiber to UV radiation through a phase mask and process point-by-point. Table I compares the methods of Bragg grating fabrication and describes some factors that influence the accuracy of the Bragg grating parameters. These tolerances negatively affect the accuracy of the sensor branch design and therefore need to be considered.

C. WDM Method

The most common method for multiple-point measurement is WDM, which is based on the fact that individual Bragg sensors are made with different Bragg wavelengths. An optical signal reflected from the series of FBG sensors is created by a sum of partial reflection spectra that do not overlap. The capacity of the WDM method is generally given by the sum of the arranged measuring channels of FBG sensors, which falls within the spectral width of the radiation source. Works [20] and [21] partly focus on the capacity of the WDM method with FBG sensors, which points out the effective use of the working spectral range.

In multiple-point measurement, each sensor is assigned with a measuring channel within which the Bragg wavelength can move due to the external influence of the measured quantity. The conventional method of peak detection of the reflection spectra works properly if the reflection spectra do not overlap with the adjacent measuring channels. The overlapping of adjacent spectra is undesirable in this approach, it is called crosstalk, and it leads to errors in evaluation.

D. Methods for Increasing the Capacity of a WDM Device

In the past ten years, we have proposed new approaches that eliminate the crosstalk between channels. These are methods that use genetic [22], autocorrelation, or differential evolution algorithms [23], and algorithms using machine learning [24] or a specially designed method of optical orthogonal coding [25]. These optimization algorithms allow crosstalk between channels during the evaluation of reflection spectra. On the other hand, the requirements on software and sometimes also on hardware configuration of the whole measuring system are increasing in some cases. Therefore, these algorithms are only used in special cases. These cases include the necessity to perform measurements with several sensors that standard evaluation systems cannot handle.

III. SENSOR BRANCH

Bragg gratings can be connected with the use of WDM method in cascades. The connection of several Bragg gratings or sensors to sense the measured quantities is called a sensor branch for series topology or a sensor network for parallel and hybrid topologies. The next part uses the term “sensor branch,” but everything stated in it can also be applied to a sensor network.

In this article, two types of sensor branches are distinguished: model sensor branches and real sensor branches. A model sensor branch considers the arrangement of bare Bragg gratings without encapsulation, which are characterized by temperature and deformation sensitivity dependent on the Bragg wavelength. A real sensor branch consists of real FBG sensors and each sensor can then have its own set of input parameters.

A. Input and Output Parameters for Sensor Branch Designing

The designing of a real or model sensor branch consists of a procedure of determining Bragg wavelengths of FBG sensors in a sensor branch. In the process of designing, it is necessary to consider a wide range of input parameters, which can be divided into three groups.

The first group of parameters defines the working spectral range, which is given by the central wavelength of the radiation source λ_{LED} and the spectral width of the radiated light $\Delta\lambda_{LED}$. The spectral width can be chosen with regard to a decrease in power by 3 or 10 dB or it can be set according to the requirements of the user by the left or right edge of the spectrum λ_{LEDmin} and λ_{LEDmax} .

The second group consists of parameters related to the production of Bragg gratings. It is the production tolerance of the Bragg wavelength T_{FBG} , the reflection spectrum width at half maximum $FWHM_{FBG}$, and the tolerance of the reflection spectrum width at half maximum T_{FWHM} .

The third group consists of parameters defining the requirements for the measurement and the features of sensors. For each sensor, it is necessary to define the type of the measured quantity and also the sensitivity coefficient according to the type of the measured quantity. It is parametric for a model sensor branch k_N and constant k or parametric k_N for a

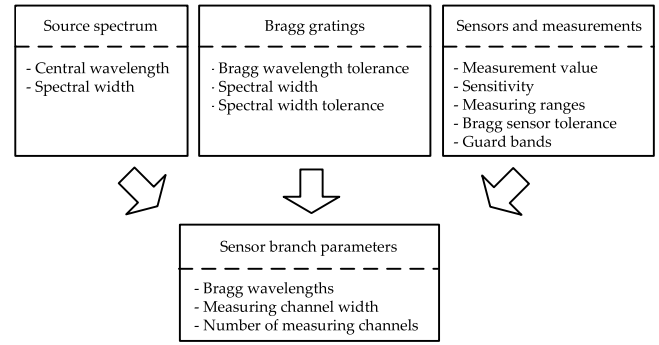


Fig. 2. Relation between input and output parameters of sensor branch design.

real sensor branch. A measuring range MR is also defined. It is a positive measuring range for the measurement of unipolar quantities MR_P , and a negative measuring range is also defined for the measurement of bipolar quantities MR_N . Real sensor branches are also defined as a parameter of the production tolerance T_S of Bragg wavelength in the phase of FBG sensor production. This tolerance can be asymmetrical, which is why both the negative T_{SN} and positive T_{SP} part of the tolerance is stated. Another parameter is the coefficient k_{GB} for the determination of the minimum guard band GB_{min} , which ensures possible to distinguish adjacent spectra and the resistance to crosstalk in limit cases. A limit case is characterized by an overlap of adjacent spectra, i.e., when the n th sensor is maximally positively loaded and the $(n + 1)$ th sensor is maximally negatively loaded by measured quantity. An additional size of the guard band can then be used to increase the measurement safety GB_{ext} . The total size of a guard band GB is given by the sum of GB_{min} and GB_{ext} .

The mentioned parameters are the input parameters that are entered in the designing process of a sensor branch. The outputs of the design are output parameters that define Bragg wavelengths of individual Bragg gratings, the widths of individual channels, and the sensitivity coefficients of individual Bragg gratings (Fig. 2).

B. Minimal Guard Band

The minimal size of a guard band is defined by a distance between two adjacent reflection spectra, which ensures the correct evaluation of both peaks by the interrogation unit. For a proper evaluation of two adjacent peaks, 3-dB Rayleigh resolution criterion that defines the minimum decrease of the power between the adjacent spectra by 50% is used. The correct activity of adjacent spectra is conditioned by the sufficient spectral resolution of the interrogation unit in relation to the width of the reflection spectra of the measuring FBG sensors. The most commonly used FBG interrogation units based on the charge-coupled device (CCD) linear field usually achieve a spectral resolution of 1 pm. Considering the standard widths of the reflection spectrum of the measuring FBG sensor of around 200 pm, this impact of the spatial resolution is negligible, which is why it is not discussed in this article.

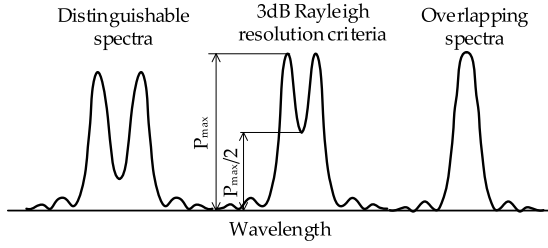


Fig. 3. Determination of the minimum size of a guard band using a 3-dB resolution criterion.

Fig. 3 (left) shows two adjacent spectra that are clearly distinguished, the limit state for 3-dB resolution criterion in Fig. 3 is in the center, and the noncompliance of the resolution criterion when both peaks merge, which leads to an error (i.e., crosstalk), is shown in Fig. 4 (right).

The 3-dB Rayleigh criterion has been selected as a compromise between the effective use of the work spectrum and the high-resolution ability of adjacent spectra. The resolution ability of the spectra depends not only on the resolution criterion but also on the spectra resolution of the given CCD field and the interpolation method used for reconstructing the reflection spectrum [26].

The size of the minimum guard band depends on the selection of the resolution criterion and on the shape of the reflection spectrum. The reflection spectrum of Bragg gratings can be approximated by the Gaussian function according to the following equation:

$$y(x) = ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

where a is the parameter that defines the amplitude of the function, e is Euler's number, μ is the central value, and σ is the width of the hill at the height of $ae^{-1/8} \approx 0.8825a$.

The size of the minimum guard band $GB_{\min}$ between the Gaussian spectra is given by the coefficient k_{GB} pursuant to the linear relation $GB_{\min} = k_{GB}FWHM_G$, where $FWHM_G$ is the width of the Gaussian reflection FBG spectrum in the middle of the amplitude. Fig. 4 presents an analysis of coefficient k_{GB} for various ratios R_2/R_1 and $FWHM_2/FWHM_1$. It is clear from the analysis that when the widths of the Gaussian spectra are identical, then the value is $k_{GB} = 1.41$.

In reality, the spectrum of real Bragg gratings does not exactly correspond to the Gaussian shape, and it is only close to it. This is why 100 Bragg gratings with reflection parameters from 15% to 99% and with a width of the spectrum FWHM from 70 to 1172 pm have been proposed using the theory of bound aspects and the method of transfer matrixes. For the subsequent analysis of the coefficient k_{GB} , utilizing the 3-dB Rayleigh resolution criterion, we applied the commonly used Bragg grating FBG₁ for sensor applications with reflection parameters of 81% and the width of the reflection spectrum of 202 pm. Fig. 5 shows the relation between the coefficient k_{GB} and the reflection ratios R_2/R_1 and spectrum widths $FWHM_2/FWHM_1$. For identical, spectrally adjacent FBG ($FWHM_1 = FWHM_2$ and $R_1 = R_2$), the value of coefficient k_{GB} amounts to 1.25. For double the width of the FBG₂ grating

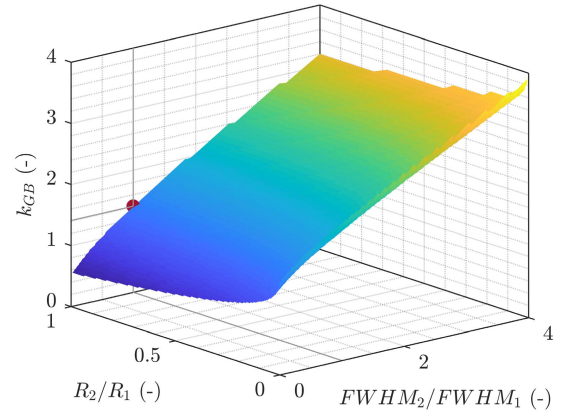


Fig. 4. Value of the k_{GB} coefficient for various reflection ratios R_2/R_1 and widths $FWHM_2/FWHM_1$ of two adjacent Gaussian spectra.

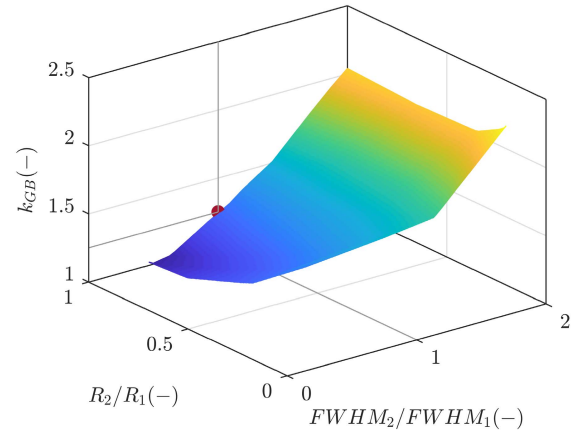


Fig. 5. Value of the k_{GB} coefficient for various reflection ratios R_2/R_1 and widths $FWHM_2/FWHM_1$ of real Bragg gratings.

spectrum and half the reflection value, the value of coefficient k_{GB} amounts to 2.02.

It is clear based on the above that the value of the k_{GB} coefficient, i.e., the size of the minimum guard band, depends on the ratio of the reflections and ratio of the widths of the reflection spectra of the adjacent FBG sensors. This is why it is suitable to use Bragg gratings, making sure that: 1) the reflections are as high as possible (within the range of 70%–95%), 2) the spectrum widths are small (within the range of 100–300 pm), and 3) these parameters are as identical as possible for each pair of adjacent spectra. Determination of the k_{GB} coefficient represents a complicated task, which can be solved based on the analysis shown in Figs. 4 or 5. The final size of the minimum guard band between two adjacent measuring channels can then be generally expressed using the following formula:

$$GB_{\min} = k_{GB}(FWHM_{FBG} + T_{FWHM}). \quad (6)$$

The calculation of the size of a guard band is then given by the equation $GB = GB_{\min} + GB_{\text{ext}}$, where GB_{ext} is a sufficient size of a guard band to increase the safety and resistance toward crosstalk during measuring.

TABLE II
SUMMARY OF ALL MODELS AND PARAMETER

Model	MR_P	MR_N	GB_{min}	T_{FBG}
M1	x			
M2	x	x		
M3	x		x	
M4	x	x	x	
M1T	x			x
M2T	x	x		x
M3T	x		x	x
M4T	x	x	x	x

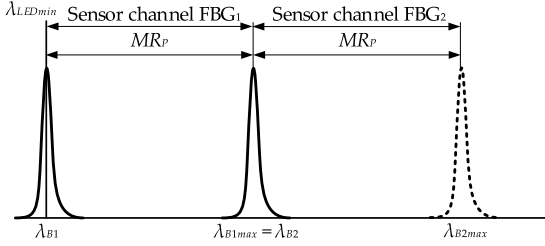


Fig. 6. Imaging of the FBG measuring channels for model M1.

IV. MODEL SENSOR BRANCH

A model sensor branch consists of bare Bragg gratings with parametric sensitivity coefficients. This section presents the behavior of the Bragg wavelength, the sensitivity coefficient, and the widths of the measuring channel in a model sensor branch. The aim is to define the relations for the calculation of parameters of any measuring channel on the basis of known parameters without the need to calculate the previous measuring channels.

A. Modeling of Sensory Branches With Bragg Gratings

This section presents eight mathematical models that are different with regard to the incorporation or the neglecting of the parameter of negative measuring range MR_N , the size of a minimum guard band GB_{min} , and the tolerance of the Bragg wavelength T_{FBG} was processed. A summary of all models and parameters is provided in Table II.

The simplest concept of a model sensor branch on the basis of WDM only considers the positive measuring range. Other parameters, such as negative measuring range, guard band, or tolerance parameter, are neglected. Fig. 6 shows two measuring channels within the model M1. The left edge of the first measuring channel is defined by the Bragg wavelength λ_{B1} and the right edge by wavelength λ_{B1max} , which is the wavelength of the second measuring channel. In a limit case of maximum burden of the first Bragg grating, an overlap of adjacent spectra and a measurement error in the form of crosstalk of adjacent channels occur.

In the first stage of the determination of a mathematical model M1, it is necessary to define the relations for the Bragg wavelength for the n th channel. A general formula for the n th Bragg wavelength of a measuring channel of model M1 can be expressed by

$$\lambda_{Bn} = \lambda_{B1}(1 + k_{Nx}MR_P)^{n-1}. \quad (7)$$

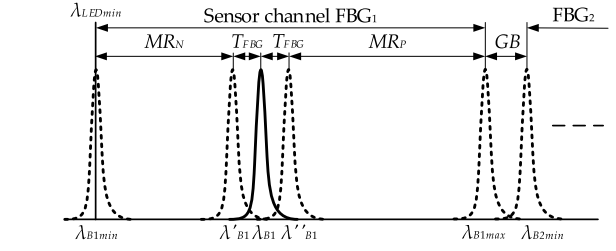


Fig. 7. Spectral depiction of mathematical model M4T.

When we consider the use of the guard band, the formula for λ_{Bn} will be expanded by component (GB), upon which we get the general equation (8) for model M3

$$\lambda_{Bn} = \lambda_{B1}(1 + k_{Nx}MR_P)^{n-1} + GB \sum_{i=1}^{n-2} (1 + k_{Nx}MR_P)^i. \quad (8)$$

For model M2, which utilizes only a positive and negative measuring range, the general equation (9) for the Bragg wavelength applies

$$\lambda_{Bn} = \frac{\lambda_{LEDmin}(1 + k_{Nx}MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx}MR_N)^n}. \quad (9)$$

Should we expand model M2 by a guard band, we get model M3, which expands (9) by the following equation:

$$GB \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx}MR_P)^{i-1}}{(1 - k_{Nx}MR_N)^i}. \quad (10)$$

Should we expand the previous model M3 by a component related to the tolerance of the Bragg wavelength, we get a complex model that considers all input parameters. This complex model M4T will be formed by (10), expanded by a component related to production tolerance T_{FBG} defined as follows:

$$2T_{FBG} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx}MR_P)^i}{(1 - k_{Nx}MR_N)^i} + T_{FBG}. \quad (11)$$

The complex model that considers MR_P , MR_N , GB, and T_{FBG} is shown in Fig. 7.

The general formula for the Bragg wavelength of the n th measuring channel of the complex model M4T (12) is formed by the sum of the following components (9)–(11):

$$\begin{aligned} \lambda_{Bn} = & \frac{\lambda_{LEDmin}(1 + k_{Nx}MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx}MR_N)^n} \\ & + GB \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx}MR_P)^{i-1}}{(1 - k_{Nx}MR_N)^i} \\ & + 2T_{FBG} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx}MR_P)^i}{(1 - k_{Nx}MR_N)^i} + T_{FBG}. \end{aligned} \quad (12)$$

General relations for the sensitivity parameter of the Bragg grating k_n and the spectral width Δch_n of the n th channel can be expressed as

$$k_n = \lambda_{Bn}k_{Nx} \quad (13)$$

$$\Delta ch_n = \lambda_{Bn}k_{Nx}MR \quad (14)$$

where $MR = MR_N + MR_P$.

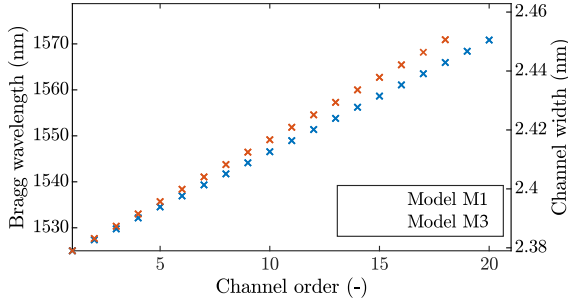


Fig. 8. Influence of the use of a guard band on the Bragg wavelength and on the width of the measuring channel.

B. Impact of the Guard Band

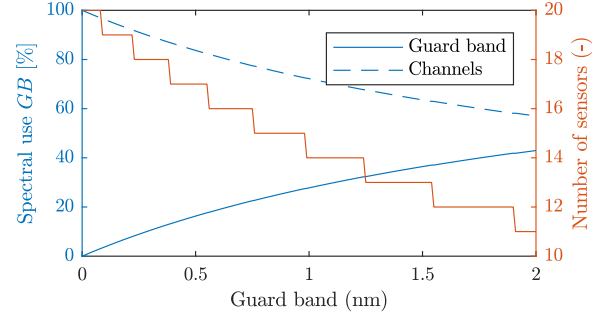
A minimum guard band influences the sensitivity coefficients of individual Bragg gratings because shifting Bragg wavelength toward higher wavelengths due to the implementation of a minimum guard band causes an increase in sensitivity coefficients of individual channels. The increased sensitivity coefficient will lead to higher demands on the measuring channel. Fig. 8 compares models M1 and M3 that use only positive measuring ranges of deformation quantity $MR_P = 1000 \mu\text{strain}$. The following analysis is performed for the spectral width of 50 nm of the source light and width of the reflection spectra of Bragg grating 200 pm, and with regard to $GB_{\min} = k_{GB}FWHM_{FBG}$, the size of a minimum guard band is 0.282 nm.

The results of the comparison show that the last 20th channel of model M1 at the wavelength of 1570.841 nm with a sensitivity coefficient of $1.225 \text{ pm}/\mu\text{strain}$ has the width of the measuring channel 72 pm wider than that of the first measuring channel. A total of 43.395 nm from the spectral width of source light will be used for measuring channels. The rest is an unused spectrum that is not big enough for the next measuring channel. In the case of using a minimum size of a guard band, the number of measuring channels will decrease to 18. A total of 48.360 nm will be used, while 43.464 nm from it will be used for measuring channels and 4.896 nm will be used for minimum guard bands. In the case of enlarging a guard band by 0.5 nm to the value of 0.782 nm due to the increase in resistance of a model sensor branch to external influences (e.g., 0.5 nm corresponds to the temperature change $\approx 48^\circ\text{C}$), the number of measuring channels will decrease to 15; 11.032 nm will be used for guard bands.

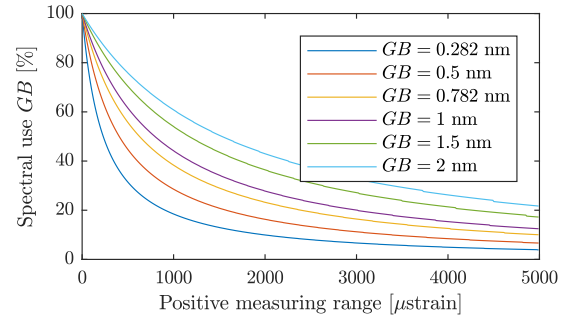
Fig. 9(a) shows the influence of the size of the guard band on the redistribution of the spectrum for measuring channels and guard bands. It is therefore clear that the size of a guard band needs to be decided carefully because it uses a significant portion of a working spectral range at the expense of the needs of measuring channels. The spectral share of guard bands also depends on the size of the measuring range. The smaller this range is, the more significant portion of the spectrum will be used for the guard bands. Fig. 9(b) shows the spectral use for different sizes of measuring ranges and sizes of guard bands.

C. Impact of the Negative Measuring Range

A positive measuring range allows the monitoring of unipolar quantities, and a negative measuring range also allows the



(a)



(b)

Fig. 9. (a) Spectral use of measuring channels and guard bands depending on different sizes of guard bands in model sensor branch 2. (b) Portion of the spectral use of guard bands for different values of measuring ranges and different values of guard bands.

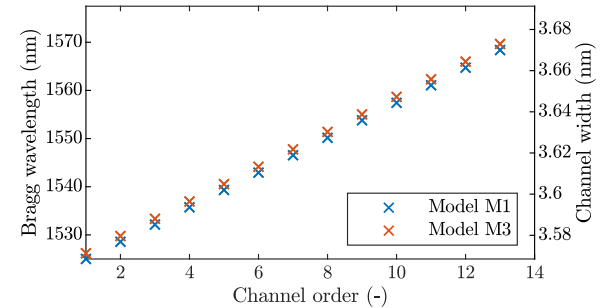


Fig. 10. Influence of the used measuring range on the Bragg wavelength and on the width of the measuring channel.

monitoring of bipolar quantities. Assuming that model M1 has a measuring range from 0 to $3000 \mu\text{strain}$ and model M3 has a range from -1000 to $2000 \mu\text{strain}$, the width of measuring channels of model M3 will be larger than that of measuring channels of model M1 (Fig. 10). This is given by the higher Bragg wavelength of individual channels of model M3 and, therefore, by the larger sensitivity coefficient. From this analysis, the influence of bipolar quantities is obvious. However, the magnitude of this influence is not significant.

D. Impact of the Production Tolerance

The value of the production tolerance of the Bragg wavelength parameter is small and it decreases with the improvement of Bragg grating production methods. However, a Bragg grating with zero tolerance cannot be produced yet.

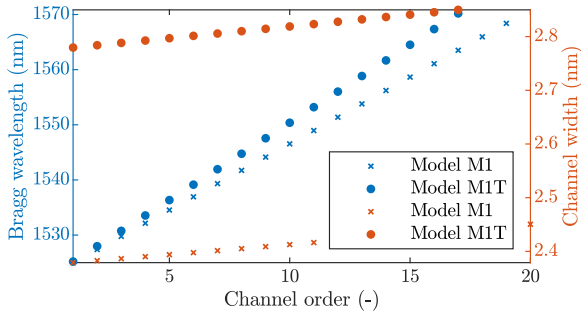


Fig. 11. Influence of the use of the production tolerance of Bragg wavelength.

Fig. 11 compares models M1 and M1T. The Bragg wavelength of individual measuring channels increases as well as the width of their spectra. The analysis is performed for the value of the production tolerance of Bragg wavelength ± 200 pm. This is the average value given by Bragg grating manufacturers who write FBGs over phase masks.

It is again true that both parameters increase faster in model M1T. With regard to the size of the measuring range, the percentage use of the spectrum for the production tolerance is not small.

Fig. 12(a) shows how the percentage use changes with the production tolerance. It is clear that taking the production tolerance into consideration significantly influences the use of the spectrum. For the value of tolerance ± 0.5 nm, the production tolerance of the Bragg wavelength takes up almost 30% in a model sensor branch.

The spectral use of the production tolerance depends on the size of the measuring range. For smaller measuring ranges, a larger part of the spectrum will be used by the production tolerance. Fig. 12(b) shows the spectral use of the production tolerance depending on the size of measuring range.

V. REAL SENSOR BRANCH

A. Mathematical Apparatus of the Real Sensory Branch

A real sensor branch usually consists of real FBG sensors for the measurement of various types of measured quantities. Unlike in a model branch, there is a set of input parameters defined specifically for each channel in a real sensor branch. Because of the big number of input parameters the number of which increases with the number of measuring channels, a real branch is not analyzed by model relations, but it is designed with a gradual calculation. The design of a real sensor branch considers both the negative and positive measuring ranges, the minimum guard band extended by an additional guard band, the tolerance of the Bragg wavelength given by the Bragg grating production and also by the production of the FBG sensor, and the tolerance of the width of the reflection spectrum. The imaging of the measuring channels of a real sensor branch is similar to model M4T (see Fig. 7).

The left edge of the first measuring channel is given by the following relation:

$$\lambda_{B1min} = \lambda_{LEDmin} \quad (15)$$

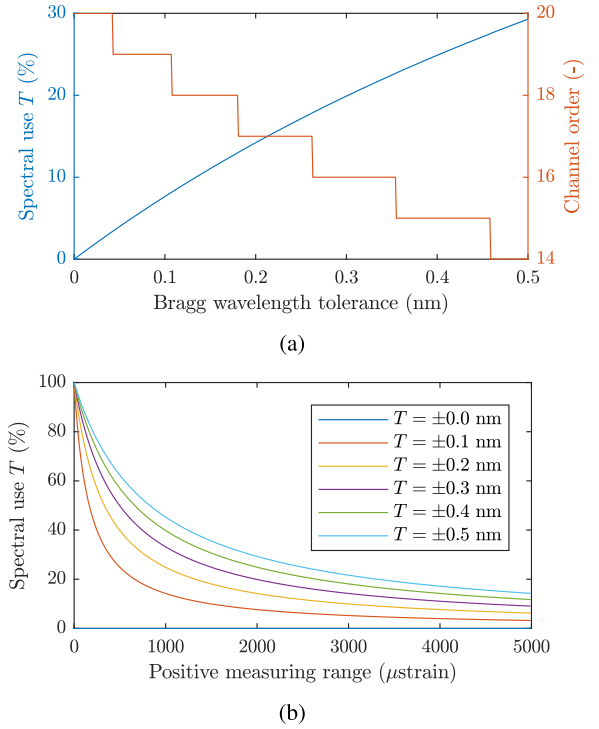


Fig. 12. (a) Spectral burden by the production tolerance. (b) Value of the spectral burden by the production tolerance for different values of measuring ranges and for different values of production tolerance.

where λ_{LEDmin} is the left edge of the working spectral range. When designing, it is necessary to consider the least favorable conditions, due to the tolerance of the Bragg wavelength, i.e., that the Bragg wavelength of the sensor will be $\lambda_{B1} \pm T_1$, where $T_1 = T_{FBG1} + T_{S1}$. This is the reason why there is a tolerance band around the Bragg wavelength of the first channel. First, the left edge of the tolerance band is calculated

$$\lambda'_{B1} = \lambda_{B1min} + k_{x1}MR_{N1} \quad (16)$$

where k_{x1} is a constant sensitivity coefficient of the FBG sensor of the first measuring channel for quantity x and MR_{N1} is the negative measuring range of the first measuring channel defined by a positive number. Then, the Bragg wavelength of the first measuring channel is calculated

$$\lambda_{B1} = \lambda'_{B1} + T_1 = \lambda'_{B1} + T_{FBG1} + T_{S1} \quad (17)$$

and the right edge of the tolerance band of the first measuring channel

$$\lambda''_{B1} = \lambda_{B1} + T_1 = \lambda_{B1} + T_{FBG1} + T_{S1}. \quad (18)$$

The right edge of the first measuring channel is then calculated according to the following equation:

$$\lambda_{B1max} = \lambda''_{B1} + k_{x1}MR_P \quad (19)$$

where MR_{P1} is the positive measuring range of the first measuring channel. Then, a guard band GB_1 is calculated, which is defined by formula (6). The left value of the second

measuring channel is shifted by value GB_1 from the right edge of the first channel according to the following equation:

$$\lambda_{B2} = \lambda_{B1\max} + GB_1. \quad (20)$$

The previous equations can be generalized for any measuring channel. The generalized equations are stated next, and the channel order is also given in parentheses for clarity

$$\lambda_{B(n)\min} = \lambda_{LED\min} \quad \text{for } (n = 1) \quad (21)$$

$$\lambda_{B(n)\min} = \lambda_{B(n-1)\max} + GB_{n-1} \quad \text{for } (n > 1) \quad (22)$$

$$\lambda'_{B(n)} = \lambda_{B(n)\min} + k_{x(n)}MR_{N(n)} \quad (23)$$

$$\lambda_{B(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)} \quad (24)$$

$$\lambda''_{B(n)} = \lambda_{B(n)} + T_n = \lambda_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)} \quad (25)$$

$$\lambda_{B(n)\max} = \lambda''_{B(n)} + k_{x(n)}MR_{P(n)}. \quad (26)$$

In specific applications, where high requirements are imposed on the accuracy of the measurement, it is possible to modify the design of a real sensor branch for the use of parametric sensitivity coefficients. The change is only for two relations $\lambda'_{B(n)}$ and $\lambda_{B(n)\max}$ where the measuring ranges are included

$$\lambda'_{B(n)} = \frac{\lambda_{B(n)\min}}{1 - k_{Nx(n)}MR_{N(n)}} \quad (27)$$

$$\lambda_{B(n)\max} = \lambda''_{B(n)} + (1 + k_{Nx(n)}MR_{P(n)}). \quad (28)$$

B. Verification of a Real Sensor Branch

The above-stated mathematical apparatus describes an effective proposal of a model and real sensor branch. The objective of this section is to check the effective proposal of the real sensor branch with FBG sensors. The monitored parameters of the check of the sensor branch proposal include the achievement of the efficient consumption of the work spectral area, absence of an overlap of the adjacent spectra in the limit case, and compliance with the 3-dB Rayleigh distribution criterion.

The aim of this section is to verify whether the proposed sensor branch design will be able to perform continuous measurements without cross referencing. For this reason, the proposal verification is based on assembling a sensor branch with five Bragg gratings for measuring deformations within the range of 0–3000 μstrain . The spectral work area is selected from the user perspective and it represents the interval of 1540–1565 nm. The selected manufacturer of the Bragg gratings defines the production tolerance parameters of the central Bragg wavelength $T_{FBG} = \pm 500$ pm and the tolerance of the width of the reflection band $T_{FWHM} = \pm 50$ pm. To monitor deformations using an interrogation unit that utilizes a CCD element, apodized Bragg gratings with a width of the reflection band of 200 pm were selected. Table III shows the proposed Bragg wavelengths and widths of the reflection spectra, as well as the real parameters of the fiber gratings supplied by the manufacturer.

The result of the proposal of the sensor branch is a spectral distribution of the FBG sensor shown in Fig. 13. The individual measuring channels are distinguishable by colors, while the spectrum of the radiation source is indicated using a blue line. Full lines represent the reflection spectra of the real

TABLE III
PARAMETERS OF FBG SENSORS OF THE SENSORY BRANCH

FBG	λ_B (nm)		$FWHM_{FBG}$ (pm)	
	Design	Real	Design	Real
1	1540.500	1540.195	200	189
2	1545.458	1545.176	200	206
3	1550.428	1550.255	200	238
4	1555.410	1555.019	200	221
5	1560.403	1560.054	200	178

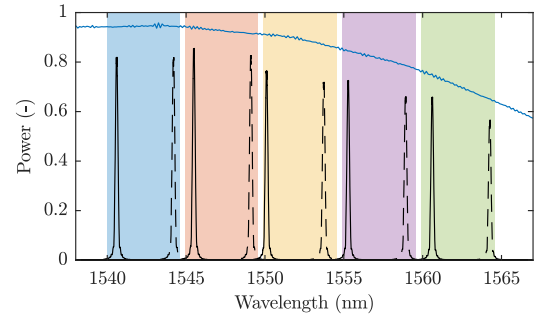


Fig. 13. Spectral characteristics of a real sensor branch with a marked LED spectrum (blue line), five measuring channels, Bragg wavelengths of model Bragg grating (red), and limit values (black dotted line).

Bragg gratings, while the dashed lines show the locations of the spectra in the limit case corresponding to the deformation load 3000 μstrain . The minimum guard band was expanded by $GB_{\text{ext}} = 1000$ pm.

Out of the total spectral band of 25 nm, 24.556 nm (98.22%) is used. Out of the total width of 25 nm, 1.41 nm (5.64%) is allocated for the minimum guard bands, 5 nm (20%) for the tolerance bands, and 18.146 nm (72.584%) for the actual measurements.

The verification of the proposed sensor branch was implemented by loading a Bragg grating in the third measuring channel. The optic fiber was mounted on the stretching mechanism, which was 729 mm long. The fiber was stretched with a step of 100 μm all the way to 2.2 mm, i.e., from 0 to 3000 μstrain with a step of 137 μstrain . Due to the standardized sensitivity coefficient defined in (3), the Bragg wavelength should shift by 3.653 nm toward higher wavelengths. Fig. 14 shows the individual loading steps and the corresponding spectral shifts. The measurements correspond to a linear relation between the spectral shift of the Bragg wavelength and the occurring deformation with a deformation coefficient of 12.91 pm/ μstrain . For maximal deformation loading of 3000 μstrain , the Bragg wavelength shifted from 1550.428 to 1554.144 nm (i.e., by 3.716 nm). The figure also shows the previous and the subsequent measuring channels, from which it is clear that the reflection spectrum in the third channel does not overlap into any adjacent channel.

The objective of this verification was not to show the highest possible number of measuring channels due to the corresponding chaotic graphic display. The conducted experiment demonstrates that the calculation of the minimum guard band pursuant to formula (6) and thus also the proposal of a real sensor branch pursuant to formulas (21)–(28) is correct and prevents undesirable crosstalk between the channels.

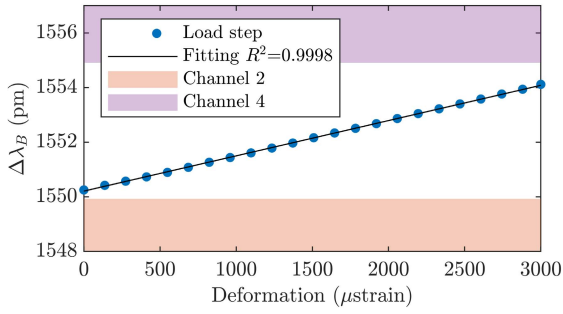


Fig. 14. Relation between deformation loading of the Bragg grating in the third measuring channel from 0 to 3000 μstrain with an approximate step of 137 pm.

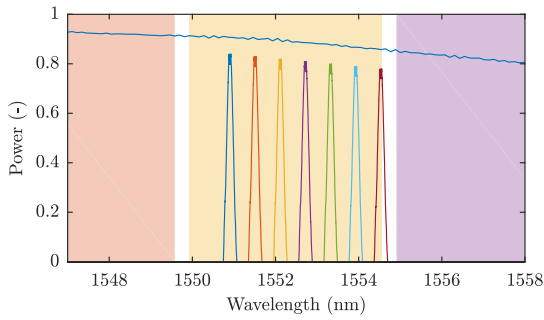


Fig. 15. Reflected spectrum of the FBG sensor in the third channel at a load from 0 to 3000 μstrain for the Bragg wavelength corresponding to $\lambda_{B3} + T_{\text{FBG}}$.

Fig. 15 shows the reflection spectra of the FBG sensor in the third channel if the Bragg wavelength of the grating is made with the maximal production tolerance, i.e., $\lambda_{B3} + T_{\text{FBG}} = 1550.928 \text{ nm}$. In this case, once again, the measuring channel is not left, and the 3-dB Rayleigh resolution criterion is complied with.

VI. DISCUSSION

This article describes an efficient design of a WDM sensor branch with FBG sensors. The reader could object to a lack of analysis of the chromatic dispersion, which occurs in transmission WDM networks, where it significantly restricts the transmission speed. In sensor applications with FBG, which uses a continuous excitation mode, chromatic dispersion causes the widening of the reflected spectral components from individual FBG sensors. This phenomenon is negligible since it widens the given spectrum by single digits (in pm) for FBG with a width of the spectrum of 200 pm and the fiber length of 1000 m between the evaluation unit and the sensor itself.

Apart from chromatic dispersion, the shape of the spectrum led from the FBG sensors to the evaluation unit is also impacted by the fiber attenuation. The impact of the attenuation of a standard silica fiber on a wavelength of approximately 1550 nm needs to be considered in the case of sensor networks. When the light passes through a fiber leading to a sensor and back to the evaluation unit and the fiber is 1 km long, it will cause a power decrease by approximately 10%. Should the difference of the distances

to two spectrally adjacent sensors be greater, their reflection spectra will come to the evaluation unit with different power levels. In that case, it is necessary to take these differences into account defining the R_2/R_1 reflectivity ratio and the subsequent choice of the coefficient k_{GB} pursuant to Fig. 5.

VII. CONCLUSION

Bragg gratings belong to the most common fiber-optic structures used in sensor applications, and they offer many advantages compared to conventional technologies. Their biggest advantage is the possibility of multiplexing tens of FBG sensors on one optical fiber with the use of WDM.

Currently, high emphasis is placed on the effective utilization of the limited spectral range of the radiation source to include as many Bragg sensors placed in a cascade as possible. In this article, the input parameters that influence the capacity of the wavelength multiplexing device were discussed. For model and real profiles of the reflection spectra of Bragg gratings, a minimum guard band size between the adjacent channels to burden the working spectral range as little as possible and the elimination of the probability of the occurrence of crosstalk between channels were analyzed.

On the basis of an analysis of input and output parameters, mathematical models for the description of sensor networks consisting of bare Bragg gratings were made. On the basis of these models, a final analysis gives information on the importance of the optional parameters of production tolerance or guard bands and the influence of their sizes on the effective use of the working spectral range. The results of the analyses show that guard bands and production tolerance significantly reduce the number of sensors in a sensor network. It is therefore necessary to direct the focus on improving the production technology of Bragg gratings and sensors and on increasing the accuracy of the evaluation devices and their software processing. In the second part, a mathematical apparatus was derived for the design of a real sensor branch with real FBG sensors, where the set of input parameters can be configured for each sensor.

The results of the verification of the mathematical models show that the designed sensor branches do not produce any undesirable crosstalk between the adjacent spectral sensors or any overlaps of adjacent measuring channels.

The topic of multiple-point sensing with Bragg gratings is currently very popular, and it is, therefore, good to devote our attention to increasing the capacity and flexibility of grating systems. In subsequent research, we will be dealing with improving the effectiveness of designing a sensor branch by incorporating evolution, autocorrelation, and spectral code algorithms that allow crosstalk between adjacent channels and with time-division multiplexing, which will increase the capacity of WDM device.

REFERENCES

- [1] L. T. Blair and S. A. Cassidy, "Wavelength division multiplexed sensor network using Bragg fibre reflection gratings," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 18, pp. 1734–1735, Aug. 1992.
- [2] Y. Yu, L. Lui, H. Tam, and W. Chung, "Fiber-laser-based wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 702–704, Jul. 2001.

- [3] N. Mohammad *et al.*, "Analysis and development of a tunable fiber Bragg grating filter based on axial tension/compression," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 8, pp. 2001–2013, Aug. 1, 2004.
- [4] G. P. Leguizamón, B. Ortega, and J. Capmany, "Advanced subcarrier multiplexed label swapping in optical packet switching nodes for next generation Internet networks," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 6, pp. 655–669, Mar. 15, 2009.
- [5] Z. Pan *et al.*, "Tunable chromatic dispersion compensation in 40-Gb/s systems using nonlinearly chirped fiber Bragg gratings," *J. Lightw. Technol.*, vol. 20, no. 12, pp. 2239–2246, Dec. 1, 2002.
- [6] F. Bilodeau *et al.*, "Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon/silica waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 12, pp. 953–955, 1993.
- [7] D. P. Hand and P. S. J. Russell, "Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers," *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 102–104, 1990.
- [8] A. Othonos, "Fiber Bragg gratings," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341, Dec. 1997.
- [9] C. Wei *et al.*, "A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting," *IEEE Sensors J.*, vol. 10, no. 12, pp. 1905–1912, Dec. 2010.
- [10] F. Peng, N. Duan, Y.-J. Rao, and J. Li, "Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 20, pp. 2055–2057, Oct. 15, 2014.
- [11] D. Tosi, M. Olivero, A. Vallan, and G. Perrone, "Weigh-in-motion through fibre Bragg grating optical sensors," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 17, pp. 1223–1225, 2010.
- [12] M. Al-Tarawneh, Y. Huang, P. Lu, and D. Tolliver, "Vehicle classification system using in-pavement fiber Bragg grating sensors," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 7, pp. 2807–2815, Apr. 2018.
- [13] S. Sprager and D. Zazula, "Heartbeat and respiration detection from optical interferometric signals by using a multimethod approach," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 59, no. 10, pp. 2922–2929, Oct. 2012.
- [14] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, V. Vasinek, H. Nazeran, and P. Siska, "A non-invasive multichannel hybrid fiber-optic sensor system for vital sign monitoring," *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 111, Jan. 2017.
- [15] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, M. Novak, J. Jargus, and V. Vasinek, "Analysis encapsulation of fiber Bragg gratings into polydimethylsiloxane for the needs of dynamic weighing," *Proc. SPIE*, vol. 10231, May 2017, Art. no. 102311A.
- [16] M. Ciocchetti *et al.*, "Smart textile based on fiber Bragg grating sensors for respiratory monitoring: Design and preliminary trials," *Biosensors*, vol. 5, no. 3, pp. 602–615, Sep. 2015.
- [17] M. Schroeck, W. Ecke, and A. Graupner, "Strain monitoring in steel rock bolts using FBG sensor arrays," *Proc. SPIE*, vol. 4074, pp. 298–304, Aug. 2000.
- [18] S. J. Mihailov, F. Bilodeau, K. O. Hill, D. C. Johnson, J. Albert, and A. S. Holmes, "Apodization technique for fiber grating fabrication with a half-tone transmission amplitude mask," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 21, pp. 3670–3677, 2000.
- [19] H. Guo, F. Liu, Y. Yuan, H. Yu, and M. Yang, "Ultra-weak FBG and its refractive index distribution in the drawing optical fiber," *Opt. Exp.*, vol. 23, no. 4, pp. 4829–4838, 2015.
- [20] M. Fajkus *et al.*, "Capacity of wavelength and time division multiplexing for quasi-distributed measurement using fiber Bragg gratings," *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 5, pp. 575–582, Dec. 2015.
- [21] M. Fajkus *et al.*, "Mathematical model of optimized design of multi-point sensoric measurement with Bragg gratings using wavelength division multiplex," *Proc. SPIE*, vol. 9889, Apr. 2016, Art. no. 98892F.
- [22] P. Li and X. Zhao, "Increasing the number of series FBG sensors in WDM network using a genetic algorithm," in *Proc. 7th World Congr. Intell. Control Automat.*, Jun. 2008, pp. 3604–3607.
- [23] D. Liu, K. Tang, Z. Yang, and D. Liu, "A fiber Bragg grating sensor network using an improved differential evolution algorithm," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp. 1385–1387, Oct. 1, 2011.
- [24] H. Jiang, J. Chen, and T. Liu, "Wavelength detection in spectrally overlapped FBG sensor network using extreme learning machine," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 20, pp. 2031–2034, Oct. 15, 2014.
- [25] F. Chung, J. A. Salehi, and V. K. Wei, "Optical orthogonal codes: Design, analysis and applications," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 35, no. 3, pp. 595–604, May 1989.
- [26] D. Tosi, "Review and analysis of peak tracking techniques for fiber Bragg grating sensors," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2368, Oct. 2017.



Marcel Fajkus was born in Czech Republic, in 1987. In 2017, he successfully defended his dissertation thesis at the VSB—Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic.

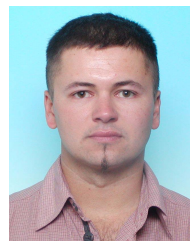
He works as an Assistant Professor at the VSB—Technical University of Ostrava. His current research interests include fiber Bragg sensors and distributed systems in traffic, civil engineering, and biomedical applications. He has more than 137 journal articles and conference papers (H-index of 9 without self-citations) in his research areas and three valid patents.



Petr Kovar was born in Czech Republic, in 1975. He received the master's degree in mathematics and physics education from Masaryk University, Brno, Czech Republic, in 1998, the master's degree in mathematics and statistics from the University of Minnesota at Duluth, Duluth, MN, USA, in 2004, the Ph.D. degree in computer science and applied mathematics from the VSB—Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic, in 2004, and the Habilitation degree in applied mathematics from the University of West Bohemia, Pilsen, Czech

Republic, in 2013.

Since 1998, he has been working at the VSB—Technical University of Ostrava as an Assistant Professor, where he has been an Associate Professor since 2013. He held a teaching assistant position at the University of Minnesota at Duluth from 2002 to 2004 and for a semester as an Assistant Professor in 2015. From 2010 to 2021, he held a part-time research position at the IT4Innovations National Supercomputing Center, Ostrava. He has authored more than 30 research articles in mathematics. His area of research includes discrete mathematics a graph theory, in particular graph factorization and graph labelings and their applications.



Jan Skapa was born in Ostrava, Czech Republic, in 1980. He received the master's degree in electronics and communication technology from the VSB—Technical University of Ostrava, Ostrava, in 2005, and the Ph.D. degree in telecommunication technology in 2009.

Since 2008, he has been working as an Assistant Professor at the Department of Telecommunications, VSB—Technical University of Ostrava. His main fields of professional interest are optical-fiber communications, optical-fiber sensors, signal processing

in communication technologies, and discrete wavelet signal processing.



Jan Nedoma (Senior Member, IEEE) was born in Czech Republic, in 1988. He received the master's degree in information and communication technology from the Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic, in 2014. In 2018, he successfully defended his dissertation thesis at the Technical University of Ostrava. He defended his habilitation thesis titled "Fiber-Optic Sensors in Biomedicine: Monitoring of Vital Functions of the Human Body in Magnetic Resonance (MR) Environment."

Since 2014, he has been working at the Technical University of Ostrava as a Research Fellow. He worked as an Assistant Professor at the Technical University of Ostrava. He has become an Associate Professor in communication technologies in 2021 after defending the habilitation thesis. His areas of scientific interest include optical communications, optical atmospheric communications, optoelectronics, optical measurements, measurements in telecommunication technology, fiber-optic sensory systems, data processing from fiber-optic sensors, and the use of fiber-optic sensors within the SMART technological concepts (smart home, smart home care, intelligent building, smart grids, smart metering, smart cities, and so on) and for the needs of Industry 4.0. He has more than 150 journal articles and conference papers in his research areas and holds nine valid patents.



Radek Martinek (Member, IEEE) is currently a Full Professor of cybernetics with the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic. He is currently serving as the Vice-Dean for Science and Research and the Deputy Head of the Department of Cybernetics and Biomedical Engineering. His research is mainly focused on hybrid and bio inspired methods for advanced signal processing. His research activities closely correlate with pedagogical practice. The main priority of his research activities is high applicability of results and deployment of novel experimental algorithms in the field of cybernetics and biomedical Engineering. He is the author of more than 300 publications with over 2,000 citations and an H-index of 21. He also holds ten Czech national patents and is the Leader or a Co-Leader of dozens of projects with a budget of millions of euros.



Vladimir Vasinek was born in Ostrava, Czech Republic. He graduated in physics, specialization in optoelectronics, from the Science Faculty of Palacky University, Olomouc, Czech Republic, in 1980. He received the RNDr. degree in applied electronics and the Ph.D. degree in quantum electronics and optics from the Science Faculty of Palacky University, in 1981 and 1989, respectively.

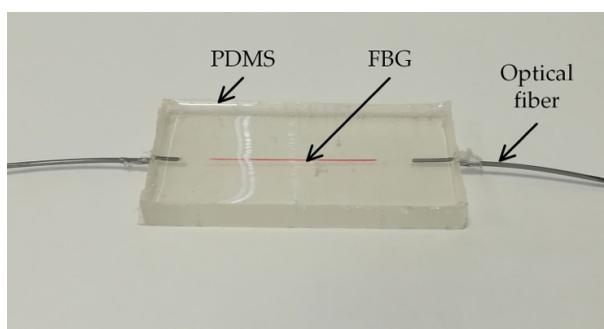
He became an Associate Professor in applied physics in 1994. He has been a Professor of electronics and communication science at the Department of Telecommunications, VSB—Technical University of Ostrava, since 2007. His research work is dedicated to optical communications, optical fibers, optoelectronics, optical measurements, optical networks projecting, fiber-optic sensors, and MW access networks.

Dr. Vasinek is a member of many societies, including the Optical Society (OSA), the Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE), the European Optical Society (EOS), and the Czech Photonics Society. He is also a member of habitation boards and the boards appointing to professorship. He is the Chairperson of the Ph.D. Board at the VSB—Technical University of Ostrava.

6.2 PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas

Nejvýznamnější výsledky

Tato publikace prezentuje vývoj a testování optovláknového systému založeného na Braggových mřížkách zapouzdřených v PDMS, který je určen pro monitorování automobilové dopravy v městských oblastech. Výsledky ukazují, že tento systém je schopen spolehlivě detekovat a analyzovat dopravní hustotu, a to i v náročných podmínkách městského prostředí, kde tradiční technologie selhávají. Z pohledu této habilitační práce technické řešení umožní spolehlivější detekci průjezdu automobilů přes železniční přejezdy a tím zvýšení bezpečnosti v železniční dopravě.



Obrázek 6.2: Grafický abstrakt publikace PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas.

Hlavní přínosy a závěry

Hlavním přínosem této studie je představení nového přístupu k monitorování automobilů pomocí PDMS-FBG senzorů, které kombinují vysokou citlivost a flexibilitu s odolností vůči mechanickému namáhání a vnějším vlivům. Studie ukazuje, že tento systém může efektivně nahradit nebo doplnit stávající monitorovací technologie, čímž přispívá ke zlepšení bezpečnosti a plynulosti jak v automobilové tak železniční dopravě.

Další směřování výzkumu

Navazující výzkum by měl směřovat k rozšíření použití PDMS-FBG senzorů na monitorování dalších parametrů a integraci těchto senzorů do stávajících inteligentních dopravních systémů, což by mohlo přinést významné zlepšení v oblasti správy a řízení dopravy a její bezpečnosti.

Received June 4, 2020, accepted June 29, 2020, date of publication July 3, 2020, date of current version July 22, 2020.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3006985

PDMS-FBG-Based Fiber Optic System for Traffic Monitoring in Urban Areas

MARCEL FAJKUS¹, MICHAEL FRIDRICH¹, JAN NEDOMA¹, RADANA KAHANKOVA²,
RADEK MARTINEK², (Member, IEEE), EMIL BEDNAR¹, AND JAKUB KOLARIK²

¹Department of Telecommunications, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VŠB–Technical University of Ostrava, 708 00 Ostrava, Czech Republic

²Department of Cybernetics and Biomedical Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VŠB–Technical University of Ostrava, 708 00 Ostrava, Czech Republic

Corresponding author: Marcel Fajkus (marcel.fajkus@vsb.cz)

This work was supported in part by the Ministry of Education of the Czech Republic under Grant SP2019/85, in part by the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic under Grant FV10396, in part by the European Regional Development Fund in the Research Centre of Advanced Mechatronic Systems Project within the Operational Program Research, Development, and Education under Project CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000867, and in part by the European Regional Development Fund in Research Platform Focused on Industry 4.0 and Robotics in Ostrava Project within the Operational Program Research, Development, and Education under Grant CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008425.

ABSTRACT This article introduces fiber Bragg grating (FBG) system for monitoring selected traffic flow parameters in urban areas. The system is able to monitor traffic density or speed of cars driving in single lane. The proposed system consists of five Bragg gratings encapsulated in Polydimethylsiloxane polymer and is characterized by easy and inexpensive installation in the milled upper layer of the road covered with an asphalt mixture. The results of first operational tests presented in this study include 3978 passing vehicles of various specifications. The system's vehicle detection success rate is 99.62%. And further, a mean absolute error 1.35 kph and a relative error 2.62% when measuring vehicle speed.

INDEX TERMS Fiber Bragg grating, PDMS-FBG sensor, polydimethylsiloxane, road traffic monitoring, speed measurement.

I. INTRODUCTION

Traffic sensors are devices that provide input data for traffic management systems. These sensors are installed primarily on and above the roadway or within the road surface. The basic information and traffic parameters provided by the sensors include vehicle speed, vehicle classification, wheel-base and number of axles, vehicle weight, axle load of the road, stopped vehicle detection, lane or direction change detection and traffic density, which indicates the quality of traffic flow. The traffic sensors are primarily divided into two basic groups, intrusive and non-intrusive (i.e. destructive or non-destructive to the road and its surroundings).

A. STATE-OF-THE-ART SENSORS

The conventional traffic sensors include inductive loops [1], [2] and magnetic field sensors [3]. These are among the most commonly used sensors for their simplicity and reliability.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Zinan Wang¹.

On the other hand, they also have some disadvantages such as limited usage in reinforced concrete structures, higher costs associated with their installation in the road structures and the susceptibility to breakage due to heavy traffic.

Pneumatic sensors represent a portable technology with very easy installation. The principle of their operation is based on measuring the change in pressure in a pneumatic road tube [4], [5]. The drawback of the technology is that standing or slow-moving vehicles cannot be easily identified which causes inaccurate axle counts at higher traffic intensities. Moreover, this type of sensor is not used in adverse weather conditions, such as snow or rain.

Piezoelectric sensors [6]–[8] work on the principle of compression of a measuring probe placed in a milled in longitudinal groove. The voltage generated by the sensor is proportional to the force or weight (wheels or axles) of the passing car.

Microwave motion sensors [9], [10] uses electro-magnetic radiation; the vehicle speed is determined using micro-waves reflected back to the receiver based on the Doppler effect.

The disadvantage of these sensors is their susceptibility to electromagnetic interference, radio waves are reflected from metal parts of car body and other obstacles, such as barriers, street lighting poles, iron or concrete structures.

The principle of operation of Closed Circuit Television (CCTV) technology is based on the digitization of a static image, where the passage of the vehicle changes the values of color and brightness. This technology is based on a set of one or more interconnected video cameras and a powerful computer for data processing and analysis. Using CCTV, it is also possible to register state license plates [11] and calculate the vehicle speed using the total distance travelled and the time taken from start to finish of selected section. CCTV technology is not affected by vehicle changing lanes, because the cameras monitor all lanes and are interconnected [12], [13].

B. FIBER OPTIC AND OPTICAL SENSORS

Fiber optic and optical sensors have different principles of operation and offer several significant advantages, such as reliability, accuracy, high sensitivity, electromagnetic and chemical resistance or a wide operating temperature range. These sensors are used in many areas, such as automobile traffic monitoring.

Active infrared sensor gates work on the principle of transmitting and receiving an optical beam (laser or infrared, respectively) between the transmitter and receiver. [14], [15]. This kind of measurement is of a portable or stationary nature and is designed for speed and traffic density monitoring, or excessive trucks measurement.

Another type of sensors is based on microbending effect [16], where the attenuation of the optical fiber changes as the car passes. The fibers are stored in special protective housing and installed into the road structure. This type of sensors is rather experimental and is widely used in practice. In addition to micro-bending technologies, interferometric systems have also been used among the literature, mostly to count automobile axles [17], [18].

A special type of fiber optic sensors are Bragg gratings. To detect vehicle passage and measure vehicle speed, these sensors can be installed in the road itself (invasively) [19] or they can be placed on the road surface for short-term non-invasive use [20]. Weigh-in-Motion (WIM) sensors are other widely used sensors in traffic flow monitoring. This type of sensor is mainly based on Bragg gratings, which are installed in the road in various forms of encapsulation [21]. Portable pads based on Bragg grating are also being developed for weighing cars, but their use is limited by the maximum speed of the monitored cars [22]. In general, WIM are used in conjunction with other systems, so that the overall system can, in addition to the vehicle weight, provide information on speed, license plates, driver's appearance, vehicle dimensions, etc.

Finally, Rayleigh scattering based distributed acoustic sensing (DAS) has emerged as a powerful and rapidly adopted sensing technology in the recent years. The DAS technology evaluates Rayleigh scattering in the fiber optic cables, where

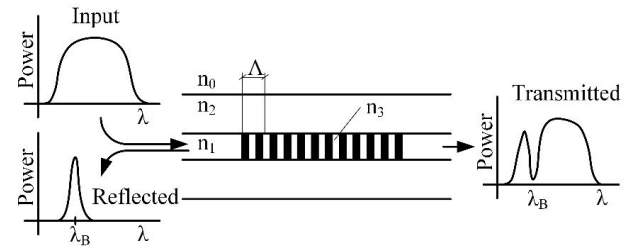


FIGURE 1. Operational principle and structure of the Bragg grating.

acoustic activity generates acoustic energy that is absorbed by molecules in the fiber core. This causes a phase shift in backscattered light, which is detected by the evaluation unit and subsequently analyzed. The application of this technology in automobile traffic has been demonstrated in [23], [24], the authors state that it is possible to monitor more traffic parameters (such as vehicle detection, direction, speed) using a single optical fiber.

II. FIBER BRAGG GRATINGS

Fiber-optic Bragg gratings (FBGs) are a rapidly evolving group of fiber-optic single-point sensors [25]. Bragg gratings are formed by a structure with periodic variation in the index of the fiber core. In this structure, the refractive index of the core n_1 alternates with an increased refractive index $n_3 = n_1 + \delta_n$, where δ_n is the induced refractive index which results from exposure of the photosensitive optical fiber to UV light. Fig. 1 shows the structure and the operational principle of the Bragg grating.

The structure of the Bragg grating reflects a narrow frequency band of the broadband light and transmits the others. The central part of the reflected spectrum is called the Bragg wavelength λ_B and is given by:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda, \quad (1)$$

where n_{eff} is the effective refractive index of the grating in the fiber core Λ is the grating period. Other wavelengths are transmitted without attenuation. The Bragg wavelength is the geometric and optical properties that change under the influence of mechanical and thermal stresses. The relation of the Bragg wavelength change, the relative deformation and temperature is expressed by the following relation:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\epsilon + (\alpha_\Delta + \alpha_n) \Delta T \quad (2)$$

where $\Delta\lambda_B$ is Bragg wavelength shift, k is deformation coefficient, ϵ is deformation, α_Δ is the coefficient of thermal expansion, α_n is the thermo-optic coefficient and ΔT is change of temperature [26].

III. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PDMS-FBG SENSOR

Road traffic monitoring using FBG sensors can be implemented using two approaches. In first, non intrusive approach, the sensors can be mounted overhead, to the side of

the roadway or on the road surface non-invasively. The second, intrusive approach, requires the sensors being mounted directly into the road structure (invasively). The non-invasive installation approach is only suitable for temporary use. This approach is characterized by a simpler implementation, but the life of these sensors is reduced, and it is also necessary to remove the sensors during winter road maintenance. The intrusive approach requires cutting into the road for installation and maintenance. Although this approach is more costly, its service life is longer and it is capable of continuous operation. This article describes an intrusive system that was invasively installed in the upper layer of the road structure.

Bragg gratings in a single-mode optical fiber with primary acrylate or polyimide protection have tensile strength but very susceptible to mechanical damage or breakage. For this reason, it is necessary to protect the optical fiber in sensory applications, especially when installed in the road, where the fibers must be invariant to chemical and thermal changes in concrete and also resistant to high pressure caused by from passing vehicles.

Different requirements are placed on the encapsulation of the Bragg grating. On the one hand, the sensor must be robust and resistant to the negative effects of the environment, but on the other hand it must have a sufficient sensitivity. Polymeric materials have been selected for encapsulating the Bragg gratings since they are sufficiently flexible for deformation measurements yet hard to break. Based on the initial tests and also previous experience [27]–[29], the authors selected polydimethylsiloxane (PDMS), a polymeric two-component potting material.

PDMS is a non-toxic and non-flammable polymeric organosilicon compound that is resistant to chemicals, compressive stress, UV radiation. At the same time, it does not affect the function of FBG, see [30].

A. PDMS-FBG SENSOR INSTALLATION TO ROADWAY

For the first phase of the experiments, we used a prototype of the PDMS-FBG sensor with dimensions of $60 \times 30 \times 7$ mm. The sensor was made using single-mode optical fiber G.657. A with acrylate primary protection and Bragg grating (Bragg wavelength of 1548.388 nm, reflectance 93.3%, spectral width of 198 pm (full width at half maximum, FWHM)). The FBG fiber was placed in a mold printed on a 3D printer and subsequently encapsulated with PDMS Sylgard 184 polymer. SYLGARD 184 is a silicone elastomer kit which contains two chemicals polymeric base and a curing agent which cross-links with the polymeric matrix. Curing was carried out for 90 min at 80°C. Figure 2(a) shows a diagram illustrating the deployment of individual parts in the PDMS-FBG sensor, Figure 2(b) shows the sensor prototype. The fiber was protected by a PVC (Polyvinylchloride) tube with an outer dimension of 3 mm (PVC protection is visible in Fig. 3(a))

The PDMS-FBG sensor was embedded across in the monitored road surface, please see Fig. 3. In the first step, a longitudinal groove (2 m long, 10 mm wide, 15 mm deep) was milled into the road. The PDMS-FBG sensor was placed in

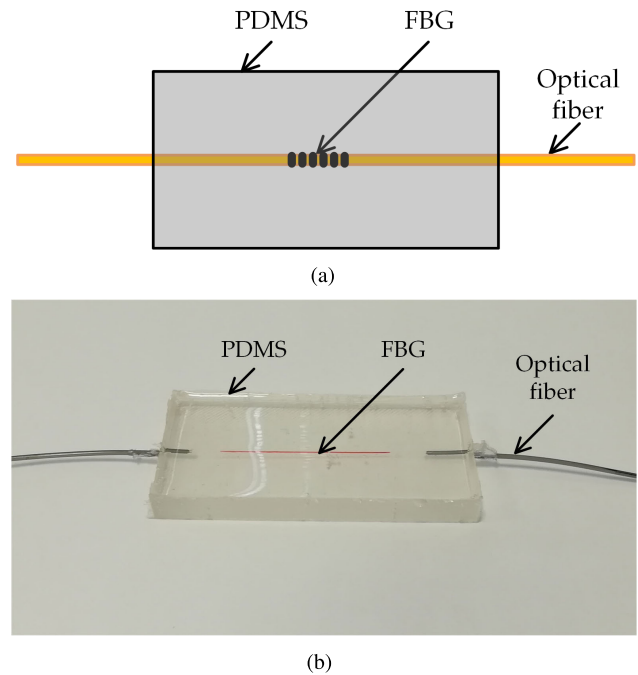


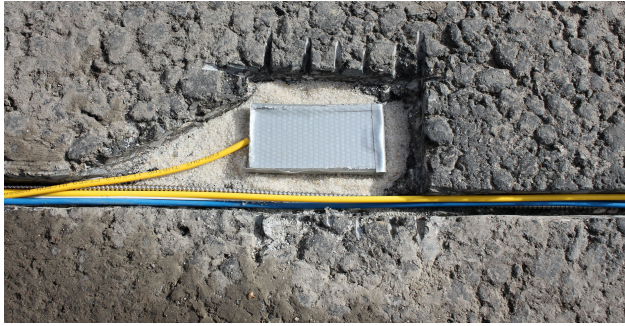
FIGURE 2. Illustration of PDMS-FBG sensor (a); Realized PDMS-FBG sensor prototype (b).

a part of the groove located 1 meter from the curb that was widened to the dimensions of about 80×120 mm, please see Fig. 3(a). In the second step, the groove with the sensor was filled with Biolast 2K asphalt (Nadler Strasentechnik, Barleben, Germany), see Fig. 3(b). The cold asphalt curing took place at an outdoors (temperature of $23 \pm 1^\circ\text{C}$) and took 90 min.

The effect of the curing process of the selected type of cold asphalt on the PDMS-FBG sensor Bragg wavelength is shown in Figure 4. A sharp increase of 411 pm (yellow area in Figure 4) related to asphalt-pouring is followed by a gradual decline of the wavelength (200 pm in 1.5 hours) associated with the curing process (blue area). The process of installing the sensor into the road surface caused an increase in the Bragg wavelength by about 190 pm. This small Bragg wavelength change during the installation and curing process does not lead to significant spectral requirements in the design of the sensor branch with five PDMS-FBG sensors described below. The embedding of the FBGs in PDMS and asphalt curing process also does not affect the shape of the reflection spectrum, and thus the functionality of the PDMS-FBG sensor.

B. PDMS-FBG SENSOR SPATIAL SENSITIVITY

Traffic density and speed monitoring is conditioned by accurate vehicle detection. Therefore, it is necessary to ensure the sensitivity of the sensor element to car passages along the entire width of the road lane (i.e. width of approx. 3.2 m – which is an average width of the roads in the Czech cities). The designed PDMS-FBG sensor is a single-point sensor; to cover the entire lane it is necessary to



(a)



(b)

FIGURE 3. PDMS-FBG sensor placement in widened milled in groove (a); PDMS-FBG sensor covered with cold asphalt (b).

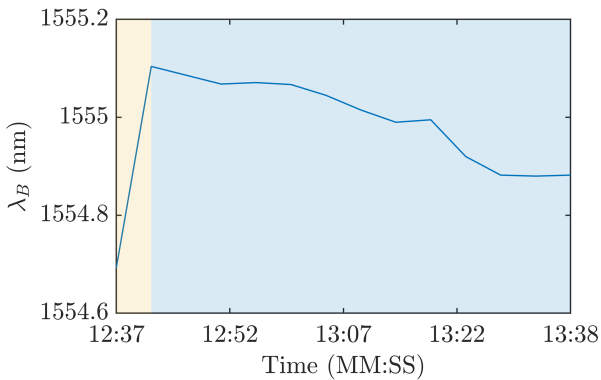


FIGURE 4. Effect of the curing process on PDMS-FBG sensor Bragg wavelength.

use n PDMS-FBG sensors connected in series. To determine the optimal number of sensors needed, it is necessary to know the spatial sensitivity of the PDMS-FBG sensor.

The spatial sensitivity of the sensor was determined by analyzing the magnitude of the sensor's response to the axle of the vehicle passage at various distances from the PDMS-FBG sensor. For this purpose, a grid was drawn on the road on both sides of the sensor with a spatial resolution of 5 cm (see Fig. 5). Subsequently, a test was carried out based on 642 passages of vehicles with various specifications (605 cars, 31 cars with a trailer, 6 trucks). The distance between the axle and the sensor was then determined for each vehicle using a video recording.

Figure 6 shows the responses of PDMS-FBG sensor to vehicle passage depending on the axle distance of the vehicle from the sensor. The axle passes directly via the PDMS-FBG

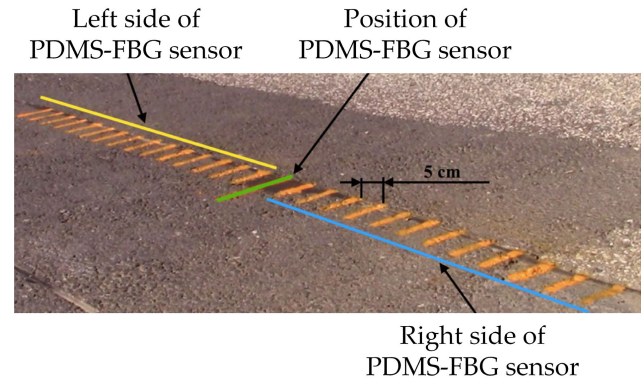


FIGURE 5. Grid marking PDMS-FBG position for spatial sensitivity analysis.

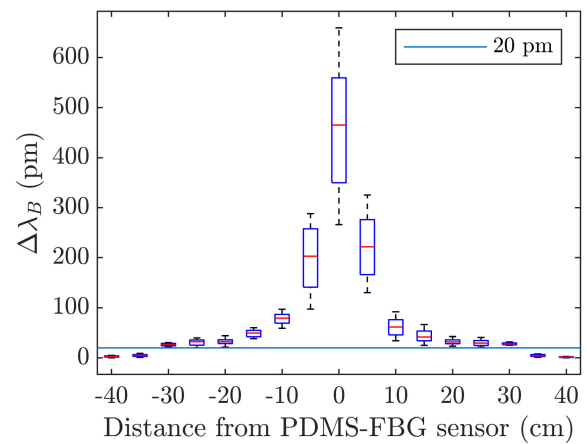


FIGURE 6. Effect of the distance between the sensor and the axle on PDMS-FBG sensor response.

sensor correspond to the highest response, which corresponds to an absolute value of $600 \mu\text{m}$. As the crossing distance increases, the response decreases; for example, at a distance of 30 cm, absolute value of the response is 20 pm. This is the value that can be certainly detected by the evaluation unit since the minimum resolution is 1 pm. Based on this analysis, the maximum distance between PDMS-FBG sensors was set as 60 cm, i.e. the system is able to detect axle that passes between two sensors 60 cm apart.

C. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PDMS-FBG SENSOR-CHAIN FOR SINGLE-LINE TRAFFIC MONITORING

Based on the above analysis, the spatial sensitivity of the PDMS-FBG sensor for vehicle detection was defined as ± 30 cm. To cover the entire width of the 3.2 m lane, a sensor-chain with five PDMS-FBG sensors was designed, see Figure 7.

In the next phase, it is also necessary to determine the spectral spacings of individual PDMS-FBG sensors. These spacings must be defined by the maximum possible sensor deflection caused by the car passage. Spacings must prevent overlapping of adjacent spectra, i.e. signal crosstalk.

TABLE 1. Spectral parameters PDMS-FBG sensory branch.

ID	λ_B (nm)				Measuring spectral window (nm)		
	Design	Used FBG	PDMS-FBG sensor	PDMS-FBG sensor in the road	λ_{min}	λ_{max}	Width
1	1531	1531.243	1531.605	1531.912	1530.000	1533.749	3.75
2	1535	1535.031	1535.343	1535.585	1533.749	1537.393	3.64
3	1539	1539.113	1538.894	1539.201	1537.393	1541.582	4.19
4	1543	1542.989	1543.580	1543.963	1541.582	1546.076	4.49
5	1547	1547.203	1547.828	1548.188	1546.076	1550.000	3.92

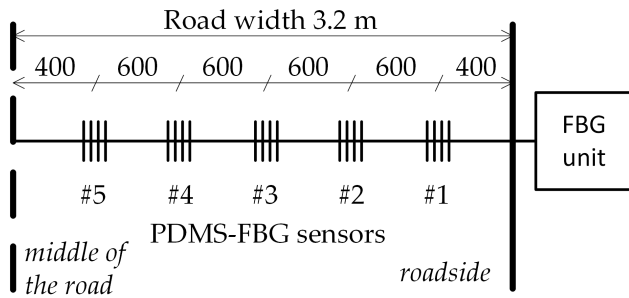


FIGURE 7. Single-line PDMS-FBG sensor deployment in the road with connection to the FBG evaluation unit.

In the pilot tests with a limited number of 642 passages, the maximum signal amplitude ranged from 583 pm to 631 pm. A spectral window must be assigned to each PDMS-FBG sensor and the individual spectral windows must not overlap. Individual PDMS-FBG sensors can only operate in their spectral windows, otherwise a measurement error, so-called first order crosstalk, can occur.

Although the pilot test performed involved vehicle passages of various specifications and weights, some margin is considered, which takes into account, for example, the passage of large goods vehicles (trucks), which may elicit an even greater response. Therefore, we selected the spectral windows size of 2 nm.

When modeling the sensory branch, it is necessary to consider other factors such as manufacturing tolerance of Bragg wavelength in FBG production, effect of Bragg grating encapsulation in PDMS polymer, effect of asphalt curing, uneven distribution of road temperature changes, etc. Based on analysis [31], which beyond the scope of this article, a 2 nm margin was defined. For this reason, 4 nm (2 nm for measuring and 2 nm for other factors described above) is available for each measuring channel.

Table 1 shows the Bragg wavelengths for individual phases, beginning with design of the sensory branch and culminating with the installation of the system in the road-way, and the spectral parameters of the measuring channels. In Table 1, ‘Design’ column includes the proposed Bragg wavelengths, whereas ‘Used FBG’ column shows the wavelengths of the FBGs produced. Moreover, the ‘PDMS-FBG sensor’ column includes the wavelengths of the implemented PDMS-FBG sensors and ‘PDMS-FBG sensor in the road’

column includes the wavelengths of PDMS-FBG sensors installed in the road after curing process. The last three columns include the maximum (λ_{max}) and minimum (λ_{min}) wavelengths defining the spectral window and its width.

Figure 8 illustrates the spectral distribution of the sensory branch. The Bragg wavelength is given for each reflection spectrum, and the width for each spectral window is shown in the lower part of the graph. Since the response to vehicle passage may be bipolar (positive and negative peaks, see Fig. 9), the spectral windows are defined to be symmetrical around the Bragg wavelength.

The PDMS-FBG sensor-chain with five PDMS-FBG sensors covers 20 nm of spectral space. When using two measuring chains, which will not overlap spectrally, it is possible to implement a single-line speed measurement with a one evaluation unit. The first measuring system can use a spectral space from 1510 to 1530 nm, the second from 1530 to 1550 nm. If speed measurement is required in two lanes, additional (third and fourth) measuring chains can be used and cover the spectral space from 1550 to 1570 nm and from 1570 to 1590 nm, respectively. All 4 chains will require 80 nm spectral space, which can be evaluated by one FBG evaluation unit FBGuard FAST 1550 (Safibra, s.r.o., Prague, Czech republic). This FBG unit consist of a wide-spectral light source with FWHM (Full Width at Half Maximum) 80 nm and an output power of 1 mW, and CCD (Charge-coupled device) spectrometer with a sampling frequency of 1 kS/s. For speed measurement, detecting the direction of the vehicle passage or two-lane monitoring, two PDMS-FBG chain sensors can be used connected to the FBG unit via a coupler.

D. PDMS-FBG CHAIN SENSOR SIGNAL PROCESSING

Figure 9(a) shows examples of raw signals from individual PDMS-FBG sensors (labeled as FBG1 – FBG5). The time window of 0.8 s shows a sample corresponding to the car passage at the speed of 53.74 kph. The response of individual PDMS-FBG sensors depends on the distance of the wheel from the measuring probe, vehicle (axle) weight, speed, etc. The individual sensors and the asphalt have a certain degree of flexibility; each passage is thus manifested by a positive peak followed by negative one, which is caused by the sensor stress release. The signal contains a low-frequency component corresponding to the memory effect and relaxation of the PDMS-FBG sensor and temperature change. These unwanted components are removed by a 4-order Butterworth high-pass

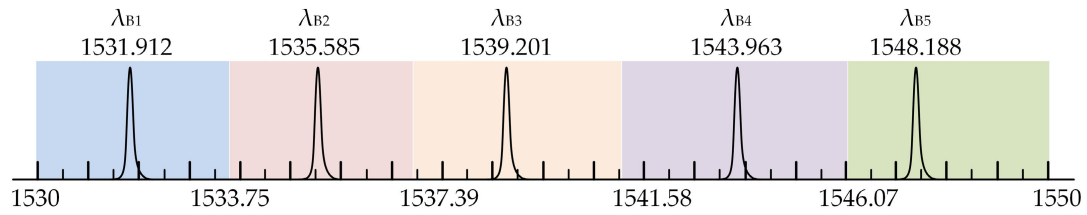
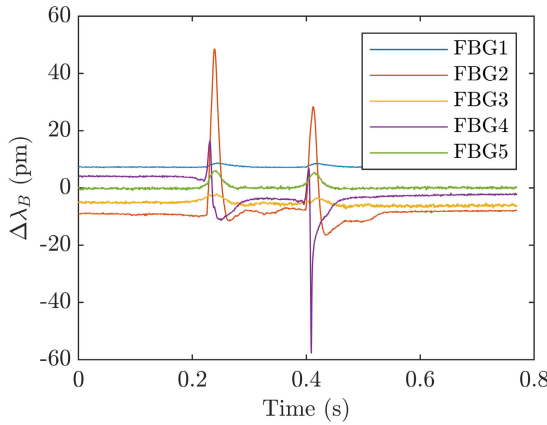
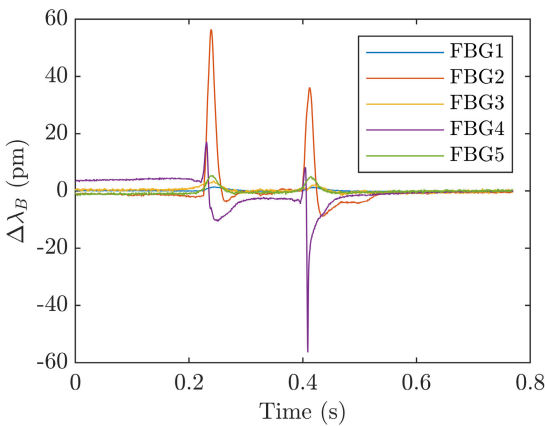


FIGURE 8. Operational principle and structure of the Bragg grating.



(a)



(b)

FIGURE 9. Example of system response to car passage at a speed of 53.74 kph; (a) raw data from the PDMS-FBG chain sensor; (b) signals pre-processed using a high-pass filter.

filter with a cut-off frequency of 0.2 Hz. The filtered signal is shown in Figure 9(b).

The PDMS-FBG chain sensor has been designed so that each axle is detected even if the passage takes place between two adjacent PDMS-FBG sensors. As a result, each passage stresses at least two sensors (unless the axle passes between the curb and the first sensor). When considering the axle load on several sensors, it is possible to sum signals from five PDMS-FBG sensors and obtain a more distinctive sum signal for vehicle passage detection. The individual responses of FBG sensors are typically manifested by a positive leading

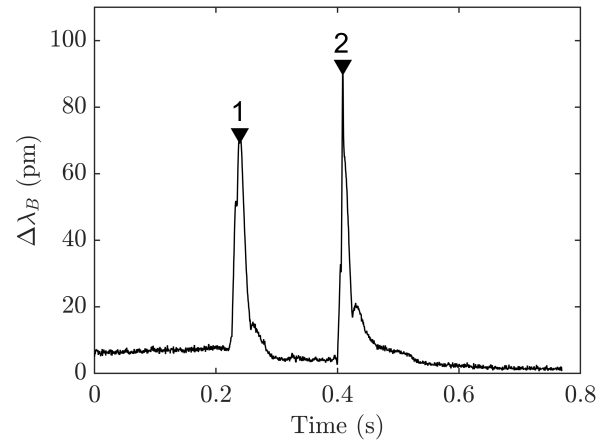


FIGURE 10. Sum signal corresponding to the car passage at 53.74 kph.

edge with a peak followed by a negative drop, caused by the elasticity of the PDMS material and asphalt at the moment of release of the axle load on the sensor branch. For this reason, only the positive parts of the response are taken into account in the signal processing.

Figure 10 shows the sum of the positive parts of the filtered signals from 5 sensors. The evaluation unit sampling frequency 1000 samples/s was selected as minimum sampling frequency that ensures reliable detection of individual axles at speeds in normal city traffic. This fact along with fast responses of the PDMS-FBG chain sensor allows us to differentiate the individual passing axles, please see Fig. 10. The above signal processing procedure has been applied to all data presented in this publication.

Figure 11 shows an example of a direct detection of 33 passing vehicles of various parameters. These vehicles' speed ranged from 32 to 87 kph with an overall response ranging from 33.36 to 339.55 pm.

Table 2 shows the responses of the PDMS-FBG sensors and the sum signal for 3 selected passes of the same car. The first passage was realized in the middle part of the lane (Fig. 12(a)). The design of the sensor branch allows these passages to be detected with all PDMS-FBG sensors. The second crossing was carried out in the middle of the road, and therefore the PDMS-FBG sensor close to the curb did not show any response (Fig. 12(b)). Similarly during the third passage, the sensor located closest to the center of the road did not detect the crossing of the car at the roadside (Fig. 12(c)).

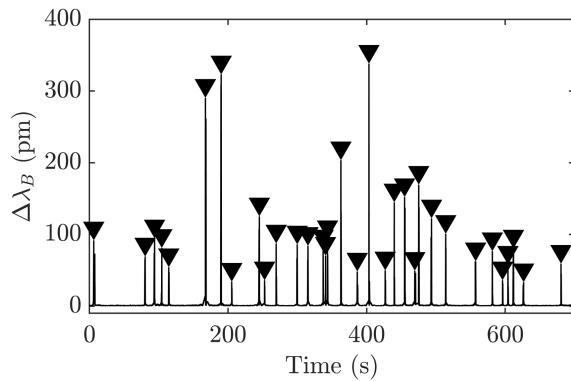


FIGURE 11. Example of detection of 33 cars with 100% accuracy.

TABLE 2. PMDS-FBG response to selected car passages.

Passage	FBG1 (pm)	FBG2 (pm)	FBG3 (pm)	FBG4 (pm)	FBG5 (pm)	Sum (pm)
1	18.2	130.1	4.5	123.2	13.8	289.8
2	-	16.5	78.3	25.1	236.9	356.8
3	2.1	85.3	33.8	6.2	-	231.4

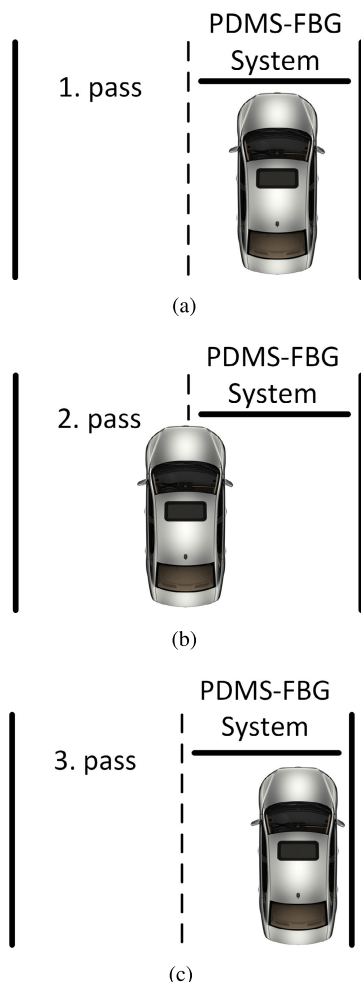


FIGURE 12. Display of selected car passages in various parts of the road (a) middle part of the lane; (b) middle of the road; (c) at the roadside.

The response of individual PDMS-FBG sensors to car crossings is illustrated in Figure 13. The blue bar represents

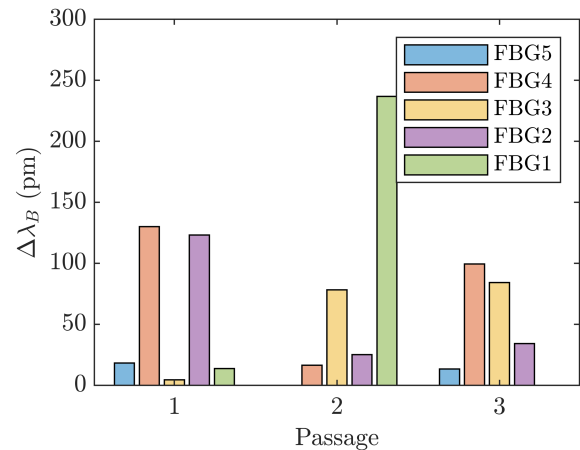


FIGURE 13. PDMS-FBG sensors responses on three crossings of the same car.

the response of the PDMS-FBG sensor located at the roadside, the green bar corresponds to the PDMS-FBG sensor located in the middle of the road.

IV. LONG-TERM MEASUREMENT AND EXPERIMENTAL VERIFICATION IN REAL OPERATION

This chapter describes and summarizes the results of the long-term traffic density and vehicle speed monitoring. The proposed measuring system using the PDMS-FBG chain sensor was tested in 18 all-day measurements taking place from January to November 2019 in city Ostrava (Part Vresina, GPS: 49°50'03.3"N 18°07'25.5"E). The measurements were carried out in various weather conditions (including adverse weather conditions such as rain, light snow or temperatures below freezing). These conditions had a negligible effect on the function (sensitivity) of the system and individual PDMS-FBG sensors. Nevertheless, the design of the measuring window of the sensors is designed in a way to encounter these affects by means of a so-called protection zone.

Along with the PDMS-FBG system measurement, the team also took a video recording of the individual car passages, which provided following information: time of the passes, direction, type of vehicles. The reference speed of the vehicles was obtained using optical gates, see subchapter 4.2 for more details. As part of a long-term measurement, 16 motorcycle and 27 cyclist passes were detected, and were removed from the dataset.

A. TRAFFIC DENSITY MONITORING

Figure 14 shows the results of the single-lane vehicle detection. The results display the traffic density for all 18 measuring days realized from January to November 2019.

During the measurement, a total of 3,978 vehicles (3,927 cars and 51 trucks) passed through the measuring area. The camera system captured all 3,978 vehicles while FBG measuring system was able to detect 3,963 vehicles. Summary of the detection accuracy is given in Table 3. The overall

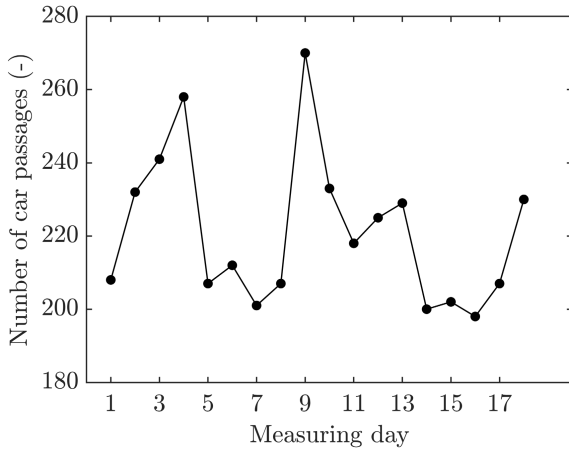


FIGURE 14. Results of traffic density monitoring.

TABLE 3. Statistical evaluation of traffic density monitoring.

	FBG system	Reference Camera system
N	3,978	3,978
TP	3,963	3,978
FP	6	0
FN	15	0
SE (%)	99.62	100
ACC (%)	99.47	100
PPV (%)	99.85	100
F1 (%)	99.74	100
FNR (%)	0.38	0

accuracy of vehicle detection using the proposed measuring system was 99.62%.

The measurements were analyzed and classified; the significant points were categorized as True Positive - TP, False Positive - FP or False Negative - FN [32]. Based on that, the detection quality of the proposed system can be evaluated using parameters such as Sensitivity (SE), Accuracy (ACC), Positive Predictive Value (PPV), Harmonic mean of precision and sensitivity (F1) and False Negative Rate (FNR) [33].

$$SE = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

$$ACC = \frac{TP}{TP + FP + FN}, \quad (4)$$

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (5)$$

$$F1 = 2 \frac{PPV \cdot Se}{PPV + Se} = 2 \frac{TP}{2TP + FP + FN}, \quad (6)$$

$$FNR = \frac{FN}{FN + TP}. \quad (7)$$

B. VEHICLE SPEED MEASUREMENTS

Speed measurement requires placing at least two PDMS-FBG chain sensors in a given distance. The chain sensors were built into the road at a distance of 2 m from each other. For the reference speed measurement, a pair of optical gates was

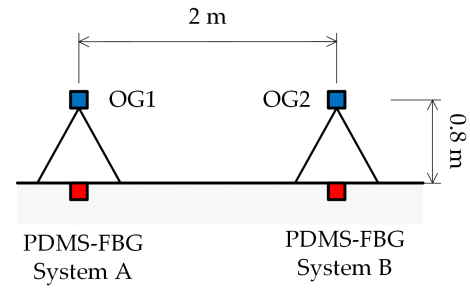


FIGURE 15. Basic layout diagram for measurement setup with PDMS-FBG chain sensors and optical gates for vehicle speed monitoring (PDMS-FBG chain systems are shown in red, optical gates (OG1 and OG2) in blue).

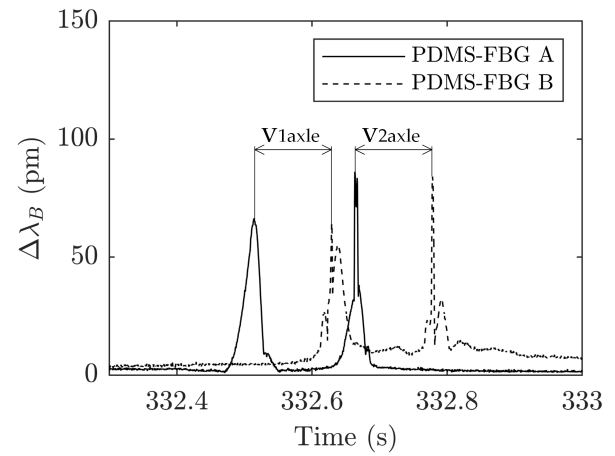


FIGURE 16. Example of vehicle speed measuring using two signals from PDMS-FBG A and PDMS-FBG B system corresponding to the passage of a car at a speed of 63.33 kph.

used. The gates were installed at the locations of individual chain sensors as displayed in Figure 15.

Figure 16 shows an example of vehicle speed measurement using signals from two PDMS-FBG chain systems corresponding to the vehicle passing at a speed of 63.33 kph. This reference was recorded using the optical gates. The speed can be calculated as $v = L / \Delta t$, where L is the distance between the individual chain sensors (2 m) and Δt is the time difference between the peaks corresponding to the passage of the first axle (respectively second axle) over PDMS-FBG A and PDMS-FBG B sensor system. The resulting speed for first and second axle is $v_{1axle} = 62.46$ kph and $v_{2axle} = 62.56$ kph, respectively. By averaging these two values, we obtain a more accurate estimate of the speed $v = 62.51$ kph. This way, we determined a speed measurement error of 0.82 kph with a relative error of 1.29% related to the actual speed of the passing car.

Figure 17(a) shows the real speeds of 3,963 vehicles obtained by the optical gates. The average speed of the passages was 50.93 kph, the lowest speed was 38.00 kph, and the maximum speed was 63.99 kph. The speed measurement error is shown in Fig. 17(b), and the relative error in Fig. 17(c).

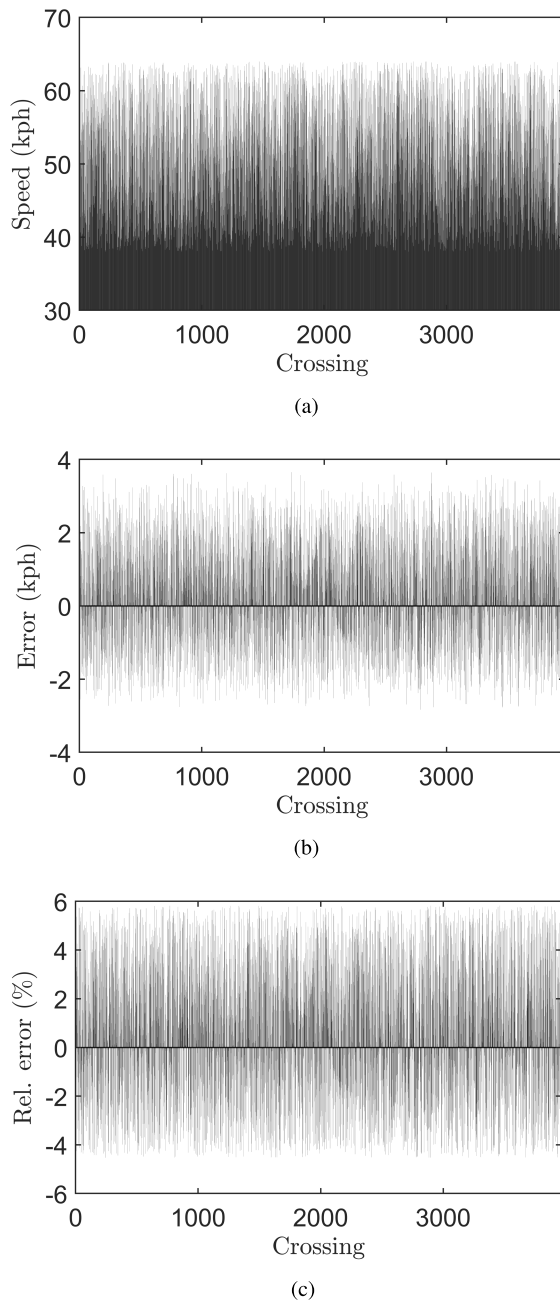


FIGURE 17. Example of speed measurement in 33 vehicles: (a) vehicle speed; (b) absolute error; (c) relative error (c).

TABLE 4. Statistical evaluation of long-term speed measurement.

	Speed (kph)	Absolute error (kph)	Relative error (%)
Min	38.00	-	-
Max	63.99	3.65	5.83
Mean	50.93	1.35	2.65

Table 4 summarizes the long-term speed measurement accuracy. Mean absolute error of the FBG speed measurement was 1.35 kph (mean relative error 2.65%). Maximum absolute error reached 3.65 kph, this worst case occurred at the vehicle speed of 63.28 kph).

V. CONCLUSION

The article presented the design, development and implementation of an optical fiber FBG system for monitoring selected traffic flow parameters in urban areas. The pilot study introduced herein included analysis of 3978 passing vehicles. The results revealed high accuracy of vehicle detection (99.62%) and speed measurements (mean absolute error 1.35 kph, mean relative error 2.65%). The advantages of the presented system include easy installation in the upper part of the road surface, possible connection to the existing dark (unused) fibers along city roads and implementation of remote evaluation within the SMART cities concept.

This pilot study presents the results a long-term research, in which 18 full-day measurements were performed from January to November 2019 in different weather conditions. Despite extensive research and development, there are still several issues and uncertainties that need to be addressed in follow-up research. This is primarily the effect of adverse weather conditions on the sensitivity and accuracy of the measurement and the overall life of the PDMS-FBG chain sensor in the roadway.

REFERENCES

- [1] X.-Y. Lu, P. Varaiya, R. Horowitz, Z. Guo, and J. Palen, "Estimating traffic speed with single inductive loop event data," *Transp. Res. Rec., J. Transp. Res. Board*, vol. 2308, no. 1, pp. 157–166, Jan. 2012.
- [2] T. Cherrett, H. Bell, and M. McDonald, "Estimating vehicle speed using single inductive loop detectors," *Transport*, vol. 147, no. 1, pp. 23–32, Feb. 2001.
- [3] V. Markevicius, D. Navikas, M. Zilyys, D. Andriukaitis, A. Valinevicius, and M. Cepenas, "Dynamic vehicle detection via the use of magnetic field sensors," *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 78, Jan. 2016.
- [4] P. Zheng and M. Mike, "An investigation on the manual traffic count accuracy," *Procedia Social Behav. Sci.*, vol. 43, pp. 226–231, 2012.
- [5] P. T. McGowen and M. Sanderson, "Accuracy of pneumatic road tube counters," in *Proc. Inst. Transp. Engineers*, 2011, pp. 1–17.
- [6] G. Guido, V. Gallelli, D. Rogano, and A. Vitale, "Evaluating the accuracy of vehicle tracking data obtained from unmanned aerial vehicles," *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 136–151, Oct. 2016.
- [7] D. Xu, S. Huang, Q. Lei, and X. Cheng, "Preparation, properties and application research of piezoelectric traffic sensors," *Procedia Eng.*, vol. 27, pp. 269–280, Oct. 2012.
- [8] S. Bhalla and S. K. Deb, "A cost-effective approach for traffic monitoring using PIEZO-transducers," *Experim. Techn.*, vol. 35, no. 5, pp. 30–34, Jul. 2010.
- [9] P. Heide, R. Schubert, V. Magori, and R. Schwarte, "A high performance multisensor system for precise vehicle ground speed measurement," *Microw. J.*, vol. 39, no. 7, pp. 22–29, 1996.
- [10] V. C. Nguyen, D. K. Dinh, V. A. Le, and V. D. Nguyen, "Length and speed detection using microwave motion sensor," in *Proc. Int. Conf. Adv. Technol. Commun. (ATC)*, Oct. 2014, pp. 371–376.
- [11] D. Zhang and J. He, "Super-resolution reconstruction of low-resolution vehicle plates: A comparative study and a new algorithm," in *Proc. 7th Int. Congr. Image Signal Process.*, Oct. 2014, pp. 359–364.
- [12] H. A. Rahim, U. U. Sheikh, R. B. Ahmad, A. S. M. Zain, and W. N. F. W. Ariffin, "Vehicle speed detection using frame differencing for smart surveillance system," in *Proc. 10th Int. Conf. Inf. Sci., Signal Process. their Appl. (ISSPA)*, May 2010, pp. 630–633.
- [13] C.-Y. Hsieh and Y.-S. Wang, "Traffic situation visualization based on video composition," *Comput. Graph.*, vol. 54, pp. 1–7, Feb. 2016.
- [14] H. Ai and Y. Zheng, "Characterization of a traffic management system using pyroelectric infrared sensors," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 319–333, Jan. 2015.
- [15] M. Rivas-Lopez, C. A. Gomez-Sanchez, J. Rivera-Castillo, O. Sergiyenko, W. Flores-Fuentes, J. C. Rodriguez-Quinonez, and P. Mayorga-Ortiz, "Vehicle detection using an infrared light emitter and a photodiode as visualization system," in *Proc. IEEE 24th Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)*, Jun. 2015, pp. 972–975.

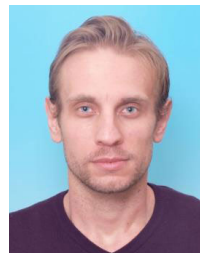
- [16] P. Suopajaervi, R. Pennala, M. Heikkinen, P. Karioja, V. Lyori, R. A. Myllylae, S. M. Nissilae, H. K. Kopola, and H. Suni, "Fiber optic sensors for traffic monitoring applications," in *Smart Structures and Materials 1998: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, S. C. Liu, Ed. Bellingham, WA, USA: SPIE, Jun. 1998.
- [17] D. Donlagic and M. Hanc, "Vehicle axle detector for roadways based on fiber optic interferometer," in *Proc. Smart Struct. Mater.*, Jul. 2003, pp. 317–321.
- [18] D. Donlagic and M. Hanc, "A simple fiber-optic vehicle axle detector for roadways," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 52, no. 2, pp. 401–405, Mar. 2003.
- [19] M. Kunzler, R. Edgar, E. Udd, T. Taylor, W. L. Schulz, W. Kunzler, and S. M. Soltesz, "Fiber grating traffic monitoring systems," in *Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, vol. 4696, S.-C. Liu and D. J. Pines, Eds. Bellingham, WA, USA: SPIE, Jun. 2002, pp. 238–243.
- [20] M. Fridrich, M. Fajkus, P. Mec, J. Nedoma, M. Kostelansky, and E. Bednar, "Portable optical fiber Bragg grating sensor for monitoring traffic density," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 22, p. 4796, Nov. 2019.
- [21] K. Wang, Z. Wei, B. Chen, and H.-L. Cui, "A fiber-optic weigh-in-motion sensor using fiber Bragg gratings," *Proc. SPIE Fiber Optic Sensor Technol. Appl.*, vol. 6004, Nov. 2005, Art. no. 60040S.
- [22] H. Zhang, Z. Wei, L. Fan, S. Yang, P. Wang, and H.-L. Cui, "A high speed, portable, multi-function, weigh-in-motion (WIM) sensing system and a high performance optical fiber Bragg grating (FBG) demodulator," *Proc. SPIE Sensors Smart Struct. Technol. Civil, Mech., Aerosp. Syst.*, vol. 7647, Mar. 2010, Art. no. 76473D.
- [23] D. Hill, "Distributed acoustic sensing (DAS): Theory and applications," in *Frontiers Optics*. New York, NY, USA: OSA, 2015.
- [24] G. L. Duckworth, "Distributed sensing applications of Rayleigh scattering in fiber optic cables," in *Imaging and Applied Optics*. New York, NY, USA: OSA, 2013.
- [25] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Lightw. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997.
- [26] A. Othonos, "Fiber Bragg gratings," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341, Dec. 1997.
- [27] M. Novak, J. Nedoma, M. Fajkus, J. Jargus, and V. Vasinek, "Analysis of optical properties of special fibers of polydimethylsiloxane (PDMS) depending on the different methods of mixing PDMS and curing agent," *Proc. SPIE Micro-structured Specialty Opt. Fibres*, vol. 10232, May 2017, Art. no. 102320O.
- [28] J. Nedoma, M. Fajkus, P. Siska, R. Martinek, and V. Vasinek, "Non-invasive fiber optic probe encapsulated into PolyDiMethylSiloxane for measuring respiratory and heart rate of the human body," *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, no. 1, p. 151, Mar. 2017.
- [29] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, V. Vasinek, H. Nazeran, and P. Siska, "A non-invasive multichannel hybrid fiber-optic sensor system for vital sign monitoring," *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 111, Jan. 2017.
- [30] J. Nedoma, M. Fajkus, L. Bednarek, J. Frnda, J. Zavadil, and V. Vasinek, "Encapsulation of FBG sensor into the PDMS and its effect on spectral and temperature characteristics," *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 460–466, Nov. 2016.
- [31] M. Fajkus, J. Nedoma, S. Kepak, L. Rapant, R. Martinek, L. Bednarek, M. Novak, and V. Vasinek, "Mathematical model of optimized design of multi-point sensoric measurement with Bragg gratings using wavelength division multiplex," *Proc. SPIE* vol. 9889, Apr. 2016, Art. no. 98892F.
- [32] A. Unler and A. Murat, "A discrete particle swarm optimization method for feature selection in binary classification problems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 206, no. 3, pp. 528–539, Nov. 2010.
- [33] R. Trevethan, "Sensitivity, specificity, and predictive values: Foundations, plabilities, and pitfalls in research and practice," *Frontiers Public Health*, vol. 5, p. 307, Nov. 2017.



MARCEL FAJKUS was born in the Czech Republic in 1987. He currently works as an Assistant Professor with the VSB-TUO Technical University of Ostrava, since 2016. His current research interests include fiber Bragg sensors and distributed systems in traffic, civil engineering, and biomedical applications.



MICHAEL FRIDRICH was born in Trutnov, Czech Republic, in 1995. He received the bachelor's and master's degrees in information and communication technology from the VSB-Technical University of Ostrava, in 2017 and 2019, respectively, where he is currently pursuing the Ph.D. degree. During his doctoral studies, he focuses on fiber Bragg sensors and distributed systems in transportation, construction, and biomedical applications.



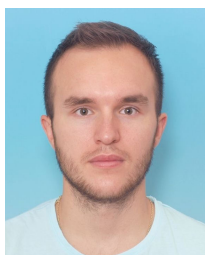
JAN NEDOMA was born in 1988 in the Czech Republic. He received the master's degree in information and communication technology from the VSB-Technical University of Ostrava, in 2014. Since 2014, he has been a Research Fellow with the VSB-Technical University of Ostrava. In 2017, he successfully defended his dissertation thesis and works as an Assistant Professor with the VSB Technical University of Ostrava. His current research interests include fiber-optic sensors in traffic, civil engineering, and biomedical applications. He has more than 135 journal and conference articles (author h-index: 9 without self-citations) in his research areas and eight valid patents.



RADANA KAHANKOVA was born in Opava, Czech Republic, in 1991. She received the master's and Ph.D. degree from the Department of Cybernetics and Biomedical Engineering, VSB-Technical University of Ostrava, in 2016 and 2019, respectively. Her current research interests include improving the quality of electronic fetal monitoring and magnetic resonance imaging.



RADEK MARTINEK (Member, IEEE) was born in Czech Republic, in 1984. He received the master's degree in information and communication technology from the VSB-Technical University of Ostrava, in 2009. Since 2012, he has been a Research Fellow with the VSB-Technical University of Ostrava. In 2014, he successfully defended his dissertation thesis titled *The Use of Complex Adaptive Methods of Signal Processing for Refining the Diagnostic Quality of the Abdominal Fetal Electrocardiogram*. He has become an Associate Professor of technical cybernetics, in 2017 after defending the habilitation thesis titled *Design and Optimization of Adaptive Systems for Applications of Technical Cybernetics and Biomedical Engineering Based on Virtual Instrumentation*. He has been as an Associate Professor with the VSB-Technical University of Ostrava, since 2017. His current research interests include digital signal processing (linear and adaptive filtering, soft computing-artificial intelligence and adaptive fuzzy systems, non-adaptive methods, biological signal processing, digital processing of speech signals), wireless communications (software-defined radio), and power quality improvement. He has more than 200 journal and conference articles in his research areas.



EMIL BEDNAR was born in Ilava, Slovakia, in 1995. He received the bachelor's and master's degrees in information technologies from the Department of Information and Communications Technologies, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VSB–Technical University of Ostrava, in 2017 and 2019, respectively, where he is currently pursuing the Ph.D. degree. His current research interest includes fiber-optic sensors predominantly in traffic and civil engineering.



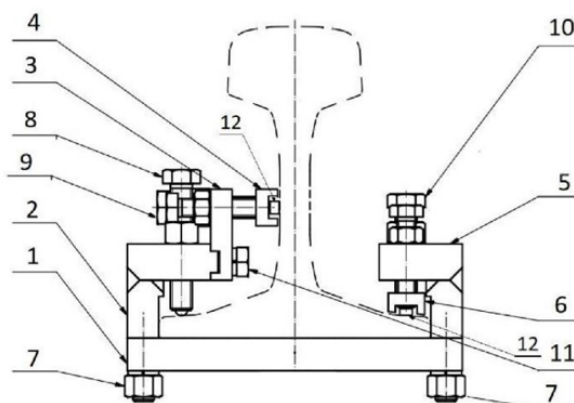
JAKUB KOLARIK was born in Ostrava, Czech Republic, in 1992. He received the bachelor's degree from the Department of Cybernetics and Biomedical Engineering, VŠB–Technical University of Ostrava, in 2014, and the master's degree in control and information systems from the Department of Cybernetics and Biomedical Engineering. He is currently pursuing the Ph.D. degree in technical cybernetics.

...

6.3 Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě

Nejvýznamnější výsledky

Tento patent představuje inovativní systém pro rozpoznání a klasifikaci plochých kol v kolejové dopravě, který využívá pokročilé optovláknové mřížkové senzory. Výsledky ukazují, že systém dokáže spolehlivě monitorovat průjezdy kolejových vozidel, počítání náprav a detekovat plochá kola v reálném čase, čímž přispívá k prevenci nehod a k ochraně kolejových vozidel před poškozením způsobeným opotřebením kol.



Obrázek 6.3: Grafický abstrakt patentu Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě.

Hlavní přínosy a závěry

Hlavním přínosem tohoto patentu je vývoj systému, který kombinuje vysokou citlivost optovláknových senzorů s pokročilými algoritmy pro analýzu signálu, což umožňuje přesné rozpoznání a klasifikaci plochých kol. Tento systém přináší významné zlepšení v oblasti údržby kolejových vozidel na základě rychlé identifikaci vadných kol, což snižuje náklady na opravy a zvyšuje bezpečnost železničního a tramvajového provozu. Závěry potvrzují, že tento patentovaný systém má potenciál stát se klíčovým nástrojem pro železniční společnosti, což potvrzuje prodej licence v hodnotě 423 500,- Kč s DPH.

Další směřování výzkumu

Navazující výzkum by se měl zaměřit na další vylepšení detekčních algoritmů, zejména na zvýšení přesnosti a rychlosti klasifikace plochých kol v různých provozních podmínkách. Dále je třeba se zaměřit na integraci tohoto systému s dalšími monitorovacími a diagnostickými systémy používanými provozovateli kolejové dpravy.

B61K 9/12 (2006.01)
B61L 1/06 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

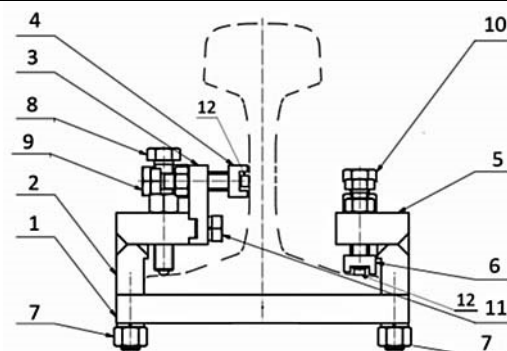
(21) Číslo přihlášky: 2020-669
(22) Přihlášeno: 11.12.2020
(40) Zveřejněno: 15.06.2022
(Věstník č. 24/2022)
(47) Uděleno: 27.04.2022
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: 15.06.2022
(Věstník č. 24/2022)

(56) Relevantní dokumenty:
CZ 2018105 A3; WO 2016115443 A1; WO 2016027072 A1.

(73) Majitel patentu:
Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava,
Ostrava, Poruba, CZ
(72) Původce:
Ing. Marcel Fajkus, Ph.D., Ostrava, Hrabůvka, CZ
Ing. Jan Nedoma, Ph.D., Kostelec na Hané, CZ
Ing. Pavol Partila, Ph.D., Ostrava, Poruba, CZ
Ing. Jaromír Továrek, Ph.D., Konice, CZ
doc. Ing. Radek Martinek, Ph.D., Nedvědice, CZ

(54) Název vynálezu:
**Systém pro rozpoznání a klasifikace
plochých kol v kolejové dopravě**

(57) Anotace:
Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě, jehož součástí je Braggovská mřížka (14) a optické vlákno (13), je tvořen dvěma částmi mechanickou a optoelektronickou. Mechanická část sestává z rozebíratelného držáku pro neinvazivní upevnění ke kolejnici a optoelektronická představuje dva mřížkové senzory (12), které jsou uchyceny v držáku. Držák mřížkových senzorů (12) je tvořen podstavcem (1) s otvory, který je rozebíratelně propojen s boční levou částí (2) s nástavcem (3) se stojnovým držákem (4) pro první senzor (12) a boční pravou částí (5) s patovým držákem (6) pro druhý senzor (12) prostřednictvím čtyř spojovacích šroubů (7) umístěných na levé i pravé straně, přičemž propojení je realizováno z dolní strany podstavce (1). Systém nenarušuje kolejnici a je tak vhodný pro užití v železniční i tramvajové dopravě.



Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě

Oblast techniky

Vynález spadá do oblasti dopravy, je využitelný pro monitorování vybraných parametrů provozu kolejových vozidel, a to zejména tramvají, zejména pak pro rozpoznání a klasifikaci plochých kol v kolejové dopravě.

Dosavadní stav techniky

Velký problém v kolejové dopravě představuje výskyt tzv. „plochých kol“ u kolejových vozidel, která vznikají zejména při zablokování kol, např. u tramvajové soupravy při prudkém brždění a současném dopředném pohybu soupravy. Tímto dochází ke „sklouznutí“ soupravy po koleji a vlivem tření ke zbrošení profilu kola na kterém tak vzniká ploška. Takto vzniklá asymetrie ve tvaru kola je pak zdrojem velké úrovně zrychlení vertikálních vibrací a samozřejmě i hluku, což má za následek celou řadu vzniku dalších negativ.

Takto vzniklé vibrace výrazně ovlivňují kolejový svršek a přímé okolí kolejové trati. Vlivem působení nadměrných vibrací z provozu vozidla s plochým kolem tak dochází k rychlejší degradaci provozního stavu kolejového svršku a tím i k nárůstu nákladů na jeho údržbu. Rovněž není možné opomenout šíření těchto vibrací a vliv na okolní zástavbu a její obyvatele. A proto je velmi důležité výskyt těchto tzv. „plochých kol“, monitorovat.

Monitorováním tzv. „plochých kol“ se zabývá, např. článek autorů: Buggy, S.J., James, S.W., Staines, S., Carroll, R., Kitson, P.V., Farrington, D., Drewett, L., Jaiswal, J., Tatam, R.P. "Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors" (2016) Measurement Science and Technology, 27 (5), art. no. 055201, DOI: 10.1088/0957-0233/27/5/055201, kdy je pro monitorování použito pole Braggovských mřížek, které monitorují mechanické napětí v kolejnicích. Tyto mřížky jsou lepeny přímo na kolejnici. Nevýhodou tohoto řešení je nestandardizovaný způsob uchycení – není definováno množství lepidla ani jeho druh a dále to, že senzor není nijak chráněn, tedy se pravděpodobně jedná o jednorázové použití.

Další článek z této oblasti pak představuje práce Iele, Antonio & Lopez, Valerio & Laudati, Armando & Mazzino, Nadia & Bocchetti, Giovanni & Cusano, Andrea & Cutolo, Antonello. (2016). "Fiber Optic Sensing System for Weighing In Motion (WIM) and Wheel Flat Detection (WFD) in railways assets: the TWBCS system". Conference: 8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016) At: Bilbao (Spain), který se zabývá vážením kolejových vozidel a zároveň detekcí plochých kol, přičemž pro tyto údaje využívá deset mřížkových senzorů, které jsou uloženy v kovovém pouzdře. Vzhledem k tomu, že hlavní funkcí předloženého zařízení je vážení, z těchto důvodů je zde velké množství senzorů.

Stejným tématem se zabývá i článek autorů: Madejski J. "Automatic detection of flats on the rolling stock wheels" (2006), Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 16, pp. 160-163, který na kolejnici uchycuje akcelerometry a při průjezdu tramvaje zaznamenává akustickou odezvu prostřednictvím mikrofónů. Analýza pak využívá zvukových projevů plochého kola při průjezdu vozidla. Nevýhodou je nižší přesnost při pomalejším průjezdu vozidla.

Článek od autorů: Nowakowski, T., Komorski, P., Szymański, G.M., Tomaszewski, F. "Wheel-flat detection on trams using envelope analysis with Hilbert transform" (2019) Latin American Journal of Solids and Structures, 16 (1), art. no. e148, DOI: 10.1590/1679-78255010, pak využívá konvenčních vibračních senzorů, které jsou uchyceny na kolejnici. Tyto senzory detekují

amplitudy signálu při průjezdu tramvajového vozidla. Nevýhodou je pak nutnost zpracování získaných informací prostřednictvím specializovaného softwaru.

A konečně článek autorů: Filograno, M.L., Corredera, P., Rodríguez-Plaza, M., Andrés-Alguacil, A., González-Herráez, M. "*Wheel flat detection in high-speed railway systems using fiber bragg gratings*" (2013) IEEE Sensors Journal, 13 (12), art. no. 6563101, pp. 4808-4816. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2274008, kde je popisováno lepení mřížkových senzorů na stojnu kolejnice za účelem snímání deformační odezvy průjezdu kolejového vozidla. Stejně jako u prvního článku je toto řešení nevýhodné z důvodu uchycení a jednorázového použití senzorů.

Z patentové literatury je pak možné zmínit dokument evidovaný jako CN 101797928 B, o názvu "*Rail transportation axle-counting device for packaging FBG based on semi-freedom*", který využívá technologie FBG senzor v podobě tenzometru a dále laser jako světelný zdroj, optický cirkulátor a fotodetektor k počítání náprav kolejových vozidel. Senzor je alespoň částečně krytován a je upevněn na kabelovém svazku u paty kolejnice. Pomocí měření intenzity odraženého světla je pak možné získat informace o nápravách (např. zatížení kol apod.).

Podstata vynálezu

Výše uvedené nevýhody odstraňuje zařízení, které představuje systém, který je určen pro rozpoznání a klasifikaci plochých kol zejména v kolejové dopravě, která využívá tzv. širokopatných kolejnic – tedy hlavně pro železnici a tramvajovou dopravu.

Zařízení je tvořeno dvěma částmi – mechanické a optoelektronické. Mechanická část sestává z neinvazivního prvku představujícího držák, který slouží pro uchycení elektronické části na kolejnici.

Tento držák je tvořen několika částmi, které jsou vzájemně propojeny šrouby. Prvním dílem je podstavec, který je prostřednictvím celkem osmi spojovacích šroubů spojen s boční levou částí a boční pravou částí tak, že každá z těchto částí je s podstavcem spojena čtyřmi spojovacími šrouby. Propojení je realizováno zespod. K boční levé části, je pak rozebíratelně připojen, prostřednictvím pěti malých spojovacích šroubů, nástavec se stojnovým držákem pro elektronickou část – tedy pro první mřížkový snímač. Levá část je rovněž vybavena třemi levými šrouby pro nastavení citlivosti a prostřednictvím stojnového držáku prvního snímače na stojně kolejnice. Dále se na této straně nachází čtyři aretační šrouby, které zajišťují fixaci držáku na kolejnici bez jejího poškození – tedy neinvazivně. Stejný počet těchto aretačních šroubů se nachází i na pravé straně. Boční pravá část je vybavena patovým držákem pro upevnění druhého mřížkového snímače tentokrát k patě kolejnice přičemž fixaci zajišťují výše zmíněné čtyři aretační šrouby. Nastavení citlivosti zajišťují tři pravé šrouby pro nastavení citlivosti.

Optoelektronickou část, pak představují dva mřížkové senzory, z nichž první je uchycen prostřednictvím nástavce ke stojně kolejnice a druhý, rovněž v nástavci k patě kolejnice. Každý z těchto senzorů představuje Braggovská mřížka, která je napojená na jeden konec optického vlákna a je zapouzdřena prostřednictvím 3D tisku (běžné plastové filamenty, např. typu – PLA, PET-G, FLEX, NGEN, HIPS, PP, NYLON, PC-ABS, ASA apod.), přičemž volný konec optického vlákna je chráněn sekundární ochrannou trubičkou a vnitřním vyztužením a je zakončeno standardním konektorem FC/APC, FC znamená - "*fiber-optic connector*" a APC – "*Angled Physical contact*".

Zařízení pak snímá vratné mikro-deformace kolejnice vlivem průjezdu nápravy kolejového vozidla v místě měření (uchycení senzoru). Tyto mikro-deformace ovlivňují geometrické a optické vlastnosti mřížkové struktury optovláknového mřížkového senzoru, které jsou dále vyhodnocovány. Vyhodnocování probíhá prostřednictvím vyhodnocovací jednotky s algoritmem, pro zpracování původního signálu (rozpoznání a klasifikace plochých kol tramvajových souprav).

Mezi výhody tohoto řešení patří elektrická pasivita v místě měření a rovněž elektromagnetická imunita mřížkového snímače, přičemž obě tyto vlastnosti zajišťuje zapouzdření senzoru prostřednictvím 3D tisku. Zařízení je ke kolejnici upevněno nedestruktivním způsobem a poškozený senzor lze velmi rychle nahradit. Dále je výhodou měření na dvou místech kolejnice – stojna a pata, což zaručuje dostatečnou detekci deformačních projevů způsobených průjezdem kolejového vozidla. Instalace zařízení je rovněž velmi jednoduchá a jeho provoz odpovídá bezpečnostním předpisům SIL (SŽDC). Velkou výhodou je, že je zařízení použitelné v železniční i tramvajové dopravě pro celou řadu kolejnic, které spadají pod označení širokopatní (např., UIC60, R65 apod.) nebo žlábkové (např. NT, NT1, NT3 apod.).

Objasnění výkresů

Obr. 1 představuje příslušné zařízení složené z držáku a dvou mřížkových snímačů (pohled v řezu). Obr. 2 zde se nachází schéma mřížkového snímače - pohled shora. Obr. 3 grafické znázornění průřezu kolejových vozidel - jeden vůz a dva vozy. Obr. 4 pak představuje konkrétní ukázkou grafické detekce kolejového vozidla s defektem na prvním kole na první nápravě při odstranění vyšších frekvencí (náprava) a odfiltrování nižších frekvencí pro zobrazení účinku plochého kola.

Příklady uskutečnění vynálezu

Příklad 1

Zařízení bylo testováno na širokopatní kolejnici blízké typu R65 (výška 180 mm a šířka paty 150 mm) v dopravním podniku Ostrava, přičemž Ostravská tramvajová síť má profily takřka shodné se železničními.

Prvním dílem držáku je podstavec 1, který je prostřednictvím celkem osmi spojovacích šroubů 7 spojen s boční levou částí 2 a boční pravou částí 5 tak, že každá z těchto částí 2, 5 je s podstavcem 1 spojena čtyřmi spojovacími šrouby 7. Propojení je realizováno zespod podstavce 1. K boční levé části 2, je pak rozebíratelně připojen, prostřednictvím pěti malých spojovacích šroubů 11, nástavec 3 se stojnovým držákem 4 pro elektronickou část – tedy pro první mřížkový snímač 12. Boční levá část 2 je rovněž propojena třemi levými šrouby 9 pro nastavení citlivosti se stojnovým držákem 4 prvního snímače 12 na stojně kolejnice. Stojnový držák 4 je s boční levou částí 2 propojen prostřednictvím čtyř aretačních šroubů 8, které zajišťují fixaci stojnového držáku 4 ke stojně kolejnice bez jejího poškození – tedy neinvazivně. Stejný počet těchto aretačních šroubů 8 se nachází i na boční pravé části 5. Boční pravá část 5 je vybavena patovým držákem 6 pro upevnění druhého mřížkového snímače 12 tentokrát k patě kolejnice. Spojení a fixaci patového nástavce 6 a boční pravé části 5 zajišťují čtyři výše zmíněné aretační šrouby 8, citlivost je nastavena prostřednictvím tří pravých šroubů 10 pro nastavení citlivosti. V případě tohoto typu kolejnice má délka držáku 250 mm, je široký 185 mm a jeho výška je 172 mm.

Každý mřížkový snímač 12 je tvořen jednovidovým optickým vláknem 13 (standard G.657.D), které je vybaveno primární akrylátovou ochranou s vnějším průměrem 250 µm s Braggovskou mřížkou 14 se základními parametry, kdy: Braggovská vlnová délka je v rozsahu 1510 až 1590 nm, šířka spektra odpovídá rozsahu 100 až 300 pm, odrazivost 50 až 99 %, délka struktury Braggovské mřížky 14 je 1 až 3 mm.

Optické vlákno 13 s Braggovskou mřížkou 14 je zapouzdřeno technologií 3D tisku polymerem ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). Zapouzdření je realizováno šesti vrstvami filamentu ABS, kdy výška jedné vrstvy je 0,3 mm, optické vlákno 13 s Braggovskou mřížkou 14 je vycentrováno mezi 2 a 3 vrstvou filamentu.

Samotné rozměry mřížkového snímače 12 jsou délka 250 mm, šířka 20 mm, výška 3 mm. Volný konec optického vlákna 13, který vede z mřížkového snímače 12 je chráněn sekundární ochrannou trubičkou s vnějším průměrem 3 mm a vnitřním kevlarovým vyztužením a je napojeno, prostřednictvím optického konektoru 15 typu FC/APC na přívodní vlákno zakončené optickým konektorem 15 typu FC/APC se šikmou ferulí. V tomto případě má každé přívodní vlákno délku 10 m, jak je uvedeno i níže.

Pro měření na kolejové trati DP Ostrava jsou ke kolejnici upevněny dva držáky mřížkových snímačů 12 (na obě strany kolejnice), každý z nich obsahuje dva mřížkové snímače 12 (umístěné na patě a stojně kolejnice), tedy dohromady 4 mřížkové snímače 12. Oba držáky mřížkových snímačů 12 jsou umístěny a uchyceny k patě kolejnice prostřednictvím celkem osmi aretačních šroubů 8. Mřížkové snímače 12 jsou upevněny ke kolejnici stojnovými držáky 4 a patovými držáky 6 a z hlediska citlivosti nastaveny šesti nastavovacími šrouby 9, 10.

Ke každému držáku mřížkových snímačů 12 vedou dvě přívodní vlákna standardu G.652 s optickými konektory 15 typu FC/APC o délce 10 m. Pro optické napájení a převod světla na měřitelný elektrický proud jsou tato vlákna připojena ke konvenční optoelektronické jednotce s nastaveným výstupním výkonem 1 mW a vzorkovací frekvencí 1 kHz, která je dále připojena k výpočetní jednotce s vyvinutým detekčním algoritmem, která pracuje v real-time módu. Algoritmus neustále provádí detekci průjezdu, kolejového vozidla, tedy v tomto případě tramvaje a v případě, že je průjezd vozidla detekován dochází k okamžitému vyhodnocení dat.

Měření bylo provedeno za venkovní teploty 18 až 23 °C po dobu 117 minut, kdy byl proveden slepý test (záměrně zařazeno vozidlo s defektem na jednom kole), měřeno bylo celkem 26 tramvajových souprav (jedno-vozové a dvou-vozové) s úspěšností detekce jednotlivých náprav, respektive kol 100 %, jak je seznatelné z obrázku 3. Tramvaj s defektní nápravou byla zaznamenána a systém 100 % rozeznal defekt na první kole první nápravy této tramvaje, jak je znázorněno na obr. 4 z celkem 26 tramvajových souprav.

Příklad 2

Příklad 2 se od příkladu 1 odlišuje tím, že držák je umístěn na kolejnici S49 (výška 149 mm, šířka paty 125 mm). Této velikosti odpovídá i držák mřížkových snímačů 12, který má nyní rozměry délka 250 mm, výška 141 mm a šířka 160 mm. Optické vlákno 13 s Braggovskou mřížkou 14 je zapouzdřeno technologií 3D tisku v tomto případě filamentem typu PLA.

Příklad 3

Příklad 3 se od předchozích příkladů odlišuje použitým typem kolejnice, který byl UIC 60 (výška 172 mm, šířka paty 150 mm). Této velikosti odpovídá i držák mřížkových snímačů 12, který má rozměry délka 250 mm, výška 164 mm a šířka 185 mm. Ke každému držáku mřížkových snímačů 12 vedou dvě přívodní vlákna standardu G.652 s optickými konektory 15 typu FC/APC o délce 1 m. Optické vlákno 13 s Braggovskou mřížkou 14 je zapouzdřeno technologií 3D tisku v tomto případě filamentem typu FLEX.

Příklad 4

Příklad 4 se od předchozích příkladů odlišuje použitým typem kolejnice, kterým je typ T (výška 150 mm a šířka paty kolejnice 128 mm). Této velikosti je přizpůsoben i držák mřížkových snímačů 12, který má délku 250 mm, šířku 163 mm a výšku 142 mm. Optické vlákno 13 s Braggovskou mřížkou 14 je zapouzdřeno technologií 3D tisku v tomto případě filamentem typu PC-ABS.

Příklad 5

- Příklad 5 se od předchozích příkladů odlišuje použitým typem kolejnice, kterým je typ 46E1 (výška 145 mm a šířka paty kolejnice 120 mm). Této velikosti je přizpůsoben i držák mřížkových snímačů 12, který má délku 250 mm, šířku 160 mm a výšku 137 mm. Optické vlákno 13 s Braggovskou mřížkou 14 je zapouzďeno technologií 3D tisku v tomto případě filamentem typu HIPS.

Příklad 6

- Příklad 6 se od příkladu 1 odlišuje tím, že je zařízení použito na tzv. žlábkové kolejnici (výška 180 mm, šířka paty kolejnice 150 mm). Této velikosti odpovídá i držák mřížkových snímačů 12, který má rozměry: délka 250 mm, výška 172 mm a šířka 185 mm. Ke každému držáku mřížkových snímačů 12 vedou dvě přívodní vlákna standardu G.652 s optickými konektory 15 typu FC/APC o délce 500 m. Optické vlákno 13 s Braggovskou mřížkou 14 je zapouzďeno technologií 3D tisku v tomto případě filamentem typu NGEN.

Průmyslová využitelnost

- Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě lze použít pro detekování plochých kol u železniční a tramvajové dopravy pro osobní i nákladní vozy. Řešení lze také využít pro kalkulaci náprav tramvajových vozidel.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě, jehož součástí je Braggovská mřížka (14) a optické vlákno (13), **vyznačující se tím**, že je tvořen dvěma částmi, mechanickou a optoelektronickou, přičemž mechanická část sestává z rozebíratelného držáku pro neinvazivní upevnění ke kolejnici a optoelektronická představuje dva mřížkové senzory (12), které jsou uchyceny v držáku tvořeným podstavcem (1) s otvory, který je rozebíratelně propojen s boční levou částí (2) s nástavcem (3) se stojnovým držákem (4) pro první senzor (12) a boční pravou částí (5) s patovým držákem (6) pro druhý senzor (12) prostřednictvím čtyř spojovacích šroubů (7) umístěných na levé i pravé straně, přičemž propojení je realizováno z dolní strany podstavce (1).

2. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že propojení boční levé části (2) a nástavce (3) je realizováno pěti malými spojovacími šrouby (11).

3. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že propojení nástavce (3) a stojnového držáku (4) pro první mřížkový senzor (12) je realizováno prostřednictvím tří levých šroubů (9) pro nastavení citlivosti, přičemž fixaci stojnového držáku (4) zajišťují čtyři aretační šrouby (8).

4. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že propojení boční pravé části (5) a patového držáku (6) pro druhý mřížkový senzor (12) je realizováno prostřednictvím tří pravých šroubů (10) pro nastavení citlivosti, přičemž fixaci patového držáku (6) zajišťují čtyři aretační šrouby (8).

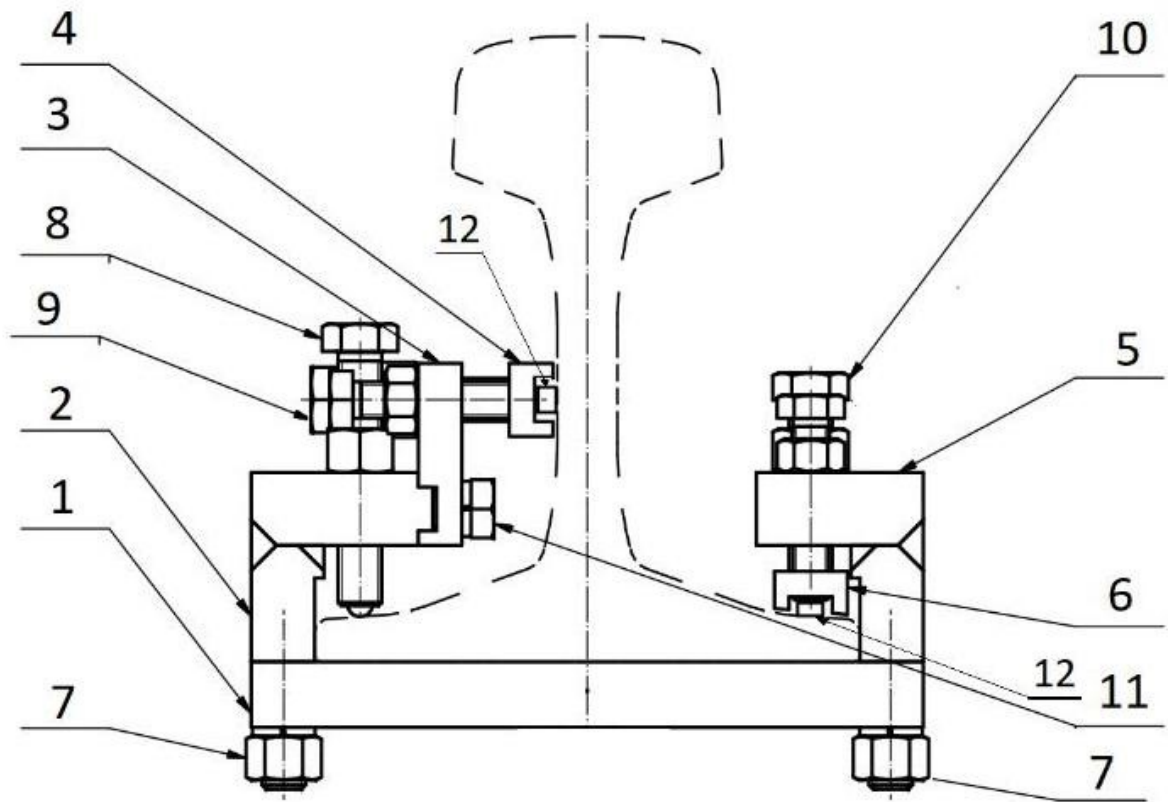
5. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že optoelektronická část je tvořena dvěma mřížkovými senzory (12), kdy v každém mřížkovém senzoru (12) je zapouzdřena Braggovská mřížka (14) napojená na optické vlákno (13), jehož nezapouzdřený konec je zakončen optickým konektorem (15) typu FC/APC pro napojení k přívodnímu vláknu.

6. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol podle nároků 1 a 5, **vyznačující se tím**, že Braggovská mřížka (14) napojená na optické vlákno (13) je zapouzdřena prostřednictvím technologie 3D tisku.

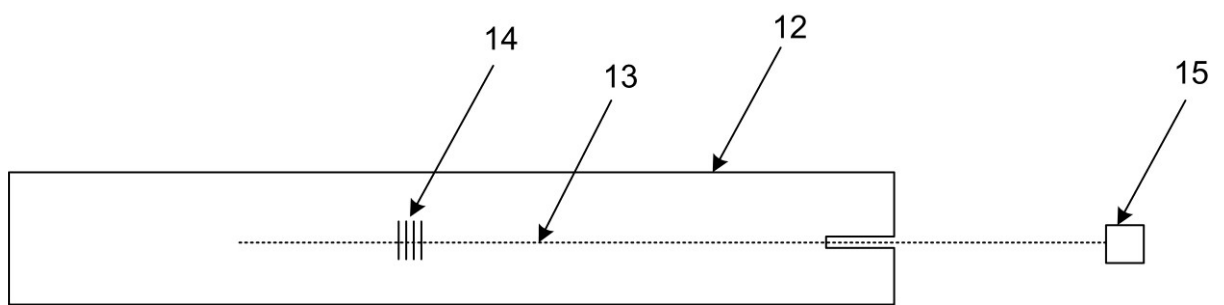
7. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol podle nároků 1 a 5, **vyznačující se tím**, že nezapouzdřený konec optického vlákna (13) prochází sekundární ochrannou trubičkou s vnitřním kevlarovým vyztužením.

8. Systém pro rozpoznání a klasifikace plochých kol podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že držák svým tvarem odpovídá kolejnicím typu širokopatní nebo žlábková.

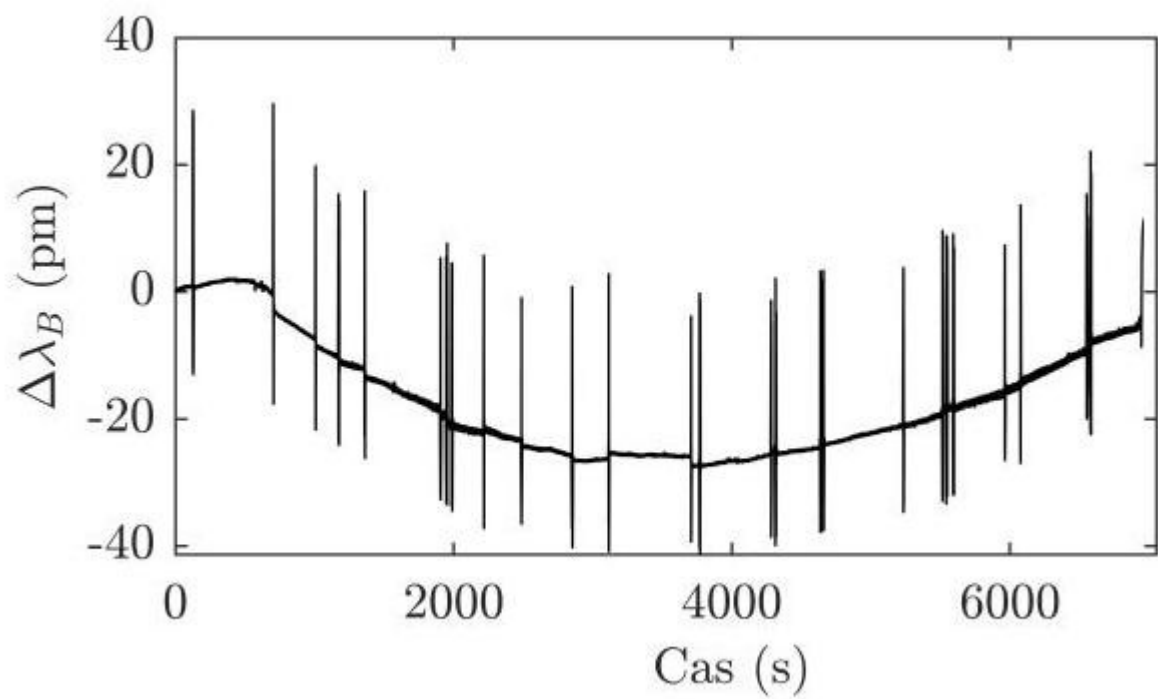
2 výkresy



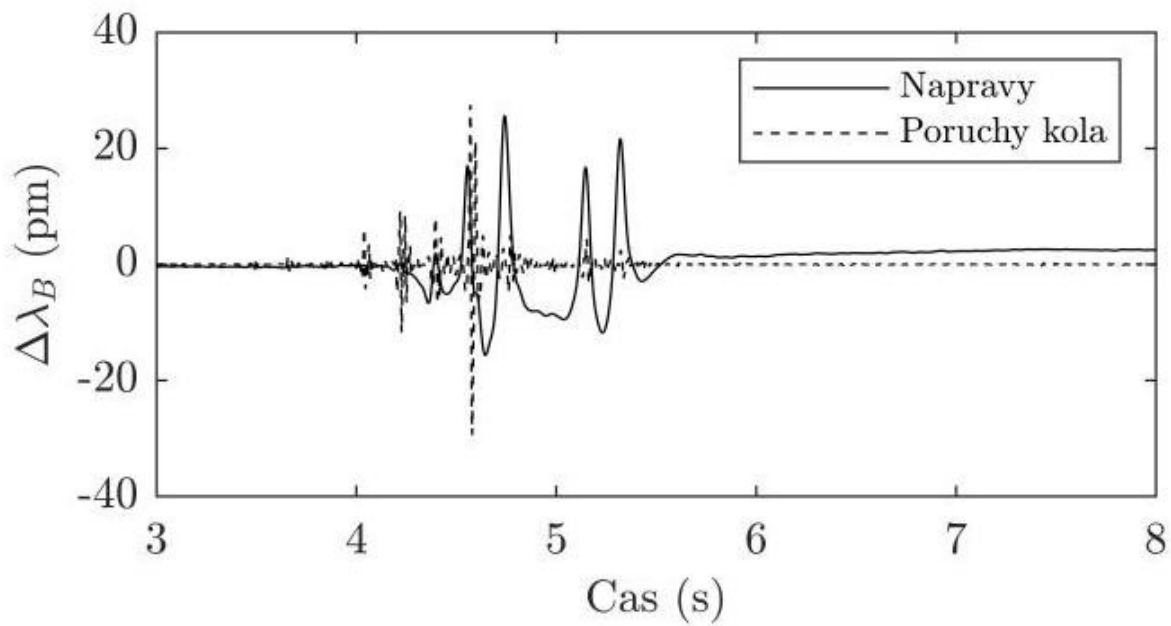
Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3

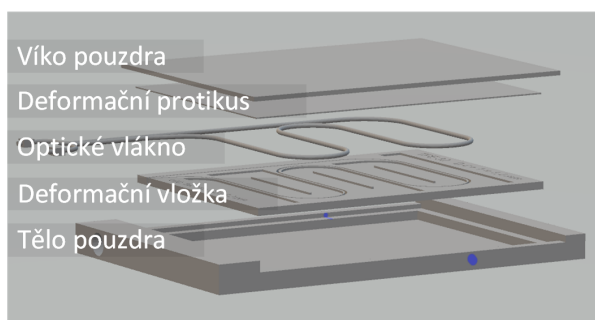


Obr. 4

6.4 Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání

Nejvýznamnější výsledky

Tento patent představuje optovláknový senzor navržený pro detekci průjezdu kola kolejového vozidla s cílem detekce průjezdu jednotlivých vozidel a počítání jejich náprav. Senzor vznikl v rámci výzkumu při řešení projektu TAČR DOPRAVA 2020+ a výsledky ukazují, že poskytuje vysokou citlivost a spolehlivost při měření. Důležitá je také inovativní konstrukce, která zajišťuje odolnost senzoru vůči náročným podmínkám železničního a tramvajového provozu.



Obrázek 6.4: Grafický abstrakt patentu Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání.

Hlavní přínosy a závěry

Hlavním přínosem tohoto patentu je vývoj a implementace kompozitního optovláknového senzoru, který nabízí novou úroveň přesnosti a odolnosti při detekci tlakových sil v kolejové dopravě. Tento senzorický systém poskytuje důležité informace o provozu v kolejové dopravě, což je klíčové pro prediktivní údržbu a zvýšení bezpečnosti železničního a tramvajového provozu. Výše uvedené potvrzuje zájem z komerční sféry nákupem licence na technické řešení v hodnotě 1 210 000,- Kč s DPH.

Další směřování výzkumu

Navazující výzkum by se měl zaměřit na optimalizaci senzoru pro různé typy kolejnic a kolejových vozidel a různé provozní podmínky. Dále je třeba zkoumat možnosti integrace tohoto senzoru s dalšími monitorovacími systémy používanými v železniční a tramvajové dopravě. Další výzkum by také měl zahrnovat testování senzoru v různých klimatických podmínkách a jeho adaptaci na specifické požadavky různých železničních sítí.

G01L 1/24 (2006.01)
G01L 1/00 (2006.01)
B61L 1/06 (2006.01)
B61L 1/00 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



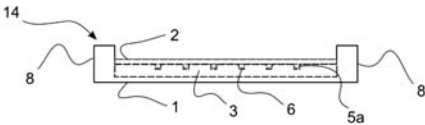
ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: 2022-45
(22) Přihlášeno: 31.01.2022
(40) Zveřejněno: 06.09.2023
(Věstník č. 36/2023)
(47) Uděleno: 28.07.2023
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: 06.09.2023
(Věstník č. 36/2023)

(56) Relevantní dokumenty:
DE 19518123 A1; EP 2733474 A2; AT 522346 A1; EP 2013590 A2.

(73) Majitel patentu:
PRODIN a.s., Pardubice, Zelené Předměstí, CZ
Vysoká škola báňská - Technická univerzita
Ostrava, Ostrava, Poruba, CZ
(72) Původce:
Mgr. et Mgr. Jan Jargus, Ph.D., Havířov, Šumbark, CZ
Ing. Jakub Jaroš, Ostrava, Výškovice, CZ
Ing. Marcel Fajkus, Ph.D., Ostrava, Hrabůvka, CZ
doc. Ing. Jan Nedoma, Ph.D., Kostelec na Hané, CZ
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc., Vřesina, CZ
Ing. Tomáš Krenželok, Ph.D., Šilheřovice, CZ
Tomáš Soural, Sobotín, CZ
(74) Zástupce:
INPARTNERS GROUP, Ing. Dušan Kendereški,
Tuřanka 1519/115a, 627 00 Brno, Slatina

Uspořádání tohoto kompozitního optovláknového senzoru (14) je takové, že je uložen pod patou kolejnice a na podkladnici, přičemž oba konce optického vlákna jsou propojeny s optickým kabelem, který je dále propojen s vyhodnocovací jednotkou obsahující zdroj světla, detektor a procesor. Předmětem ochrany je také způsob detekce tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla pomocí shora objasněného uspořádání.



(54) Název vynálezu:
Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání

(57) Anotace:
Kompozitní optovláknový senzor (14) pro detekci tlakové síly, vznikající průjezdem kola kolejového vozidla obsahuje pouzdro, první elasticky deformovatelný člen (3) uložený v pouzdře a optické vlákno uložené v prvním elasticky deformovatelném členu (3) a propojitelné s vyhodnocovací jednotkou obsahující zdroj světla, detektor a procesor. První elasticky deformovatelný člen (3) obsahuje na jedné straně první deformační plochu, ve které je uspořádán alespoň jeden nepřerušovaně probíhající zářez (6) pro uložení optického vlákna. V zářezu (6) je uspořádán alespoň jeden první deformační výstupek (5a), který je nižší než hloubka zářezu (6) a který je konfigurován tak, že přenesením tlakové síly přes pouzdro a první elasticky deformovatelný člen (3) na první deformační výstupek (5a) a zatlačením prvního deformačního výstupku (5a) na optické vlákno je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna. První deformační výstupek (5a) je zhotoven z plastu.

Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání

5

Oblast techniky

Tento vynález se týká víceúčelového kompozitního senzoru kolejových vozidel s optickými vlákny, zejména kompozitního optovláknového senzoru vhodného pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, a způsobu detekce tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla.

15

Dosavadní stav techniky

V současném stavu techniky, viz. článek „Optické a vláknově optické senzory v železničních aplikacích“ v časopise Nová železniční technika, 3/2021, str. 25-29, jsou známy mikroohybové optické senzory patřící do skupiny amplitudových senzorů. Tyto senzory pracují na principu porušení okrajových podmínek šíření světla v optickém vlákně. Vlivem měřené veličiny dochází ke změně geometrie optického vlákna a tím i k porušení podmínky úplného odrazu na rozhraní jádro-plášť. Tyto senzory vyhodnocují pokles intenzity vystupujícího světla z konce optického vlákna nebo nárůst intenzity světla, které uniká přes plášť do okolního prostředí. Pomocí mikroohybových senzorů lze například snímat následující veličiny: hmotnost, mechanický tlak, zrychlení, deformace a vibrace. Hlavní výhody těchto senzorů jsou jednoduchá konstrukce, využití multimódových optických vláken a s tím související nízká cena. V konkrétním provedení byly do dvou míst pod patu kolejnice umístěny mikroohybové snímače, přičemž při průjezdu nápravy byly snímače deformovány úměrně hmotnosti působícím tlakem. Pomocí dvou senzorů bylo možné spolehlivě měřit i rychlost a směr železniční i tramvajové soupravy.

V patentovém spise DE 10057740 A1 je popsáno zařízení pro detekci vad kruhovitosti kol kolejových vozidel pomocí optovláknového senzoru, který je umístěn buď mezi patou kolejnice a podkladnicí či pražcem, nebo v příčném otvoru stojiny kolejnice, a dále způsob detekce vad kruhovitosti kol kolejových vozidel uvedeným zařízením. Uvedený senzor obsahuje pouzdro a v něm uložené optické vlákno, které je elasticky deformovatelné v odezvě na zátěž způsobenou průjezdem kola. Tato deformace proporčně k zátěži ovlivňuje vstupní světelný signál v optickém vlákně a může spočívat v dočasné změně délky nebo průměru vlákna, čímž se prodlužuje dráha, případně zvyšuje útlum světelného signálu. Takto změněný signál je detekován měřicím zařízením, které na základě vysoko- nebo nízkofrekvenčních výchylek signálu detekuje přítomnost nebo nepřítomnost samotného projíždějícího kola a zejména vad jeho kruhovitosti.

Nevýhodou uvedeného senzoru je, že při vysokých zátěžích (např. plně naložený nákladní vlak) může změnou délky nebo průměru samotného optického vlákna dojít k nevratným deformacím a k poškození senzoru.

V patentovém spise DE 19518123 A1 je popsáno zařízení pro detekci průjezdu kol kolejových vozidel a pro stavební prvky ovlivněné elektrickou nebo elektromagnetickou interferencí, které obsahuje optovláknový senzor a vyhodnocovací jednotku. Uvedený senzor obsahuje tělo a v něm uložené optické vlákno, které jsou obě elasticky deformovatelné v odezvě na zátěž způsobenou průjezdem kola. Tělo navíc v jednom provedení obsahuje téměř nedeformovatelné kovové kolíky, které jsou umístěny nad a pod optickým vláknem, navzájem v odstupu (tj. ne nad sebou a ne příliš blízko vedle sebe) a bez přímého kontaktu s optickým vláknem (viz obr. 2, DE 19518123 A1). Při působení tlakové síly tlačí tyto kovové kolíky prostřednictvím elasticky deformovatelného těla na optické vlákno, čímž ho deformují z obou stran. Uvedená deformace proporčně k zátěži ovlivňuje vstupní světelný signál v optickém vlákně a může spočívat v reverzibilní mikroohybu, vyosení nebo změně úhlu, čímž se zvyšuje útlum světelného signálu. Takto změněný signál je detekován

vyhodnocovací jednotkou, která na základě výchylek signálu detekuje přítomnost nebo nepřítomnost samotného projíždějícího kola.

5 Hlavní nevýhodou uvedeného senzoru je, že uvedené kolíky jsou vyrobeny z kovu, což může způsobit problémy v senzorech, které podléhají intenzivní elektrické nebo elektromagnetické interferenci a vyžadují výhradně nekovové součásti. Další nevýhodou uvedeného senzoru je, že tlaková síla působí z kovových kolíků na optické vlákno pouze nepřímo prostřednictvím elasticky deformovatelného těla, čímž se může rozložit na větší plochu, přičemž navíc v kombinaci citlivosti kovového kolíku na výkyvy teploty kvůli své vysoké teplotní roztažnosti můžou v detekovaném
10 signálu vznikat nepřesnosti.

V patentovém spise EP 0608645 A1 je popsáno zařízení pro detekci tlakové síly, např. pro detekci průjezdu kola, které obsahuje optovláknový senzor a vyhodnocovací jednotku. Uvedený senzor obsahuje tělo (zhotovené např. z pryže) a v něm uložené optické vlákno, které jsou obě elasticky
15 deformovatelné v odezvě na zátěž způsobenou tlakovou silou. V prvním provedení obsahuje tělo navíc kovový pás s vystupujícími žebry, která jsou umístěna pouze pod optickým vláknem, navzájem v odstupu (tj. ne příliš blízko vedle sebe) a v přímém kontaktu s optickým vláknem (viz obr. 3, EP 0608645 A1). V druhém provedení obsahuje tělo navíc kovový pás, který je umístěn pod optickým vláknem, a deformační vlákno z tvrdého materiálu, spirálovitě navinuto kolem optického vlákna v místě mezi elasticky deformovatelným tělem a kovovým pásem tak, že vytváří
20 deformační průsečíkové body, které jsou umístěny nad a pod optickým vláknem, navzájem v odstupu (tj. ne nad sebou, a ne příliš blízko vedle sebe) a v přímém kontaktu s optickým vláknem (viz obr. 4, EP 0608645 A1). Při působení tlakové síly tlačí tato vystupující kovová žebra nebo tyto deformační průsečíkové body deformačního spirálovitého vlákna prostřednictvím elasticky
25 deformovatelného těla na optické vlákno, čímž ho deformují z jedné strany (první provedení) nebo z obou stran (druhé provedení). Uvedená deformace proporčně k zátěži ovlivňuje vstupní světelný signál v optickém vlákně a může spočívat v reverzibilní mikroohybu, čímž se zvyšuje útlum světelného signálu. Takto změněný signál je detekován vyhodnocovací jednotkou, která na základě výchylek signálu detekuje přítomnost nebo nepřítomnost tlakové síly.

30 Hlavní nevýhodou uvedeného senzoru je, že uvedená žebra a uvedené deformační spirálovité vlákno jsou vyrobeny z kovu nebo jiného tvrdého materiálu, což může způsobit problémy v senzorech, které podléhají intenzivní elektrické nebo elektromagnetické interferenci a vyžadují výhradně nekovové součásti. Další nevýhodou uvedeného senzoru je, že kvůli své tvrdosti
35 (kov nebo tvrdý materiál) můžou žebra nebo deformační spirálovité vlákno vést až k poškození senzoru a k nevratným (plastickým) deformacím optického vlákna, zejména ke změnám jeho průměru.

40 Další podobné senzory pro detekci tlakové síly jsou známé z evropské patentové přihlášky EP 2733474 A2, rakouské patentové přihlášky AT 522346 A1 a evropské patentové přihlášky EP 2013590 A2.

Nevýhodou výše uvedených senzorů je tedy jejich nízká odolnost vůči intenzivní elektrické nebo elektromagnetické interferenci kvůli přítomnosti kovových součástí a riziko poškození optického
45 vlákna příliš tvrdými deformačními prvky při vysokých zátěžích.

Ve stavu techniky tedy vzniká potřeba nového optovláknového senzoru pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, který je odolný vůči intenzivní elektrické nebo elektromagnetické interferenci a u kterého nedochází k poškození optického vlákna při vysokých
50 zátěžích.

Podstata vynálezu

5 Cílem tohoto vynálezu je poskytnout optovláknový senzor překonávající výše uvedené nevýhody stavu techniky.

Podle prvního provedení je cíle tohoto vynálezu dosaženo kompozitním optovláknovým senzorem vhodným pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, podle nároku 1. Uvedený senzor obsahuje pouzdro pro ochranu vnitřních částí, první elasticky deformovatelný člen
10 uložený v pouzdře, a optické vlákno uložené v prvním elasticky deformovatelném členu a propojitelné s vyhodnocovací jednotkou obsahující zdroj světla, detektor a procesor. Vyhodnocovací jednotka se nachází mimo samotný senzor. První elasticky deformovatelný člen obsahuje na jedné (spodní) straně první deformační plochu, ve které je uspořádán alespoň jeden nepřerušovaně probíhající zářez pro uložení optického vlákna. V zářezu je uspořádán alespoň jeden
15 první deformační výstupek, který je nižší než hloubka zářezu a který je konfigurován tak, že přenesením tlakové síly ze zátěže (např. kolo kolejového vozidla) přes kolejnici, pouzdro a první elasticky deformovatelný člen na první deformační výstupek a zatlačením prvního deformačního výstupku na optické vlákno je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna.

20 Tento reverzibilní mikroohyb vede k částečnému vyvázání vedené světelné energie z optického vlákna. Velikost vyvázané světelné energie je závislá na míře deformace optického vlákna tlakovou silou a je tedy úměrná hmotnosti zátěže. Mikroohyby jsou poruchy přímočarosti osy vlákna a malé chyby v geometrii vlákna. V uvedeném senzoru vznikají při deformaci optického vlákna v místech deformačních výstupků, kde dochází ke stlačení optického vlákna a ke změně geometrie optického
25 vlákna v řezu. Na mikroohybech jsou některé paprsky (vidy) odraženy pod velkým úhlem, unikají mimo jádro optického vlákna a dochází tak ke zvětšení jeho útlumu. Reverzibilita mikroohybu je zajištěna u zátěží menších, než je maximální zátěž v elastické míře deformace materiálu optického vlákna. Změny v tlakové síle působící na senzor se přenáší pomocí změny výkonu (intenzity) světelného paprsku vedeného v optickém vlákne do vyhodnocovací jednotky.

30 V okolí deformačního členu dochází k další změně zakřivení optického vlákna – makroohybu, který se rovněž podílí na změnách přenosových vlastností vlákna. Makroohyby vznikají v případě ohybu optického vlákna pod určitou mez poloměru křivosti a způsobují nedodržení podmínky totálního odrazu na rozhraní jádra a pláště a vyvázání světla z optického vlákna. V uvedeném
35 senzoru makroohyby vznikají kolem deformačních výstupků, kolem kterých se optické vlákno ohýbá. S klesajícím poloměrem zakřivení optického vlákna se zvětšuje množství vyvázané energie světelného paprsku z jádra optického vlákna směrem do jeho pláště a dále ven do okolí, čímž narůstá přenosový útlum vlákna. Jinými slovy, vyvázání světla makroohybem vzniká všude tam, kde je překročen minimální poloměr zakřivení vlákna, kritický pro daný typ vlákna. Změny tohoto zakřivení vlivem tlakové síly způsobují další vyvázání energie, které se přičítá k reverzibilním
40 změnám na mikroohybech. Výsledkem působení sil na senzor je amplitudová modulace intenzity výstupního světelného signálu, přičemž do snímáče vstupuje vstupní světelný signál s konstantní intenzitou. Vyhodnocovací jednotka následně provádí převod optického signálu na elektrický a z něj následně vyhodnocuje průjezd a přítomnost železničního kola v blízkosti senzoru.

45 Podstatou tohoto vynálezu je, že první deformační výstupek je zhotoven z plastu, což zajišťuje odolnost vůči intenzivní elektrické nebo elektromagnetické interferenci, protože plast je nekovový materiál, a což dále eliminuje riziko poškození optického vlákna v přímém kontaktu s prvním deformačním výstupkem, protože plast je ve srovnání s kovem měkký a poddajný materiál, který
50 kopíruje nerovnosti optického vlákna a nezpůsobuje jeho nevratné deformace, zejména změny průměru vlákna. Senzor tak vytváří robustní elektrickou izolaci mezi kolejnicí a vyhodnocovací jednotkou.

Pro výrobu deformačních členů byla použita technologie 3D tisku z důvodu velkého množství typů
55 filamentů, v rámci kterých je možné zvolit filament s požadovanými vlastnostmi: pevnost, tvrdost,

provozní teplota, odolnosti vůči vnějším vlivům apod. Mezi vhodné plasty (filamenty pro 3D tisk) pro zhotovení deformačních výstupků patří poly(akrylonitril-*co*-styren-*co*-akrylát) (ASA), poly(akrylonitril-*co*-butadien-*co*-styren) (ABS), poly(akrylonitril-*co*-butadien-*co*-styren-*co*-methyl-methakrylát) (transparentní ABS; ABS-T; MABS), směs polykarbonátu a poly(akrylonitril-*co*-butadien-*co*-styrenu) (PC/ABS), poly(ethylen-*co*-tereftalát) s modifikací glykolu (PETG), směs poly(ethylen-*co*-tereftalátu) s modifikací glykolu a karbonových vláken (PETG/CF; CFJet), a poly(etherimid) uzpůsobený pro 3D tisk (PEI; PeiJet). Vhodným plastem pro zhotovení deformačních výstupků může být např. poly(akrylonitril-*co*-styren-*co*-akrylát) (ASA) nebo poly(ethylen-*co*-tereftalát) s modifikací glykolu (PETG), o tvrdosti měřitelné v rámci stupnice Shore A (obecně udávané hodnoty přibližně 25 až přibližně 100, např. 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 nebo 100) nebo v rámci Rockwellovy stupnice B (obecně udávané hodnoty 0 až přibližně 100, např. 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 85, 90, 95 nebo 100). Kromě toho lze využít i polyurethan (PU), zejména litý polyuretan, ze kterého je možné destičky odlít a vytvrdit do požadované tvrdosti, např. v rozmezích uvedených výše. Pro výrobu deformačních členů je možné využít i jiných postupů a materiálů splňujících výše uvedené, požadované parametry.

Podle druhého provedení je cíle tohoto vynálezu dosaženo kompozitním optovláknovým senzorem vhodným pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, podle nároku 2. Tento senzor ve srovnání se senzorem podle prvního provedení navíc obsahuje druhý elasticky deformovatelný člen uložený v pouzdře a obsahující na jedné (vrchní) straně druhou deformační plochu přilehlou k první deformační ploše prvního elasticky deformovatelného členu. Na druhé deformační ploše je uspořádán alespoň jeden druhý deformační výstupek tak, že po přiložení první a druhé deformační plochy k sobě vyčnívá do zářezu pro uložení optického vlákna a mimo první deformační výstupek. První a druhý deformační výstupek jsou tedy navzájem v odstupu a zároveň v přímém kontaktu s optickým vláknem. Druhý deformační výstupek je konfigurován tak, že přenesením tlakové síly přes pouzdro, první elasticky deformovatelný člen a první deformační výstupek na optické vlákno a zatlačením optického vlákna na druhý deformační výstupek je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna. Druhý deformační výstupek je rovněž zhotoven z plastu ze stejných důvodů jako první deformační výstupek.

V senzoru podle prvního provedení nastává reverzibilní mikroohyb optického vlákna pouze působením prvního deformačního prvku z jedné strany (seshora), což činí tento senzor méně citlivý, a tudíž vhodný pro vyšší zátěže (např. plně naložené nákladní vlaky, nebo obecně železniční vozidla). V malé míře se působením prvního deformačního prvku v jeho okolí projevuje i makroohyb optického vlákna. Naopak v senzoru podle druhého provedení nastává reverzibilní mikroohyb optického vlákna působením prvního i druhého deformačního prvku z obou stran (seshora i zezdola), což činí tento senzor citlivější, a tudíž vhodný pro nižší zátěže (např. tramvajová vozidla). Působením prvního i druhého deformačního prvku se v jejich okolí projevuje i makroohyb optického vlákna v podstatně větší míře než u senzoru podle prvního provedení.

Ve výhodném provedení mohou být první a/nebo druhé deformační výstupky uspořádány v matici deformačních bodů, např. v matici 1x2, 1x3, 1x4, 1x5, 1x6, 2x2, 2x3, 2x4, 2x5, 2x6, 3x3, 3x4, 3x5, 3x6 atd. Na optickém vlákně se uplatňuje sériový model nárůstu útlumu vlákna na mikroohybech, tedy počet deformačních bodů násobí změnu optického signálu a tím zvyšuje citlivost senzoru. Závislost není zcela lineární, při velkém počtu deformačních bodů na ploše způsobí rozklad sil a snížení efektu zvyšování citlivosti senzoru.

Pro matice o jednom řádku/sloupci může být zářez pro uložení optického vlákna lineárně probíhající a/nebo zakřivený. Pro matice o alespoň dvou řádcích a dvou sloupcích je potřebné, aby byl zářez pro uložení optického vlákna zakřivený. Zakřivením zářezu mohou vzniknout různé smyčky, vlásenky, spirály apod. Pro každý typ optického vlákna je definován minimální poloměr zakřivení. Zakřivením optického vlákna v zářezu nastává pouze zanedbatelný vlastní útlum světelného signálu, protože toto zakřivení má dostatečně velký poloměr zakřivení, kde makroohyb nevzniká. Zářezů může teoreticky být i více, ale to vyžaduje i více optických vláken, což samotný senzor komplikuje.

Ve výhodném provedení je optické vlákno mnohovidové. Mnohovidová vlákna mají přibližně o řád větší průměr než jednovidová, vyznačují se lepší mechanickou odolností, větší odolností vůči vibracím na spojovacích konektorech při shodné výrobní přesnosti a výrazně vyšší citlivostí na ohyby vůči jednovidovým vláknům.

Ve výhodném provedení jsou pouzdro, první elasticky deformovatelný člen a druhý elasticky deformovatelný člen zhotoveny z pryže nebo podobného elasticky deformovatelného materiálu pro zajištění elastické deformovatelnosti a účinného přenosu tlakové síly až na deformační výstupky a optické vlákno. Výběr pryžových materiálů pro součásti senzoru je dán odolností proti vnějším vlivům, odolností proti ropným produktům a dalším chemikáliím, jejichž výskyt lze očekávat v místě nasazení senzoru.

Ve výhodném provedení obsahuje pouzdro vrchní část a spodní část. Vrchní část může obsahovat dva vystupující protilehlé okraje přesahující přes spodní část pro zabránění nechtěného posunu nebo prokluzu senzoru při pohybu kolejnice vlivem jejího pružení a tepelné roztažnosti. Vrchní část může dále obsahovat ochranné prvky pro ochranu propojení optického vlákna a optického kabelu vedeného ze senzoru do vyhodnocovací jednotky, viz níže. Výstup obou konců optického vlákna může být vedle sebe nebo na opačných stranách pouzdra. Rozměry senzoru jsou určeny typem kolejnice, podkladnice, způsobem uchycení kolejnice apod.

Ve výhodném provedení je mezi první deformační plochou prvního elasticky deformovatelného členu a spodní částí (první provedení), nebo mezi první deformační plochou prvního elasticky deformovatelného členu a druhou deformační plochou druhého elasticky deformovatelného členu (druhé provedení) uspořádána plastová mezivrstva, která je s výhodou zhotovena z poly(ethyilentereftalátu) s modifikací glykolu (PETG). Tato mezivrstva umožňuje ladění vlastností senzoru, a to svou tloušťkou a tuhostí materiálu. Např. mezivrstva s větší tuhostí dosahuje menších citlivostí a posouvá pracovní oblast snímání k větším tlakům působícím na senzor, přičemž mezivrstva s menší tuhostí dosahuje analogicky opačný efekt.

Podle třetího provedení je cíle tohoto vynálezu dosaženo uspořádáním uvedeného kompozitního optovláknového senzoru vhodného pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, kde je kompozitní optovláknový senzor uložen pod patou kolejnice a na podkladnici. Senzor tak nahrazuje standardní pryžovou tlumicí podkolejnicovou podložku vkládanou do mechanismu uchycení kolejnice. Uchycení kolejnice může být provedeno všemi standardními způsoby, tedy pomocí šroubů, pružinových úchytnů nebo jejich kombinací. Umístění senzoru mezi patu kolejnice a podkladnici zajišťuje snímání tlaku působícího na kolejnici na víc rozložené ploše ve srovnání se snímáním ve stojině kolejnice. Navíc, umístění senzoru do stojiny kolejnice (jak uvádí dokument DE 19518123 A1) narušuje její mechanickou celistvost, a je proto méně vhodné, přičemž toto umístění vyžaduje konstrukčně zcela jiné uspořádání senzoru a průběh tlaku v závislosti na jízdě vozidla je částečně odlišný.

Oba konce optického vlákna vycházejícího ze senzoru jsou propojeny s optickým kabelem s mnohovidovými vlákny, který slouží pro přivedení světelné energie a odvedení zbytkové energie ze senzoru. Optický kabel je dále propojen s vyhodnocovací jednotkou obsahující zdroj světla pro dodávání vstupního světelného signálu do senzoru, detektor pro převádění výstupního světelného signálu na napěťový, volitelně zesilovač a A/D převodník, a elektronické obvody obsahující procesor s pamětí s uloženým počítačovým programem pro zpracování výstupního signálu, a dále se zdrojem napájení, výstupy a datovou linkou (např. RS485) pro indikaci výsledků vyhodnocení a pro předání případnému nadřazenému systému. Elektronické obvody rovněž zajišťují teplotní a proudovou stabilitu a signálové zpracování. Konektory optického kabelu jsou jak na rozhraní vyhodnocovací jednotky a optického kabelu, tak i na rozhraní optického kabelu a optického vlákna v senzoru (což je obvykle uzavřeno v zemním vodotěsném optickém rozvaděči).

Uvedené uspořádání, kdy je odděleno místo měření (senzor pod patou kolejnice) od místa vyhodnocení, dovoluje instalovat senzor do míst s elektromagnetickou interferencí, kterými mohou být současné senzory založené na monitorování změn elektrických parametrů a veličin senzorů negativně ovlivňovány. Zároveň se místo měření pod patou kolejnice chová jako elektricky pasivní senzor, který nepotřebuje v místě měření žádnou elektrickou energii jak pro vlastní napájení, tak pro vlastní měření. V místě měření je pouze světlo, např. s výkonem do 1 mW.

Zdrojem světla v případě mnohovydových vláken může být vysílací laserová dioda nebo LED. Na tyto zdroje jsou kladeny zejména požadavky na stabilitu výstupního výkonu a snadnou vazbu na přírodní optické vlákno v optickém kabelu. Vlnová délka použitého světla může být limitována na vlnové délky do 1000 nm (viditelná oblast spektra a blízká oblast infračerveného záření), pracovní vlnová délka však není kritická. Z ekonomických důvodů je výhodné použití vlnových délek zdrojů světla stejných jako se používají v telekomunikační a přenosové technice. Minimální optický výkon potřebný pro činnost uvedeného senzoru je 10 μ W. Tato hodnota závisí na vzdálenosti mezi místem měření a místem umístění vyhodnocovací jednotky. S rostoucí vzdáleností roste požadavek na velikost výkonu navázaného ze zdroje světla do mnohovydového optického vlákna až k hodnotě 100 μ W pro vzdálenosti kolem 1 km.

Detektorem světla postupujícího ze senzoru a nesoucího informaci o poloze kolejového vozidla může být přijímací fotodioda. Lze použít několik vhodných typů fotodetektorů, jakými mohou být fotodioda na PN přechodu, PIN fotodioda, přijímací laserová dioda nebo fototranzistor. Podstatné je, aby fotodetektor byl schopen detekce světla o vlnové délce do 1000 nm. Této podmínce vyhoví všechny křemíkové fotodetektory. Pro zvýšení rozlišovací schopnosti je vhodné, aby fotodetektory měly malý šum vyjádřený v parametru temného proudu, jehož hodnota by neměla přesáhnout 20 nW.

Optický kabel mezi místem uložení senzoru a vyhodnocovací jednotkou nevyžaduje speciální ochranné prvky. Pro zachování plné elektrické izolace (dielektricity) by optický kabel neměl obsahovat žádné metalické prvky. Tento požadavek splňují běžné optické kabely používané v telekomunikacích a přenosech dat. Druhým požadavkem na optické kabely je, aby optická vlákna v něm byla mnohovydová, aby nedocházelo na rozhraní mezi optickým vláknem v senzoru a vláknem optického kabelu k dodatečným ztrátám. Třetím požadavkem je počet vláken v optickém kabelu, který stanovuje počet vláken, např. na dvě. Jedno vlákno je určeno pro přívod energie, druhé vlákno pro jeho vyvedení ze senzoru a přenos signálu do vyhodnocovací jednotky. Protože existují dva rozměrové standardy optických mnohovydových vláken, a to 50 μ m a 62,5 μ m, je pro senzor vhodnější použití vlákna o průměru jádra 50 μ m a průměru pláště, např. 125 μ m. U těchto vláken je menší rozdíl v indexech lomu jádra a pláště, což vede ke snadnějšímu vyvazování vedené energie v senzoru a tím k vyšší citlivosti.

Podle dalšího aspektu tohoto vynálezu je výše uvedený kompozitní optovláknový senzor nebo výše uvedené uspořádání použito pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, kterým může být např. železniční vozidlo, tramvaj, pozemní lanová dráha apod. Detekovaný průjezd kola může sloužit pro detekci polohy kola, počtu náprav, hmotnosti na nápravu, rychlosti průjezdu, vad kruhovitosti kola nebo proti falešnému ovlivnění jiným druhem vozidla nebo žádným vozidlem. Existuje rovněž teoretická možnost miniaturizace pro železniční modelářství.

Podle čtvrtého provedení je cíle tohoto vynálezu dosaženo způsobem detekce tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla pomocí výše uvedeného uspořádání, který obsahuje následující kroky:

- a. přivedení vstupního světelného signálu ze zdroje světla do optického vlákna;
- b. detekce a zpracování prvního výstupního světelného signálu z optického vlákna vyhodnocovací jednotkou na první výstupní signál, přičemž první výstupní signál odpovídá referenčnímu stavu, kdy senzor nedetekuje žádnou tlakovou sílu;

- 5 c. působení tlakové síly na senzor, čímž je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna a pokles intenzity vstupního světelného signálu za vzniku druhého výstupního světelného signálu;
- d. detekce a zpracování druhého výstupního světelného signálu z optického vlákna vyhodnocovací jednotkou na druhý výstupní signál, přičemž druhý výstupní signál odpovídá stavu, kdy senzor detekuje tlakovou sílu; a
- 10 e. srovnání prvního a druhého výstupního signálu a vyhodnocení vyhodnocovací jednotkou, zda je detekovaná tlaková síla způsobena průjezdem kola kolejového vozidla.

Vyhodnocení detekce průjezdu kola z dat získaných pomocí uvedeného senzoru je založen na vyhledávání charakteristického tvaru výstupního signálu. Tento signál ve formě napětí je získán pomocí detektoru a volitelně zesilovače a A/D převodníku. V získaných datech je vyhledáván tvar signálu specifický pro dvojkolí kolejového vozidla. U tvaru signálu je srovnáváno několik časových a úrovnových parametrů a pokud je zkoumaný signál v určitých tolerancích splňuje, je tento signál vyhodnocen jako projeté dvojkolí kolejového vozidla. Pokud tyto parametry signál nesplňuje, je vyhodnocen jako nekolejové vozidlo, případně jako žádné vozidlo. Tyto parametry mohou být v procesoru nastaveny pevně nebo můžou být plovoucí. Kombinace sledovaných parametrů časových, úrovnových a velikosti změny úrovně v krátkém čase umožňuje detekovat jak pomalé, tak i rychlé průjezdy kolejových vozidel s různou hmotností (zatížením náprav). Kolejové vozidlo rovněž může zrychlovat nebo zpomalovat a kvalitu detekce to neovlivní. Vyhodnocovací algoritmus pracuje také s plovoucí referenční hodnotou, díky které nedochází k falešným detekcím kolejových vozidel způsobeným například přirozeným pohybem kolejnice, jakým je tepelné pnutí způsobené změnou okolní teploty.

Objasnění výkresů

30 Podstata tohoto vynálezu je dále objasněna na příkladech jeho uskutečnění, které jsou popsány s využitím připojených výkresů, ve kterých:

- obr. 1 znázorňuje boční pohled v řezu na senzor podle prvního provedení;
- 35 obr. 2 znázorňuje boční pohled v řezu na senzor podle druhého provedení;
- obr. 3 znázorňuje spodní pohled na vrchní část pouzdra;
- 40 obr. 4 znázorňuje spodní pohled na první elasticky deformovatelný člen;
- obr. 5 znázorňuje boční pohled v řezu A-A na první elasticky deformovatelný člen;
- obr. 6 znázorňuje boční pohled v řezu B-B na první elasticky deformovatelný člen;
- 45 obr. 7 znázorňuje vrchní pohled na druhý elasticky deformovatelný člen;
- obr. 8 znázorňuje boční pohled v řezu C-C na druhý elasticky deformovatelný člen;
- 50 obr. 9 znázorňuje závislost změny intenzity světelného signálu na čase při průjezdu kola nad senzorem (celý graf A, detaily B a C);
- obr. 10 znázorňuje perspektivní pohled na uspořádání senzoru, kolejnice a podkladnice; a
- 55 obr. 11 znázorňuje blokové schéma vyhodnocovací jednotky.

Příklady uskutečnění vynálezu

Vynález bude dále objasněn na příkladech uskutečnění s odkazem na příslušné obrázky.

5

Prvním příkladem provedení je kompozitní optovláknový senzor 14 na obr. 1, obsahující spodní část 2 a vrchní část 1 pouzdra 29 s dvěma vystupujícími okraji 8, přesahujícími přes spodní část 2 (viz obr. 3), a dále v pouzdře 29 uložený první elasticky deformovatelný člen 3, ve kterém je uloženo optické vlákno 9 (obr. 4). První elasticky deformovatelný člen 3 obsahuje na straně přilehlé a orientované směrem ke spodní části 2 první deformační plochu, ve které je uspořádán alespoň jeden nepřerušovaně probíhající zářez 6 pro uložení optického vlákna 9. V zářezu 6 je uspořádán alespoň jeden první deformační výstupek 5a, přičemž na obr. 1 a 4 je jich znázorněno více a jsou uspořádány v příkladné matici 6x3. První deformační výstupek 5a je nižší než hloubka zářezu 6 (srovnání řezu A-A na obr. 5 a řezu B-B na obr. 6) a je konfigurován tak, že přenesením tlakové síly přes vrchní část 1 pouzdra 29 a první elasticky deformovatelný člen 3 na první deformační výstupek 5a a zatlačením prvního deformačního výstupku 5a na optické vlákno 9 je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna 9, což je obecně znázorněno i na obr. 12 v místě 28 vzniku mikroohybu spolu s místy 27 vzniku makroohybu. Tento jev je zaznamenán, přenesen z optického vlákna 9 přes rozhraní 7 a optický kabel 22, a zpracován do výstupního signálu ve vyhodnocovací jednotce 23. První deformační výstupek 5a je zhotoven z plastu (nekovový a měkký materiál), který zajišťuje odolnost vůči intenzivní elektrické nebo elektromagnetické interferenci a snižuje riziko poškození optického vlákna při vysokých zátěžích. Ve výhodném provedení je mezi první deformační plochou prvního elasticky deformovatelného členu 3 a spodní částí 2 pouzdra 29 uspořádána neznázorněná plastová mezivrstva. Plastem může být kterýkoliv z materiálů jmenovaných výše, např. ASA, ABS, ABS-T, PC/ABS, PETG, PETG/CF, PEI nebo PU.

Druhým příkladem provedení je kompozitní optovláknový senzor 14 na obr. 2, obsahující všechny znaky prvního provedení z obr. 1, vyjma uspořádání plastové mezivrstvy. Uvedený kompozitní optovláknový senzor 14 dále obsahuje v pouzdře 29 uložený druhý elasticky deformovatelný člen 4 (obr. 7), obsahující na straně orientované směrem k vrchní části 1 druhou deformační plochu přilehlou k první deformační ploše prvního elasticky deformovatelného členu 3. Na druhé deformační ploše je uspořádán alespoň jeden druhý deformační výstupek 5b tak, že po přiložení první a druhé deformační plochy k sobě vyčnívá do zářezu 6 pro uložení optického vlákna 9 (řez C-C na obr. 8) a mimo první deformační výstupek 5a. Na obr. 2 a 7 je znázorněno více druhých deformačních výstupků 5b a jsou uspořádány v příkladné matici 6x4. Druhý deformační výstupek 5b je konfigurován tak, že přenesením tlakové síly přes vrchní část 1 pouzdra 29, první elasticky deformovatelný člen 3 a první deformační výstupek 5a na optické vlákno 9 a zatlačením optického vlákna 9 na druhý deformační výstupek 5b je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna 9. Tento jev je zaznamenán, přenesen z optického vlákna 9 přes rozhraní 7 a optický kabel 22, a zpracován do podoby výstupního signálu ve vyhodnocovací jednotce 23. Druhý deformační výstupek 5b je rovněž zhotoven z plastu (nekovový a měkký materiál), který zajišťuje odolnost vůči intenzivní elektrické nebo elektromagnetické interferenci a snižuje riziko poškození optického vlákna při vysokých zátěžích. Ve výhodném provedení je mezi první deformační plochou prvního elasticky deformovatelného členu 3 a druhou deformační plochou druhého elasticky deformovatelného členu 4 uspořádána neznázorněná plastová mezivrstva. Plastem může být kterýkoliv z materiálů jmenovaných výše, např. ASA, ABS, ABS-T, PC/ABS, PETG, PETG/CF, PEI nebo PU.

Obr. 9 dále znázorňuje závislost změny intenzity světelného signálu na čase při průjezdu kola nad senzorem 14. Na obr. 9A jsou znázorněny průjezdy tří tramvají. Na obr. 9B je znázorněn detail průjezdu jedné tramvaje o třech dvojitých nápravách s celkem šesti železničními dvoukoly. Na obr. 9C je znázorněn detail průjezdu jedné dvojité nápravy obsahující dvě železniční dvoukola.

Obr. 10 dále znázorňuje uspořádání kompozitního optovláknového senzoru 14 podle prvního nebo druhého provedení, neznázorněné vyhodnocovací jednotky 23, kolejnice 10, podkladnice 12

a pražce 13. Senzor 14 je uložen pod patou 11 kolejnice 10 a na podkladnici 12. Oba konce optického vlákna 9 jsou propojeny s optickým kabelem 22, který je dále propojen s vyhodnocovací jednotkou 23 (viz obr. 11).

- 5 Na obr. 11 je znázorněno obecné uspořádání vyhodnocovací jednotky 23. Pro zpracování světelného signálu ze senzoru 14 vedeného optickým kabelem 22 se použije vyhodnocovací jednotka 23. Vyhodnocovací jednotka 23 obsahuje detektor 20 v podobě přijímací laserové diody, která je jednak opticky spojena s optickým kabelem 22 a dále se senzorem 14, a jednak elektricky se zesilovačem 18. Zesilovač 18 je dále propojen s A/D převodníkem 16, který je dále propojen
- 10 s procesorem 15 pro zpracování a vyhodnocování signálu, obsahujícím paměť 17 s nahranou softwarovou aplikací. Paměť 17 může být samostatnou součástí, nebo může využívat kombinace množství paměťových jednotek, a je s procesorem 15 propojena. Procesor 15 je připojen na zdroj 19 elektrické energie a na indikační výstupy 24 a datovou linku 25 pro indikaci výsledků vyhodnocení. Vyhodnocovací jednotka 23 dále obsahuje zdroj 21 světla v podobě vysílací laserové
- 15 diody, která je napájena z elektrického zdroje 19 a zároveň je opticky propojena s optickým kabelem 22 a dále se senzorem 14. Tato vysílací laserová dioda slouží jako zdroj vstupního světelného signálu, který je v případě zátěže na senzoru 14 změněn a takto změněný signál je přiveden na detektor 20.
- 20 A/D převodník 16 i zesilovač 18 lze vynechat, pokud je odpovídající převodník přímo integrován do procesoru 15, respektive pokud je signál z přijímací laserové diody tvořící detektor 20 zpracovatelný přímo A/D převodníkem 16 nebo procesorem 15.

- Výsledek vyhodnocení může být předáván nadřazenému systému 26 buď stavově pomocí
- 25 digitálních indikačních výstupů 24, nebo pomocí datové linky 25, kde se elektrický signál nebo data dále zpracují nebo se zobrazí výsledek. Datová linka 25 může být provedena ve formě digitálního komunikačního rozhraní jako je například RS485, případně jiného vhodného rozhraní.

30 Průmyslová využitelnost

- Víceúčelový kompozitní optovláknový senzor kolejových vozidel je určen pro bodovou detekci železničních nebo tramvajových vozidel před návěstidlem, k řízení provozu v depech a vozovkách a tam, kde se vyskytují látky s nebezpečím výbuchu nebo požáru nebo kde dochází k silným
- 35 interferencím s rušivými poli, které mají svůj původ v silných elektromagnetických polích. Ta způsobují výpadky a chyby v činnostech současných senzorů, které jsou založeny na principu měření elektrických parametrů těchto senzorů.

- Dále lze senzor využít od náhrady indukčních smyček umístěvaných ve výhybkách nebo
- 40 v tramvajových vozovkách přes aplikace s automatickou aktivací světelných výstražných prvků v tramvajových přechodech nebo přejezdech až po aplikace určené k preferenci tramvajové dopravy. S využitím stejného principu snímání, ale s upraveným mechanickým řešením snímače a s doplněným softwarem pro signálové zpracování je možné provádět i diagnostiku chodu železniční výhybky, resp. přestavníku.

45

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Kompozitní optovláknový senzor (14) pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejevého vozidla, přičemž senzor (14) obsahuje pouzdro (29), první elasticky deformovatelný člen (3) uložený v pouzdře (29) a optické vlákno (9) uložené v prvním elasticky deformovatelném členu (3) a propojitelné s vyhodnocovací jednotkou (23) obsahující zdroj (21) světla, detektor (20) a procesor (15), přičemž první elasticky deformovatelný člen (3) obsahuje na jedné straně první deformační plochu, ve které je uspořádán alespoň jeden nepřerušovaně probíhající zářez (6) pro uložení optického vlákna (9), **vyznačující se tím**, že v zářezu (6) je uspořádán alespoň jeden první deformační výstupek (5a), který je nižší než hloubka zářezu (6) a který je konfigurován tak, že přenesením tlakové síly přes pouzdro (29) a první elasticky deformovatelný člen (3) na první deformační výstupek (5a) a zatlačením prvního deformačního výstupku (5a) na optické vlákno (9) je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna (9), přičemž první deformační výstupek (5a) je zhotoven z plastu.

2. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že senzor (14) obsahuje druhý elasticky deformovatelný člen (4) uložený v pouzdře (29) a obsahující na jedné straně druhou deformační plochu přilehlou k první deformační ploše prvního elasticky deformovatelného členu (3), přičemž na druhé deformační ploše je uspořádán alespoň jeden druhý deformační výstupek (5b) tak, že po přiložení první a druhé deformační plochy k sobě vyčnívá do zářezu (6) pro uložení optického vlákna (9) a mimo první deformační výstupek (5a), přičemž druhý deformační výstupek (5b) je konfigurován tak, že přenesením tlakové síly přes pouzdro (29), první elasticky deformovatelný člen (3) a první deformační výstupek (5a) na optické vlákno (9) a zatlačením optického vlákna (9) na druhý deformační výstupek (5b) je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna (9), přičemž druhý deformační výstupek (5a) je zhotoven z plastu.

3. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že první a/nebo druhé deformační výstupky (5a, 5b) jsou uspořádány v matici.

4. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že první a/nebo druhý deformační výstupek (5a, 5b) je zhotoven z plastu zvoleného ze skupiny obsahující poly(akrylonitril-co-styren-co-akrylát), poly(akrylonitril-co-butadien-co-styren), poly(akrylonitril-co-butadien-co-styren-co-methylmethakrylát), směs polykarbonátu a poly(akrylonitril-co-butadien-co-styrenu), poly(ethylen-co-tereftalát) s modifikací glykolu, směs poly(ethylen-co-tereftalátu) s modifikací glykolu a karbonových vláken, poly(etherimid) a polyurethan.

5. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že zářez (6) pro uložení optického vlákna (9) je lineárně probíhající a/nebo zakřivený.

6. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že optické vlákno (9) je mnohovidové.

7. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že pouzdro (29), první elasticky deformovatelný člen (3) a druhý elasticky deformovatelný člen (4) jsou zhotoveny z elasticky deformovatelného materiálu, zejména z pryže.

8. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že pouzdro (29) obsahuje vrchní část (1) a spodní část (2), přičemž vrchní část (1) obsahuje dva vystupující protilehlé okraje (8) přesahující přes spodní část (2).

9. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že vrchní část (1) obsahuje ochranné prvky pro ochranu propojení optického vlákna (9).

10. Kompozitní optovláknový senzor (14) podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že mezi první deformační plochou prvního elasticky deformovatelného členu (3) a spodní částí (2), nebo mezi první deformační plochou prvního elasticky deformovatelného členu (3) a druhou deformační plochou druhého elasticky deformovatelného členu (4) je uspořádána plastová mezivrstva, s výhodou zhotovená z poly(ethylen-tereftalátu) s modifikací glykolu.

11. Uspořádání kompozitního optovláknového senzoru (14) pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že kompozitní optovláknový senzor (14) je uložen pod patou (11) kolejnice (10) a na podkladnici (12), přičemž oba konce optického vlákna (9) jsou propojeny s optickým kabelem (22), který je dále propojen s vyhodnocovací jednotkou (23) obsahující zdroj (21) světla, detektor (20) a procesor (15).

12. Způsob detekce tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla pomocí uspořádání podle nároku 11, **vyznačující se tím**, že obsahuje následující kroky:

a. přivedení vstupního světelného signálu ze zdroje (21) světla do optického vlákna (9);

b. detekce a zpracování prvního výstupního světelného signálu z optického vlákna (9) vyhodnocovací jednotkou (23) na první výstupní signál, přičemž první výstupní signál odpovídá referenčnímu stavu, kdy kompozitní optovláknový senzor (14) nedetekuje žádnou tlakovou sílu;

c. působení tlakové síly na kompozitní optovláknový senzor (14), čímž je způsoben reverzibilní mikroohyb optického vlákna (9) a pokles intenzity vstupního světelného signálu za vzniku druhého výstupního světelného signálu;

d. detekce a zpracování druhého výstupního světelného signálu z optického vlákna (9) vyhodnocovací jednotkou (23) na druhý výstupní signál, přičemž druhý výstupní signál odpovídá stavu, kdy kompozitní optovláknový senzor (14) detekuje tlakovou sílu; a

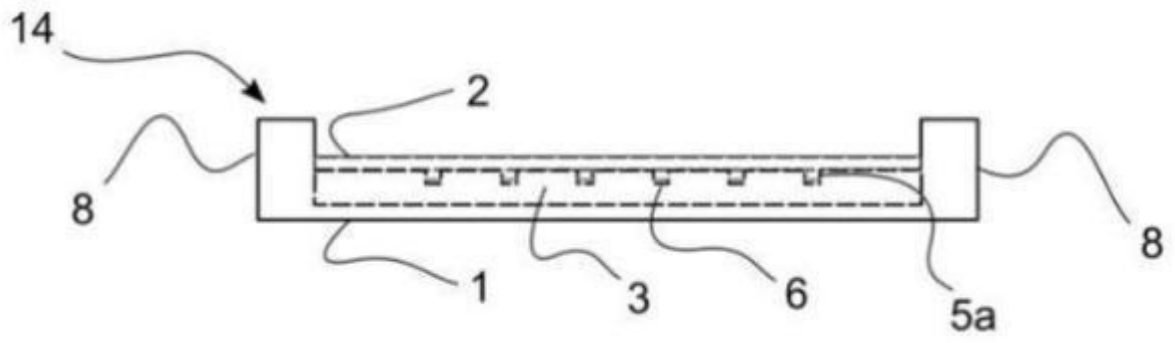
e. srovnání prvního a druhého výstupního signálu a vyhodnocení vyhodnocovací jednotkou (23), zda je detekovaná tlaková síla způsobena průjezdem kola kolejového vozidla.

6 výkresů

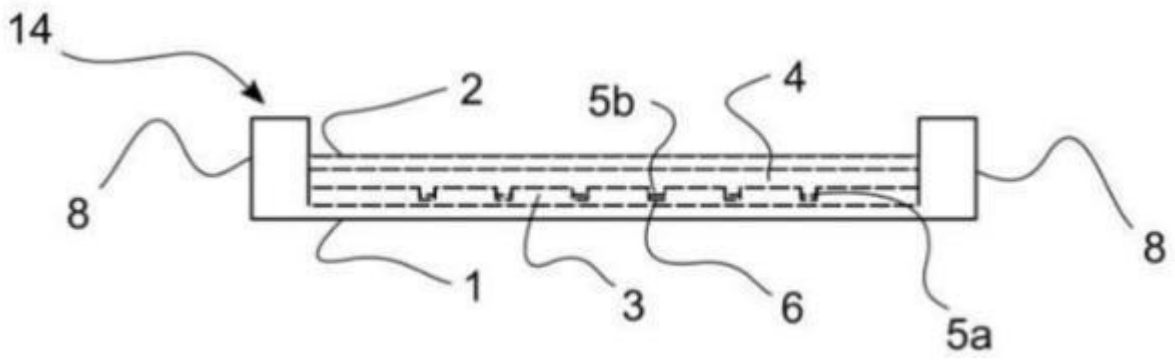
Seznam vztahových značek:

- 1 vrchní část pouzdra
- 2 spodní část pouzdra
- 3 první elasticky deformovatelný člen
- 4 druhý elasticky deformovatelný člen
- 5a první deformační výstupek
- 5b druhý deformační výstupek
- 6 zářez pro optické vlákno
- 7 rozhraní optického vlákna a optického kabelu
- 8 okraj vrchní části
- 9 optické vlákno
- 10 kolejnice
- 11 pata kolejnice
- 12 podkladnice

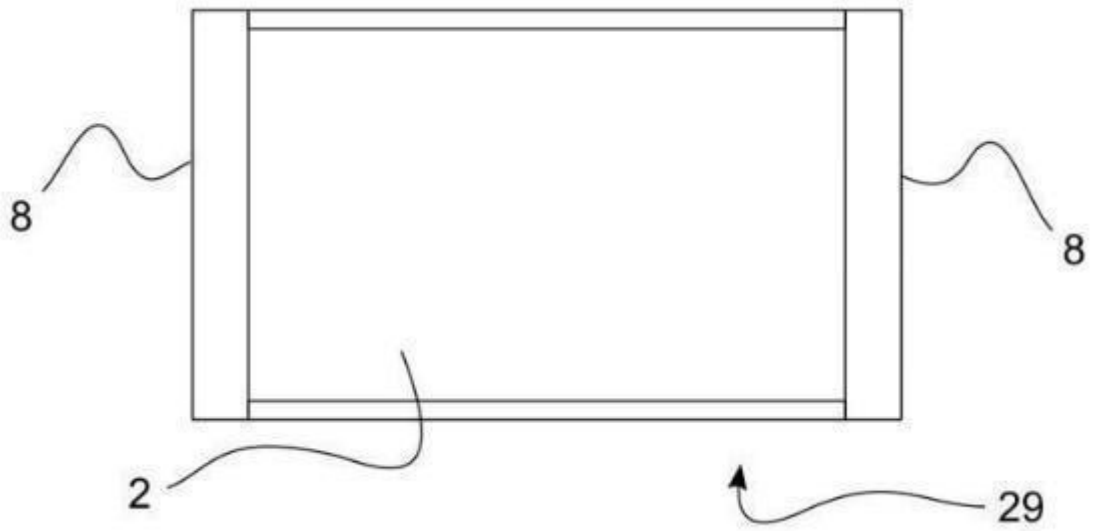
- 13 pražec
- 14 kompozitní optovláknový senzor
- 15 procesor
- 16 A/D převodník
- 17 paměť
- 18 zesilovač
- 19 zdroj elektrické energie
- 20 detektor
- 21 zdroj světla
- 22 optický kabel
- 23 vyhodnocovací jednotka
- 24 indikační výstupy výsledku detekce
- 25 datová linka pro předávání výsledku detekce
- 26 nadřazený systém
- 27 místo vzniku makroohybu
- 28 místo vzniku mikroohybu
- 29 pouzdro



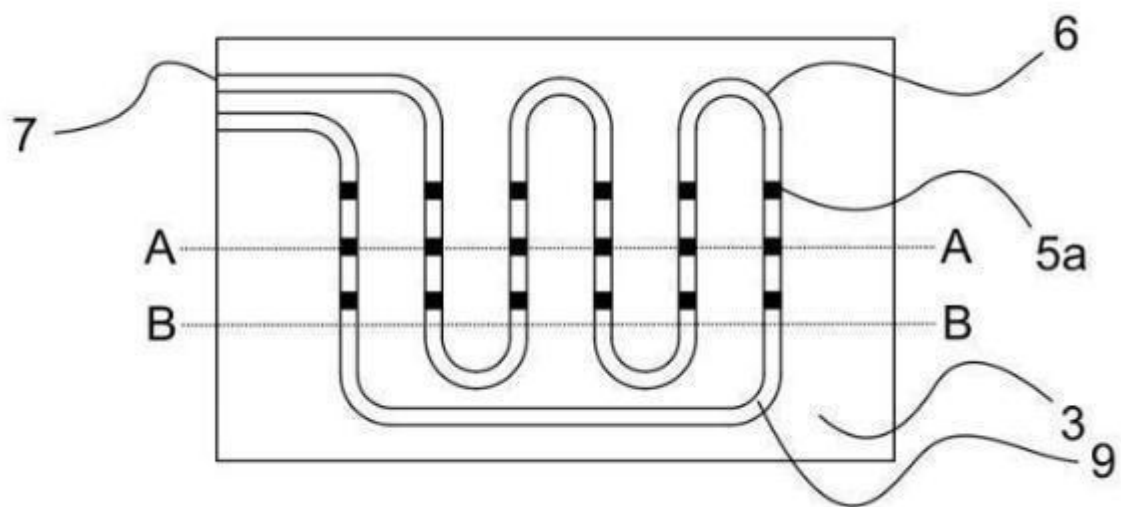
Obr. 1



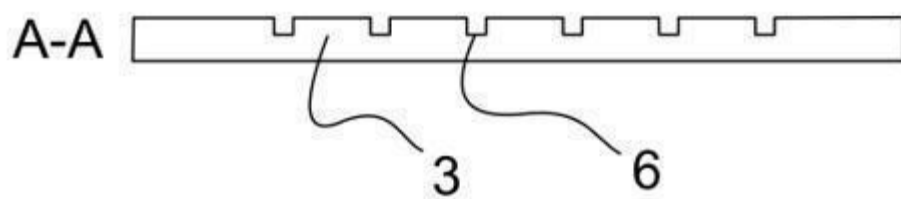
Obr. 2



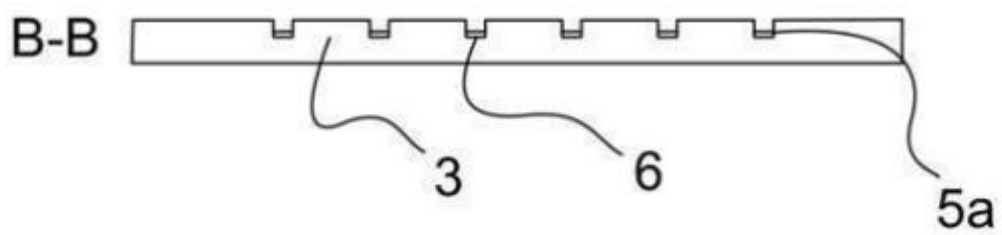
Obr. 3



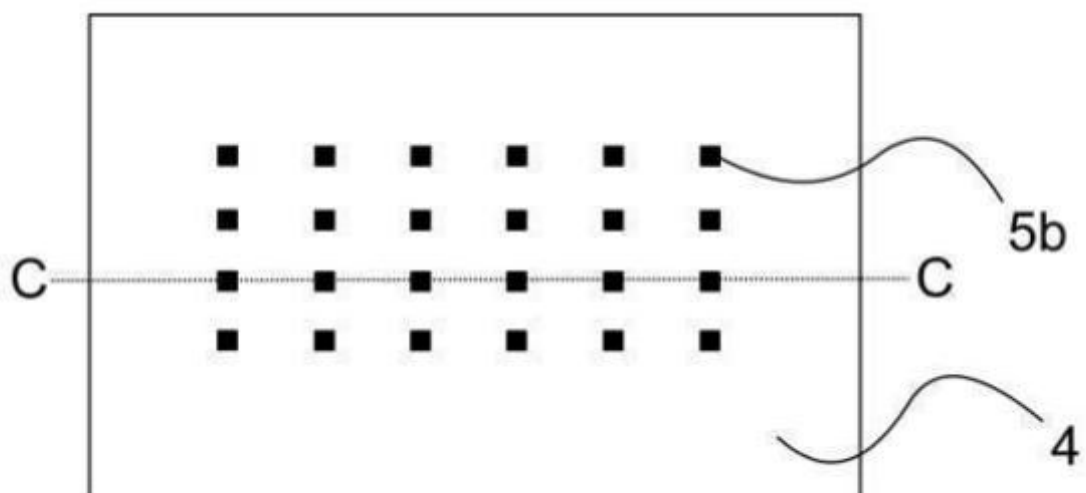
Obr. 4



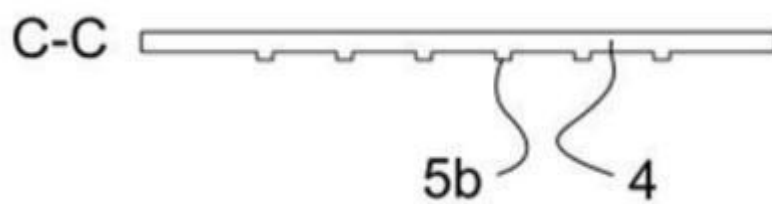
Obr. 5



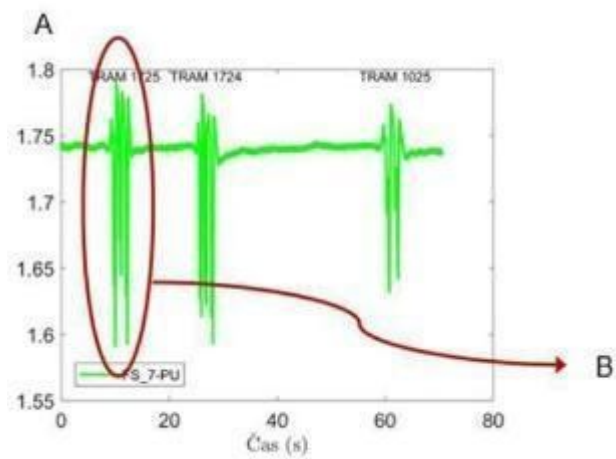
Obr. 6



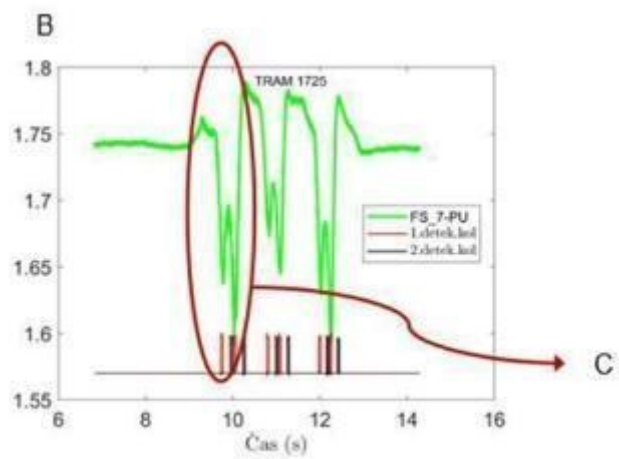
Obr. 7



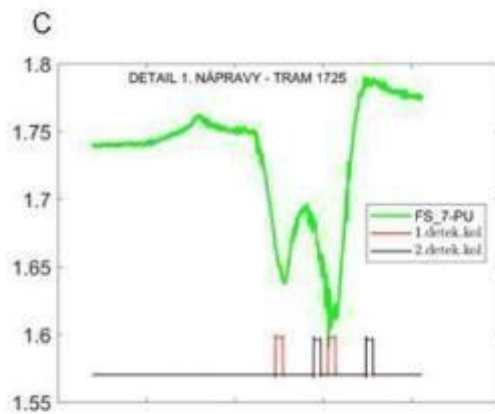
Obr. 8



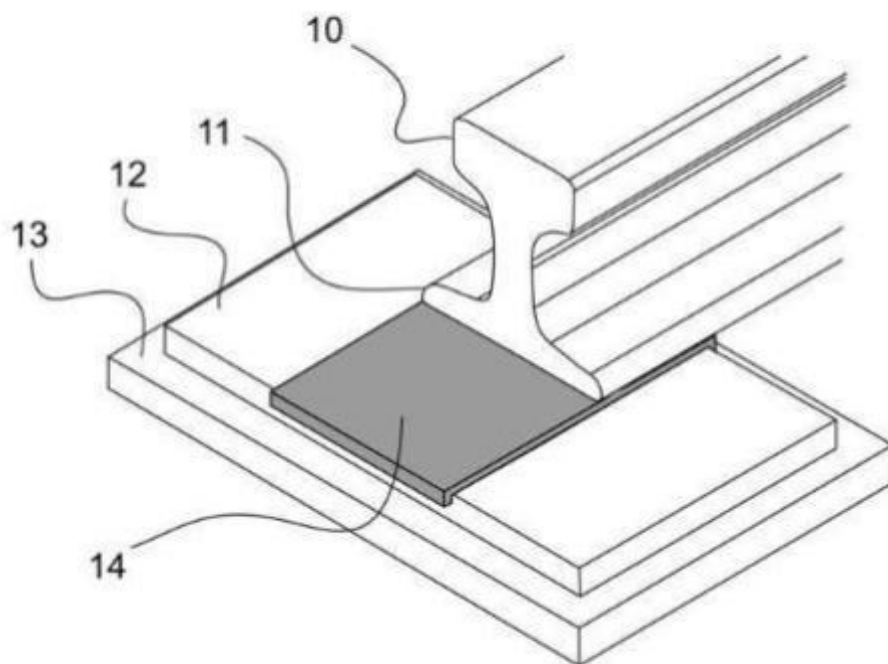
Obr. 9A



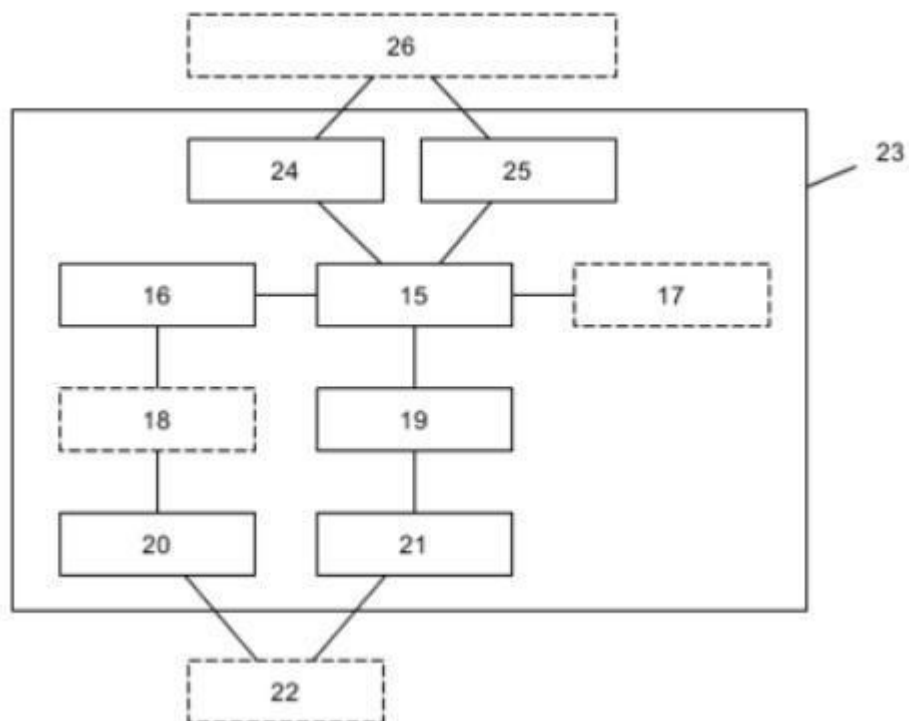
Obr. 9B



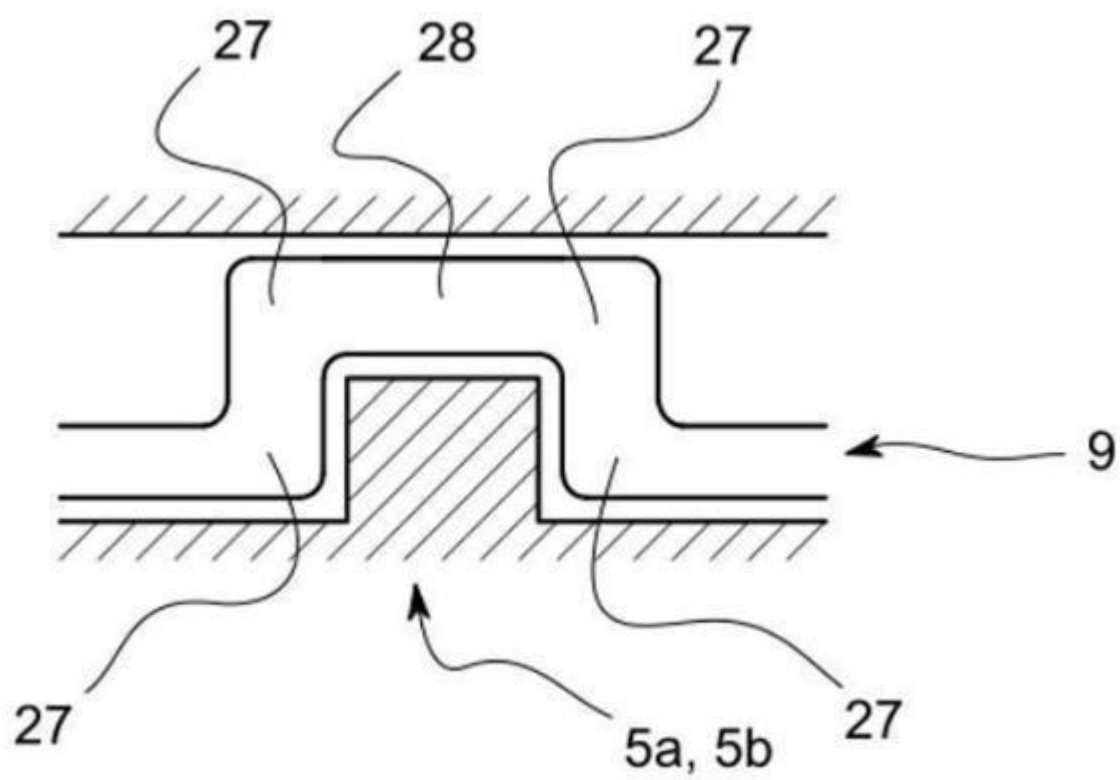
Obr. 9C



Obr. 10



Obr. 11

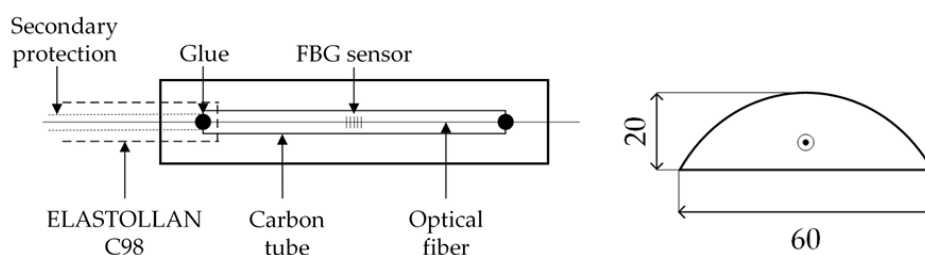


Obr. 12

6.5 Portable optical fiber Bragg grating sensor for monitoring traffic density

Nejvýznamnější výsledky

Tato publikace představuje přenosný optovláknový senzor s Braggovskými mřížkami určený pro monitorování hustoty dopravy. Výsledky ukazují, že senzor lze snadno instalovat a používat v různých dopravních situacích, přičemž poskytuje přesná data o hustotě dopravy s vysokou časovou a prostorovou rozlišitelností. Z pohledu této habilitační práce technické řešení umožní spolehlivější detekci průjezdu automobilů přes železniční přejezdy a tím zvýšení bezpečnosti v železniční dopravě.



Obrázek 6.5: Grafický abstrakt publikace Portable optical fiber Bragg grating sensor for monitoring traffic density.

Hlavní přínosy a závěry

Hlavním přínosem této studie je vývoj přenosného FBG senzoru, který umožňuje flexibilní nasazení v různých dopravních scénářích a poskytuje spolehlivé údaje o dopravní hustotě. Tento senzor přináší inovaci v oblasti monitorování dopravy díky své jednoduché a rychlé instalaci a schopnosti poskytovat data v reálném čase.

Další směřování výzkumu

Navazující výzkum by se měl zaměřit na integraci tohoto přenosného FBG senzoru do širších inteligentních dopravních systémů, minimalizaci rozměrů a doplnění schopnosti rozlišení průjezdů automobilů v jednotlivých jízdních pruzích.

Article

Portable Optical Fiber Bragg Grating Sensor for Monitoring Traffic Density

Michael Fridrich ¹, Marcel Fajkus ^{1,*} , Pavel Mec ², Jan Nedoma ¹ , Michal Kostelansky ¹ and Emil Bednar ¹

¹ Department of Telecommunications, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VSB–Technical University of Ostrava, 708 33 Ostrava, Czech Republic; michael.fridrich@vsb.cz (M.F.); jan.nedoma@vsb.cz (J.N.); michal.kostelansky.st@vsb.cz (M.K.); emil.bednar.st@vsb.cz (E.B.)

² Department of Building Materials and Diagnostics of Structures, Civil Engineering, VSB–Technical University of Ostrava, 708 33 Ostrava, Czech Republic; pavel.mec@vsb.cz

* Correspondence: marcel.fajkus@vsb.cz; Tel.: +420-597-326-057

Received: 14 October 2019; Accepted: 4 November 2019; Published: 9 November 2019



Abstract: The paper examines the development of a portable sensor strip with fiber optic Bragg grating for monitoring urban traffic density up to 80 kph. It contains a 2.5-m-long and a 2-cm-high sensor created from a combination of silicone addition rubber (bicomponent addition silicone rubber) and Bragg grating placed inside a carbon tube. The design of the portable sensor permits traffic density and cars crossings to be monitored and detected in a single lane. The functionality of the sensor was verified in real traffic; the results of this study are based on the detection of 1518 vehicles of different types and sizes. According to the measurements, the sensor is characterized by a high detection rate of 98.946%.

Keywords: Fiber Bragg Grating; optical fiber; portable sensor; car detection; density traffic monitoring

1. Introduction

Traffic sensors are devices that detect input data and information for other transport infrastructure systems. Today, traffic sensors are primarily placed next to, above, into or onto a road's surface. The usual basic parameters measured are detecting the presence of a vehicle, vehicle speed, vehicle classification, wheelbase and number of axles, total vehicle weight, road axle load and occupancy, all of which indicate the traffic flow quality.

1.1. Conventional Types

Inductive loops [1,2] and magnetic sensors [3] are among the most commonly used conventional sensors for car traffic. They are easy to install, accurate and reliable, but limited by difficult placement in reinforced concrete structures and higher repair costs because of the invasive manner in which they are installed in roadways.

Pneumatic sensors [4,5] are also frequently used sensors and measure the pressure change in a pipe laid across a road. They are portable technology and very easily installed, and can measure traffic intensity, occupancy in individual lanes and vehicle speed. Their disadvantage is difficulty in recognizing a stationary or slow-moving vehicle. Another type of sensor is a piezoelectric sensor [6–8], which measures changes in compression in the measuring probe. The voltage generated in the sensor is proportional to the force applied and therefore the respective vehicle weight. Microwave sensors [9,10] are used to measure vehicle speed based on the Doppler effect. However, these sensors are susceptible to electromagnetic interference caused by electromagnetic wave reflections from vehicle bodies, crash

barriers, columns, etc. Closed-circuit television (CCTV) technology provides digitized static images for analysis. Vehicle registration plates can also be identified using CCTV [11].

1.2. Fiber Optic and Optical Sensors

An alternative option for monitoring basic traffic parameters are sensors employing optical fibers, which function on different principles. These sensors offer many significant advantages, such as reliability, accuracy, high sensitivity, electromagnetic and chemical resistance, electrical passivity and a broad temperature operating range. The greatest potential of optical fibers is in hybrid networks for data transmission, frequently in combination with its use as a sensor sensitive to certain measured parameters.

Optical infrared sensor gates work on the principle of transmitting and receiving a laser or infrared beam from an emitter to a receiver [12,13].

Another type is a special fiber optic micro-motion sensor [14], which works on the principle of increasing optical fiber attenuation. The fibers are embedded in special protective covers and built into a roadway. This type of sensor is experimental in nature and not used in general practice.

Other relatively frequently used types are WIM (Weigh-in-Motion) sensors. These are sensors built into roadways for monitoring the load from vehicle wheels and axles, vehicle speed, measuring the distance between axles, measuring vehicle width, etc. This type of sensor [15–18] is often based on different types of fiber-optic interferometers. Due to their high sensitivity, interferometric sensors can also be placed non-destructively next to a road, as described by the authors of [19–21]. It monitors basic parameters, such as traffic density and vehicle speed.

Another technology under discussion today is the DAS (Distributed Acoustic Sensor). DAS technology [22,23] uses a single optical fiber to monitor multiple traffic variables, such as detecting a car, its direction, its speed, etc.

Seim et al. [24] described the use of fiber Bragg grating strain sensors to monitor the health of bridges as well as the means to monitor vehicle traffic patterns and critical data such as speed, weight, and classification of vehicle types.

An invasive method for monitoring selected road traffic parameters which included detecting vehicles and vehicle speed and weight was conducted on the I-84 highway in Portland using five FBG (fiber Bragg grating) sensors installed into the asphalt pavement at a depth of 7 cm [25,26]. Insufficient protection of the FBG sensors resulted in damage to the sensors. The authors successfully solved this problem by adding composite fiber protection to the FBG sensors.

In the study by Al-Tarawneh and Huang [27], Al-Tarawneh et al. [28], a three-dimensional Glass Fiber-Reinforced Polymer packaged Fiber Bragg Grating sensor (3D GFRP-FBG) is introduced for vehicle speed and wheelbase estimation. These sensors were evaluated in practice by installing them into a real roadway. The experimental results of this study achieved a measurement reliability of at least 95%. However, the sensor is relatively complex to manufacture and implement.

Chen et al. [29] presented one of the most recent studies. This paper presents an alternative WIM (Weigh-in-Motion) system to measure a vehicle's velocity, wheelbase and axial and gross weight based only on a single set of long-gauge FBG sensors. The results show that this method can achieve its function with good accuracy under different conditions.

Fiber Bragg sensors are increasingly being used to monitor selected parameters in automotive traffic. Table 1 summarizes the selected types of fiber optic sensors and their parameters.

This study followed up on the trend of expanding fiber optic sensors into the field of automotive traffic monitoring. This publication describes an innovative portable FBG sensor for traffic density monitoring, whose advantages are a high success rate in detecting cars and non-invasive installation onto surfaced areas. The sensor was designed and subsequently evaluated for detecting urban traffic, i.e., in the typical range of values of 10–80 kph. For higher speeds, follow-up research will be conducted.

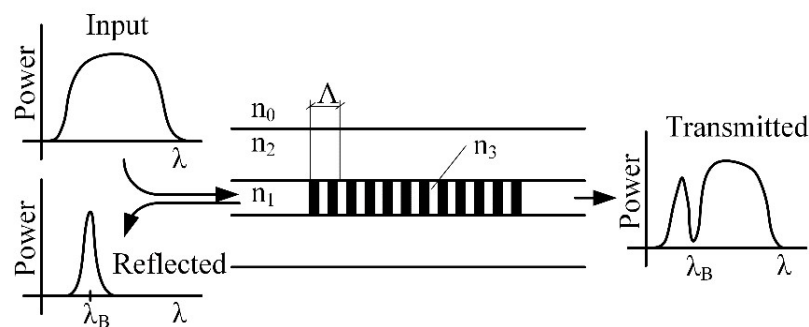
Table 1. Summary of the use of basic types of fiber optic sensors in road transport.

Fiber Optic Technology	Sensor Location	Sensor Fixing Method	Measuring Range	Measured Quantity	Reference
Bragg grating sensors	installed into or onto the road's surface	adhesion, mechanical grips and other protection	almost physical contact with the sensed body	axial, radial deformation	[24–29]
Distributed systems	installed along the road or into the road's surface	adhesion, mechanical grips and other protection	almost physical contact with the sensed body	axial deformation, acoustic and vibration response	[22,23]
Interferometric systems	installed into or onto the road's surface, along the road	adhesion, mechanical grips and other protection	units of meters from the object	acoustic and vibration response, detection of reflection	[15–21]

2. Methods

2.1. Fiber Bragg Grating

Fiber Bragg grating is formed in the optical fiber core by a periodic change of the refractive index. The structure of a uniform Bragg grating in which there are periodically changing layers of the refractive index of core n_1 with a higher refractive index n_3 is shown in Figure 1. The uniform Bragg grating is characterized by a constant size of the induced refractive index $\delta_n = n_3 - n_1$ and a constant period of changes of refractive index.

**Figure 1.** Structure of uniform Bragg grating.

When a broadband spectrum of light passes through the structure of the Bragg grating, selected wavelengths in a narrow part of the spectrum are reflected, while other wavelengths are transmitted. The reflected part of the spectrum is called Bragg wavelength and is expressed by Equation (1):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

where n_{eff} is the effective refractive index defined by the structure of the Bragg grating and Λ is the distance between the periodical changes to the refractive index in the core of the optical fiber [30].

The Bragg wavelength is the geometric and optical properties that change under the influence of mechanical and thermal stresses. The relation of the Bragg wavelength change, the relative deformation and temperature is expressed by Equation (2):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\epsilon + (\alpha_\Delta + \alpha_n) \Delta T, \quad (2)$$

where $\Delta\lambda_B$ is Bragg wavelength shift, k is deformation coefficient, ϵ is deformation, α_Δ is the coefficient of thermal expansion, α_n is the thermo-optic coefficient and ΔT is change of temperature.

The relation in Equation (2) suggests that thermal and deformation sensitivity changes with the absolute value of the Bragg wavelength. With regard to the values of coefficients stated in the

above relations, the standardized deformation coefficient at a constant temperature is expressed by Equation (3):

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\epsilon} = 0.78 \cdot 10^{-6} \text{ } \mu\text{strain}^{-1}, \quad (3)$$

and a standardized deformation coefficient at a constant deformation is expressed by Equation (4):

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 6.678 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (4)$$

The uniform Bragg grating has a deformation sensitivity of 1.2 pm/ μstrain and a temperature sensitivity of 10.3 pm/ $^\circ\text{C}$ at a wavelength of 1550 nm [31].

2.2. Design and Realization of Portable FBG Sensor

In the Introduction, we summarize the current approaches to using fiber Bragg grating sensors for road traffic monitoring. Against the presented research [25–29], where an invasive installation of sensors into the road is necessary, we focused on the design of a portable sensor that can be installed non-invasively on the road at any place for any time with a focus on urban car traffic.

From the results of research, polymer materials were selected for the portable sensor's design. A polymer in liquid form is a simple solution for encasing optical fibers. In selecting a suitable mold, any desired shape of the resulting sensor can be obtained. The polymer then cures either at either room temperature or raised temperature. Based on experimental measurements with several types of polymers, ZA 50 LT two-component additive rubber (ELCHEMCo, Zruc nad Sazavou, Czech Republic) was selected. This material cures at room temperature. The selection criteria for a suitable polymer included polymer hardness, resistance to passing cars, sensor lifespan and curing temperature. Table 2 summarizes the specification of ZA 50 LT rubber.

Table 2. Properties of ZA 50 LT rubber.

Parameter	Value
Hardness	50 Shore A
Initial viscosity	20,000 mPas
Specific weight after curing	1.22 g/cm ³
Tensile strength	4 N/mm ²
Tear resistance	12 N/mm
Extension	320%
Mixing ratio	1:1

For creating the portable sensor, we used an apodized Bragg grating that was made using the phase mask method at the producer Network group (Brno, Czech Republic). For the production process, we used a standard single-mode optical fiber (ITU-T recommendation G.652) with primary acrylic protection of 250 μm . This type of material and size of protection was used for the recounting at the place of the Bragg grating. The length of Bragg grating itself was 1.6 mm.

The portable sensor strip consisted of an optical fiber Bragg grating with a Bragg wavelength of 1573.158 nm, reflectivity of 94.04% and spectrum width (full width at half maximum, FWHM) of 211 pm. The first prototype of the portable sensor was completed by casting a bare optical fiber with FBG. Manual handling of the portable strip and passing cars created a large deformation of more than 10,000 μstrain . This large deformation exceeded the maximum deformation (5000 μstrain) defined by the manufacturer of the used Bragg gratings (Network group, Brno, Czech Republic). Different types of optical fiber protection tubes (polymer, metal, fiberglass and carbon) were therefore tested to compensate. Testing showed that the most suitable form of protection was a carbon tube with an internal diameter of 0.3 mm and external diameter of 0.7 mm.

Figure 2 shows a scheme of a portable fiber optic sensor with a Bragg grating in a carbon tube, which was subsequently encased in a ZA 50 LT polymer. The length of the sensor was selected according to the width of the car lanes. The criterion for monitoring traffic density was a vehicle passing over the portable strip with at least one wheel in the lane. The minimum width of the local road in the Czech Republic is 2.75 m, and a length of 2.5 m was therefore selected. The width of the active area of the measuring tape is given by the length of the carbon tube, which was 2.35 m long. Outside the active area, sensitivity to a passing car is significantly reduced. The height of the strip was 2 cm, and its width was 6 cm. These values represent a compromise in order to sufficiently protect the FBG sensor while also minimizing the axle load of a passing vehicle.

The optical fiber was pre-stressed by 500 μm in the carbon tube and glued at both ends with a two-component adhesive. A supplying optical fiber with a width of 900 μm and length of 5 m was inserted into a protective ELASTOLLAN C98 polyurethane tube (Gumex, Brno, Czech Republic) along with internal and external protective tubes with outer diameters of 2 mm and 4 mm, respectively, and a wall thickness of 1 mm.

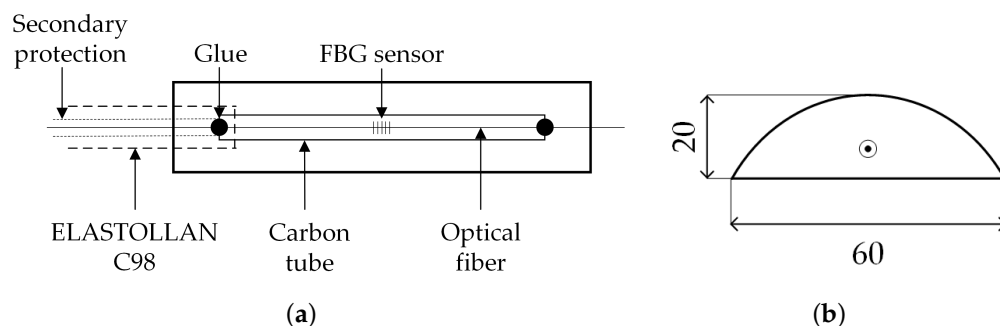


Figure 2. Structure of the portable sensor for monitoring density of automobile traffic density: (a) longitudinal section; and (b) cross-section.

The polymer was then cured at 25 °C for 72 h. The curing process itself caused a shift of the Bragg wavelength from 1573.158 nm to 1573.766 nm (shift to a higher wavelength by 608 pm). This change was very small and had no effect on the functionality of the Bragg gratings.

A semi-cylindrical shape was selected for the sensor in order to eliminate the impact of a passing car as much as possible and to maximize the comfort and safety of vehicle passengers in traffic. A photo of the FBG measuring sensor is shown in Figure 3.



Figure 3. Portable measuring FBG sensor.

According to Equation (2), the Bragg gratings in the portable strip is sensitive to both mechanical deformation and temperature. The signal from the FBG sensor will therefore fluctuate with ambient temperature during real measurements. The temperature sensitivity of the FBG portable sensor is $13.3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. The sensitivity of the portable sensor is higher than that of the bare Bragg grating, which is due to the higher thermal expansion coefficient of the ZA 50 LT polymer compared to the quartz glass the fiber is made of.

3. Experimental Measurement of Transport Vehicles

Figure 4 shows the measuring scheme that was used to monitor traffic density.

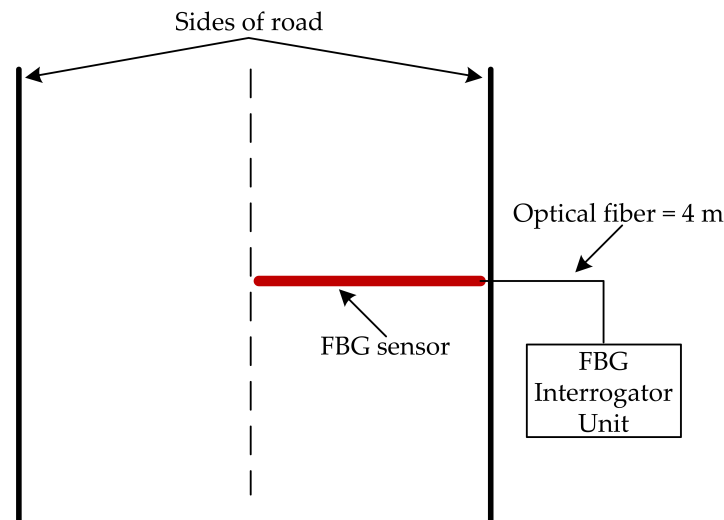


Figure 4. Measuring scheme of experimental setup.

The measuring station comprised an FBG sensor, which was connected to an FBG interrogator unit entitled FBGuard Fast 1550 (Safibra, Prague, Czech Republic) through a fiber optic cable. This unit contained a wide-spectrum radiation source with an output power of 1 mW and an output spectral characteristic of 1510–1580 nm. The reflected light from the FBG sensor was guided through a diffraction grating to a CCD field that converted the light spectrum into an electric signal. The unit featured a spectral domain resolution of 1 pm and a maximum sampling rate of 10 kS/s, making it possible to measure very small and fast processes. Part of the device was also a computing unit that sent measured data from the FBG sensor in real-time over ethernet to a user's computer. At this point, the collected data were processed in the Matlab environment.

The signal from the FBG sensor was filtered by a high-pass filter (Butterworth fourth order) with a cut-off frequency of 0.4 Hz in order to remove the slow component corresponding to the fluctuation of ambient temperature. The peaks (individual car axles) were then identified in the signal and individual car passes were detected.

3.1. Traffic Density Monitoring

Traffic density monitoring involved two experimental measurements. In the first measurements, a location with lower traffic density in a quiet suburban part of Ostrava was selected in order to verify the basic functionality of the sensor (this location mainly has passenger vehicle traffic). After successfully analyzing the measured data, a second, comprehensive set of measurements was conducted at a location with more frequent traffic in order to detect cars of different types and sizes (at the main entrance to the VSB-TUO premises).

3.1.1. Traffic Density on a Suburban Road

The portable strip was first tested on a street in a built-up area with family houses in the suburban district of Ostrava (Czech Republic) (GPS: 49°50'03.3" N 18°07'25.9" E). Measurements were conducted for 7 h (between 10:00 and 17:00). The sensor measurements recorded the time of passing, type of car (passenger, truck, trailer) and number of axles. All instances of passes were also manually recorded.

The portable sensor strip was placed on the outer edge of the road, which had a width of 5.125 m (Figure 5). The road was narrowed during the measurements with warning triangles so that cars passing in both directions would be forced to pass over the measuring strip. The reason for narrowing the road during measurement was to obtain relevant information about the total traffic density on the local road.



Figure 5. Example of measuring station in suburban part of Ostrava.

Figure 6 shows an example of a car detection response at 50 kph. This particular speed was selected because it represents the legal maximum speed limit in cities in the Czech Republic.

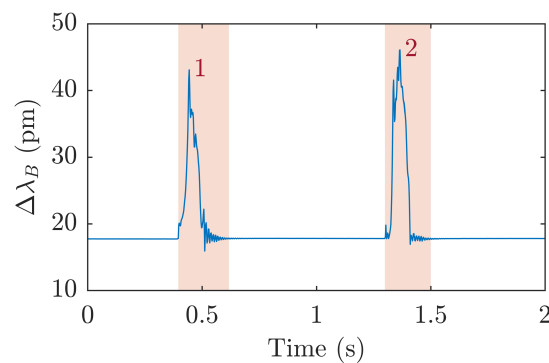


Figure 6. The response of a car crossing over a 50 kph speed sensor strip.

The dynamic response of the portable sensor is high enough that the individual axles (shown in Figure 6) of the car can be distinguished. The sensor's typical response to a passing car is in the range of 10–1000 pm, depending on the vehicle's passing speed, the point on the portable strip where it passes and its weight.

According to the manual record, 140 passenger cars passed in the hours from 10:00 to 17:00. The sensor strip detected 139 cars correctly. One passing vehicle was not detected. In another five cases, the sensor incorrectly detected a passing car (false positive). This error was caused by pedestrians and cyclists crossing the sensor. The overall efficiency of detecting cars was 99.286%. The density of operation at hourly intervals is shown in Figure 7.

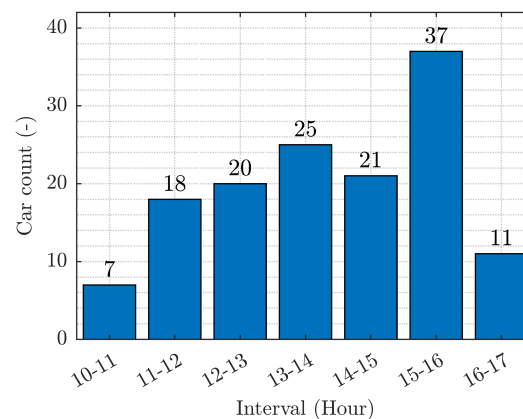


Figure 7. Traffic density on the local road between 10:00 and 17:00.

3.1.2. Traffic Density at the Main Entrance to the VSB-TUO Campus

Traffic density was measured at the main entrance to the VSB-Technical University of Ostrava (GPS: 49°49'50.1" N 18°09'38.1" E). Measurements were conducted over 12 h (from 06:00 to 18:00). Sensor measurements recorded the crossing time, type of car (passenger, truck, or trailer) and the number of axles. All instances of passes were also manually recorded.

The portable strip was placed in the center of the road, which had a width of 5.55 m, so that passing cars in both directions always approached the sensor strip with at least one side of the vehicle. The placement of the sensor is shown in Figure 8.



Figure 8. Measuring station at the entrance to the VSB-TUO campus.

Figure 9a shows a passing passenger car, Figure 9b shows a passenger car with a two-axle trailer and Figure 9c shows a three-axle truck. Distinguishing individual axles makes it possible to differentiate each pass with respect to the time intervals between individual axles and thus allow traffic density to be calculated.

A total of 1518 cars passed during the measurement period (1515 passenger cars, 2 passenger cars with a two-axle trailer and 1 truck with three axles). Only 1502 cars were correctly detected using the sensor strip. The remaining 16 passes were not detected because the vehicles passed the sensor strip outside the active area. The overall efficiency of detecting cars was 98.946%. The density of operation at hourly intervals is shown in Figure 10.

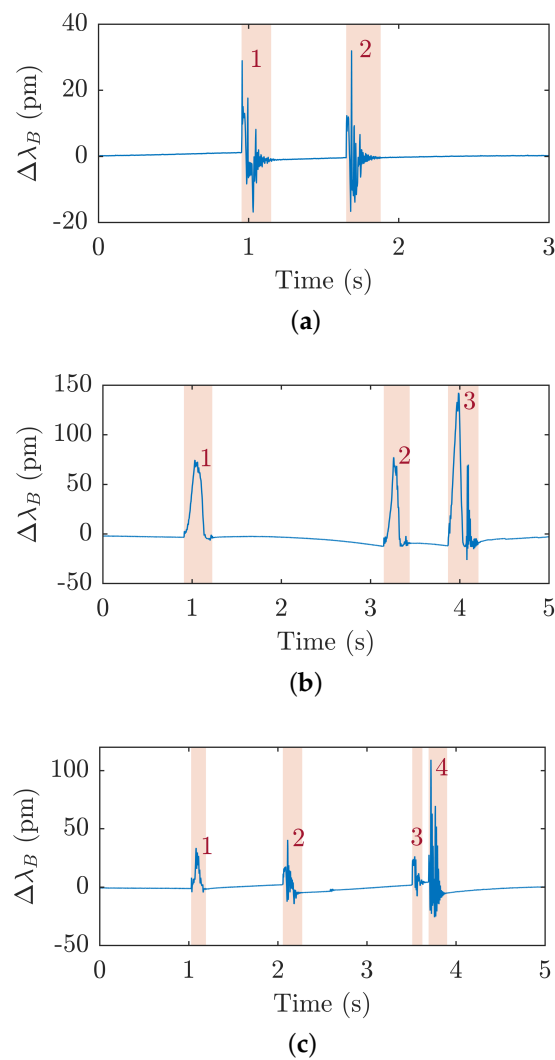


Figure 9. The response of the FBG portable sensor to a passing passenger car (a); a passenger car with a two-axle trailer (b); and a three-axle truck (c).

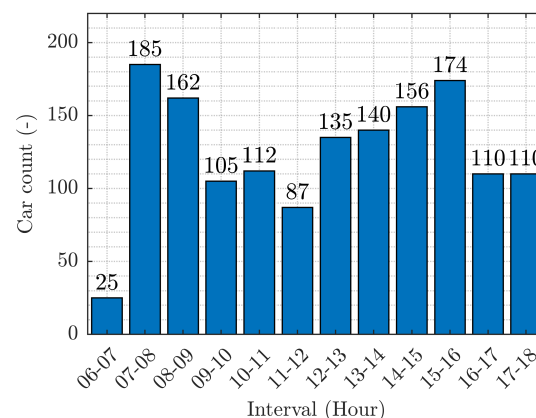


Figure 10. Traffic density at the main entrance to the VSB-TUO site between 06:00 and 18:00.

Traffic density measurements for passing cars were analyzed using binary classification (whether a significant point falls under True Positive (TP), False Positive (FP) or False Negative (FN)) [32]. By determining TP, FP and FN, the Sensitivity (SE), Accuracy (ACC), Positive Predictive Value (PPV), Harmonic Means of Precision and Sensitivity (F1) and False Negative Rate (FNR) can be calculated [33].

$$SE = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (5)$$

$$ACC = \frac{TP}{TP + FP + FN}, \quad (6)$$

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (7)$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{PPV \cdot Se}{PPV + Se} = 2 \cdot \frac{TP}{2 \cdot TP + FP + FN}, \quad (8)$$

$$FNR = \frac{FN}{FN + TP}. \quad (9)$$

The results of the statistics are summarized in Table 3.

Table 3. Classification analysis of detected car passes.

	Local Road	Campus VSB-TUO
N	140	1518
TP	139	1502
FP	5	40
FN	1	16
SE (%)	99.286	98.946
ACC (%)	95.862	96.405
PPV (%)	96.528	97.406
F1 (%)	97.887	98.170
FNR (%)	0.714	1.054

4. Conclusions

This paper examines the design, production and experimental verification of the functionality of a portable measuring sensor created from a combination of silicone rubber and a fiber Bragg grating placed inside a carbon tube. The selected encasing method did not affect the functionality of the Bragg gratings. Due to the silicone rubber curing, the Bragg wavelength was shifted 608 pm higher. The rubber material alone caused an increase in temperature sensitivity to 13.3 pm/°C.

The sensor was created and designed to measure selected parameters in traffic. Experimental measurements were conducted in real traffic. Initial measurements were conducted in a quiet suburban part of Ostrava over 7 h. A total of 140 cars passed during this experiment and resulted in a successful detection rate of 99.286% (139 cars). A second, comprehensive experiment was conducted at the main entrance to the VSB-TUO campus over 12 h (from 06:00 to 18:00). During this set of measurements, 1502 vehicles were successfully detected from a total of 1518 (detection success rate of 98.946%).

The sensor's high sensitivity and success rate in detecting cars is a good prerequisite for expanding research and development into this portable sensor for monitoring automotive traffic. Follow-up research will be done to improve the design in order to achieve a more stable sensitivity in the sensor over its entire active length. This should increase the sensor's success rate in detecting vehicles. Another objective is to extend the detection capabilities of the sensor, as driving direction and vehicle speed are important parameters in monitoring traffic density. The team of authors are also striving to design the sensor for year-round use. Any follow-up research will therefore also focus on verifying functionality during winter climatic conditions with a continuous layer of snow.

Author Contributions: M.F. (Michael Fridrich), and M.F. (Marcel Fajkus) proposed the systems idea and edited the manuscript. M.F. (Michael Fridrich), M.F. (Marcel Fajkus), P.M., J.N., M.K., and E.B. developed, tested and validated data. M.F. (Michael Fridrich), M.F. (Marcel Fajkus), J.N. and M.K. wrote the manuscript. M.F. (Michael Fridrich), M.F. (Marcel Fajkus), and J.N. critically evaluated the quality of the research data and experimental methods used to generate/acquire them as well as the soundness/validity of the scientific and engineering techniques, wrote the manuscript, and performed its final edits.

Funding: The paper was funded with support of conceptual development of science, research and innovation in 2018, assigned to VSB-Technical University of Ostrava, The Ministry of Education, Youth and Sports in the Czech Republic. This article was supported by the Ministry of Education of the Czech Republic (Project No. SP2019/79). This article was also supported by the European Regional Development Fund in the Research Centre of Advanced Mechatronic Systems project, project number CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000867 within the Operational Programme Research, Development and Education. This work was supported by the European Regional Development Fund in Research Platform focused on Industry 4.0 and Robotics in Ostrava project, CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008425 within the Operational Programme Research, Development and Education. This research was partially supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic through the grant project No. CZ.1.07/2.3.00/20.0217 within the frame of the operation program Education for Competitiveness financed by the European Structural Funds and from the state budget of the Czech Republic.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Lu, X.Y.; Varaiya, P.; Horowitz, R.; Guo, Z.; Palen, J. Estimating traffic speed with single inductive loop event data. *Transp. Res. Rec.* **2012**, *2308*, 157–166, doi:10.3141/2308-17. [[CrossRef](#)]
2. Cherrett, T.; Bell, H.; McDonald, M. Estimating vehicle speed using single inductive loop detectors. *Proc. Inst. Civ. Eng. Transp.* **2001**, *147*, 23–32, doi:10.1680/tran.2001.147.1.23. [[CrossRef](#)]
3. Markevicius, V.; Navikas, D.; Zilys, M.; Andriukaitis, D.; Valinevicius, A.; Cepenas, M. Dynamic vehicle detection via the use of magnetic field sensors. *Sensors* **2016**, *16*, 78, doi:10.3390/s16010078. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Zheng, P.; Mike, M. An Investigation on the Manual Traffic Count Accuracy. *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2012**, *43*, 226–231, doi:10.1016/j.sbspro.2012.04.095. [[CrossRef](#)]
5. McGowen, P.; Sanderson, M. Accuracy of pneumatic road tube counters. In Proceedings of the 2011 Western District Annual Meeting, Anchorage, AK, USA, 26–28 June 2011; pp. 10–13.
6. Guido, G.; Gallelli, V.; Rogano, D.; Vitale, A. Evaluating the accuracy of vehicle tracking data obtained from Unmanned Aerial Vehicles. *Int. J. Transp. Sci. Technol.* **2016**, *5*, 136–151, doi:10.1016/j.ijtst.2016.12.001. [[CrossRef](#)]
7. Xu, D.; Huang, S.; Lei, Q.; Cheng, X. Preparation, properties and application research of piezoelectric traffic sensors. *Procedia Eng.* **2012**, *27*, 269–280, doi:10.1016/j.proeng.2011.12.453. [[CrossRef](#)]
8. Bhalla, S.; Deb, S.K. A cost-effective approach for traffic monitoring using piezo-transducers. *Exp. Tech.* **2011**, *35*, 30–34, doi:10.1111/j.1747-1567.2010.00645.x. [[CrossRef](#)]
9. Heide, P.; Schubert, R.; Mágori, V.; Schwarte, R. A high performance multisensor system for precise vehicle ground speed measurement. *Microw. J.* **1996**, *39*, 22–34,
10. Nguyen, V.C.; Dinh, D.K.; Le, V.A.; Nguyen, V.D. Length and speed detection using microwave motion sensor. In Proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hanoi, Vietnam, 15–17 October 2015; pp. 371–376, doi:10.1109/ATC.2014.7043414. [[CrossRef](#)]
11. Zhang, D.; He, J. Super-resolution reconstruction of low-resolution vehicle plates: A comparative study and a new algorithm. In Proceedings of the 2014 7th International Congress on Image and Signal Processing, CISP 2014, Dalian, Chin, 14–16 October 2014; pp. 359–364, doi:10.1109/CISP.2014.7003806. [[CrossRef](#)]
12. Ai, H.; Zheng, Y. Characterization of a traffic management system using pyroelectric infrared sensors. *Instrum. Sci. Technol.* **2015**, *43*, 319–333, doi:10.1080/10739149.2014.1002040. [[CrossRef](#)]
13. Rivas-Lopez, M.; Gomez-Sanchez, C.A.; Rivera-Castillo, J.; Sergiyenko, O.; Flores-Fuentes, W.; Rodriguez-Quinonez, J.C.; Mayorga-Ortiz, P. Vehicle detection using an infrared light emitter and a photodiode as visualization system. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Buzios, Brazil, 3–5 June 2015; pp. 972–975, doi:10.1109/ISIE.2015.7281603. [[CrossRef](#)]
14. Suopajarvi, P.; Pennala, R.; Heikkinen, M.; Karioja, P.; Lyöri, V.; Myllylä, R.; Nissilä, S.; Kopola, H.; Suni, H. Fibre optic sensors for traffic monitoring applications. In Proceedings of the Smart Structures and Materials 1998: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, San Diego, CA, USA, 1–5 March 1998; Volume 3325, pp. 222–229, doi:10.1117/12.310611. [[CrossRef](#)]
15. Donlagic, D.; Hanč, M. Vehicle axle detector for roadways based on fiber optic interferometer. In Proceedings of the Smart Structures and Materials 2003: Smart Sensor Technology and Measurement Systems, San Diego, CA, USA, 3–6 March 2003; Volume 5050, pp. 317–321, doi:10.1117/12.484261. [[CrossRef](#)]

16. Donlagić, D.; Hanč, M. A simple fiber-optic vehicle axle detector for roadways. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2003**, *52*, 401–405, doi:10.1109/TVT.2003.808754. [\[CrossRef\]](#)
17. Feng, L.L.; Wang, Y.T.; Ruan, C.; Tao, S. Road vehicle information collection system based on distributed fiber optics sensor. *Adv. Mater. Res.* **2014**, *1030–1032*, 2105–2109, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.2105. [\[CrossRef\]](#)
18. Chen, S.Z.; Wu, G.; Feng, D.C. Development of a bridge weigh-in-motion method considering the presence of multiple vehicles. *Eng. Struct.* **2019**, *191*, 724–739, doi:10.1016/j.engstruct.2019.04.095. [\[CrossRef\]](#)
19. Stolarik, M.; Nedoma, J. Fiber-optic interferometric sensor for dynamic impact measurement of transport trucks. *Int. J. Eng. Res. Afr.* **2019**, *42*, 34–46, doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.42.34. [\[CrossRef\]](#)
20. Nedoma, J.; Fajkus, M.; Kahankova, R.; Martinek, R.; Dvorsky, M.; Vanus, J.; Vasinek, V.; Cvejn, D. Fiber-optic interferometric sensor for monitoring automobile and rail traffic. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* **2018**, *26*, 2986–2995, doi:10.3906/elk-1712-166. [\[CrossRef\]](#)
21. Nedoma, J.; Fajkus, M.; Martinek, R.; Vanus, J.; Kepak, S.; Kahankova, R.; Jaros, R.; Cvejn, D.; Prauzek, M. Analysis of the use of fiber-optic sensors in the road traffic. *IFAC-PapersOnLine* **2018**, *51*, 420–425, doi:10.1016/j.ifacol.2018.07.117. [\[CrossRef\]](#)
22. Hill, D. Distributed Acoustic Sensing (DAS): Theory and Applications. In Proceedings of the Frontiers in Optics 2015, San Jose, CA, USA, 18–22 October 2015; Optical Society of America: Washington, DC, USA, 2015; p. FTh4E.1, doi:10.1364/FIO.2015.FTh4E.1. [\[CrossRef\]](#)
23. Duckworth, G.L. Distributed sensing applications of rayleigh scattering in fiber optic cables. In Proceedings of the Optics InfoBase Conference Papers, Arlington, VA, USA, 23–27 June 2013.
24. Seim, J.; Udd, E.; Schulz, W.; MacMahon, R.; Soltesz, S.; Laylor, M. Development and deployment of fiber optic highway and bridge monitoring systems. In Proceedings of the Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV, Newport Beach, CA, USA, 6–8 March 2000; Volume 3995, pp. 479–482.
25. Kunzler, M.; Edgar, R.; Udd, E.; Taylor, T.; Schulz, W.L.; Kunzler, W.; Soltesz, S.M. Fiber grating traffic monitoring systems. In Proceedings of the Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, San Diego, CA, USA, 17–21 March 2002; Liu, S.C., Pines, D.J., Eds.; International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA, 2002; Volume 4696, pp. 238–243, doi:10.1117/12.472559. [\[CrossRef\]](#)
26. Kunzler, M.; Udd, E.; Taylor, T.; Kunzler, W. 2nd Generation Fiber Grating Traffic Monitoring Systems on the I-84 Freeway. In Proceedings of the Smart Structures and Materials 2003: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, San Diego, CA, USA, 2–6 March 2003; Volume 5054, pp. 230–239, doi:10.1117/12.483693. [\[CrossRef\]](#)
27. Al-Tarawneh, M.; Huang, Y. In-pavement fiber Bragg grating sensor for vehicle speed and wheelbase estimation. In Proceedings of the Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, Denver, CO, USA, 5–8 March 2018; Volume 10598, pp. 580–588, doi:10.1117/12.2295624. [\[CrossRef\]](#)
28. Al-Tarawneh, M.; Huang, Y.; Lu, P.; Tolliver, D. Vehicle Classification System Using In-Pavement Fiber Bragg Grating Sensors. *IEEE Sens. J.* **2018**, *18*, 2807–2815, doi:10.1109/JSEN.2018.2803618. [\[CrossRef\]](#)
29. Chen, S.Z.; Wu, G.; Feng, D.C.; Zhang, L. Development of a Bridge Weigh-in-Motion System Based on Long-Gauge Fiber Bragg Grating Sensors. *J. Bridge Eng.* **2018**, *23*, 4018063, doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001283. [\[CrossRef\]](#)
30. Othonos, A. Fiber Bragg gratings. *Rev. Sci. Instrum.* **1997**, *68*, 4309–4341, doi:10.1063/1.1148392. [\[CrossRef\]](#)
31. Kersey, A.D.; Davis, M.A.; Patrick, H.J.; LeBlanc, M.; Koo, K.P.; Askins, C.G.; Putnam, M.A.; Friebele, E.J. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.* **1997**, *15*, 1442–1462, doi:10.1109/50.618377. [\[CrossRef\]](#)
32. Unler, A.; Murat, A. A discrete particle swarm optimization method for feature selection in binary classification problems. *Eur. J. Oper. Res.* **2010**, *206*, 528–539, doi:10.1016/j.ejor.2010.02.032. [\[CrossRef\]](#)
33. Trevethan, R. Sensitivity, Specificity, and Predictive Values: Foundations, Plabilities, and Pitfalls in Research and Practice. *Front. Public Health* **2017**, *5*, doi:10.3389/fpubh.2017.00307. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)



7 Pedagogická a vědeckovýzkumná činnost

7.1 Pedagogická činnost

Od roku 2011 se autor na Katedře telekomunikační techniky aktivně věnuje výuce v oblasti fotoniky, optických sítí a digitálních systémů. Aktuálně garantuje dva předměty a podílí se na výuce dalších předmětů, kde vede cvičení. Od roku 2012 pravidelně vede bakalářské a diplomové práce a od roku 2018 se účastní státních závěrečných zkoušek jako člen komise.

7.1.1 Výuka

Garantované předměty

- 440-2104/01 Základy digitálních systémů (vedení přednášek a cvičení)
- 440-2209/01 Základy fotoniky (vedení přednášek a cvičení)

Vyučované předměty

- 440-2104/01 Optické komunikace III (vedení cvičení)
- 440-2209/01 Fyzika I (vedení cvičení)
- 440-4108/01 Měření v optoelektronice a optických komunikacích (vedení cvičení)
- 440-2102/01 Logické obvody (vedení cvičení)

7.1.2 Závěrečné práce

Bakalářské a diplomové práce vedené autorem práce se zaměřují na výzkum a aplikace optovláknových senzorů, zejména Braggovských mřížek, v různých oblastech. Hlavní důraz byl kladen na návrh, realizaci a optimalizaci těchto senzorů pro specifické aplikace, jako je měření fyzikálních veličin, monitorování dopravních systémů, monitorování vitálních funkcí lidského těla nebo zabezpečovací systémy.

- Úspěšně obhájené bakalářské práce 13×
- Úspěšně obhájené diplomové práce 5×

7.2 Vědeckovýzkumná činnost

7.2.1 Publikační výsledky

V databázi SCOPUS je indexováno celkem 149 publikací (z toho 50 časopiseckých) a v databázi Web of Science (WoS) 138 publikací (z toho 47 časopiseckých). Rozdělení publikací podle kvartilů resp. decilů je uvedeno v tabulce 4 resp. 5. Citační ohlas včetně h-indexu je uveden v tabulce 6. Uvedené informace jsou platné ke dni 21.8.2024.

Tabulka 4: Počet článků v časopisech a jejich umístění v kvartile dle průměrného pořadí v oborech podle univerzitního nástroje <https://db.cs.vsb.cz/scis/journals/search>.

Kvartil	Q1	Q2	Q3	Q4
SCOPUS	12	14	20	4
WoS	6	15	0	8

Tabulka 5: Počet článků v časopisech a jejich umístění v decilech dle průměrného pořadí v oborech podle univerzitního nástroje <https://db.cs.vsb.cz/scis/journals/search>.

Kvartil	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
SCOPUS	3	6	3	9	5	2	11	11	0	0
WoS	2	4	6	9	0	0	0	0	4	4

Tabulka 6: Citační ohlas autora a h-index.

	Citace		h-index	
	Celkové	Bez autocitací	Celkový	Bez autocitací
SCOPUS	1480	892	20	15
WoS	943	627	16	-
Google Scholar	1760	-	21	-

7.2.2 Aplikované výsledky

Celkový počet aplikovaných výsledků je 27, rozdělení do jednotlivých kategorií je v tabulce 7. Uvedené informace jsou platné ke dni 21.8.2024.

Tabulka 7: Aplikované výsledky autora

Aplikovaný výsledek	Počet	Z toho licencovaných
Platný národní patent	9	2
Platný užitný vzor	9	0
Funkční vzorek	6	0
Poloprovoz	1	0

7.2.3 Granty

Celkový počet grantů, ve kterých byl autor zapojen ke dni 9.8.2024 je 31, z toho 4×TAČR, 4×MPO, 2×MVČR, 2×MŠMT a 19×interní VŠB-TUO typu studentské grantové soutěže (SGS).

Zapojení v národních projektech jako hlavní řešitel

- TAČR DOPRAVA 2020+ (CK01000098) Unikátní vláknově optický senzor pro detekci kolejových vozidel, 2020–2023

Zapojení v národních projektech jako člen řešitelského týmu

- MPO (FV10396) SIDAS – Systém inteligentní detekce a signalizace kolizních stavů pro zvýšení traťové bezpečnosti, 2016–2019
- TAČR TREND (FW10010028) Smart inovace monitoringu napětí v progresivních geotechnických aplikacích fotonickými systémy, 2024-2026
- MPO (FV20581) – Zařízení pro měření a zpracování biosignálů s využitím optovláknových senzorů, 2017–2020
- TAČR TREND (FW03010207) Monitorování parametrů odstřelů malého a velkého rozsahu optovláknovými senzory, 2021–2023
- MVČR (VI2VS/444) Inteligentní technické textilie pro zvýšení bezpečnosti kritických infrastruktur, 2017–2020
- TAČR GAMA 2 PP1 (TP01010036), Komplexní systém automatického rozpoznání a klasifikace plochých kol v kolejové dopravě, 2020
- MPO OPTAK PRODO CZ.01.01.01/01/22_002/0000545, Stavebnicový systém nové generace pro efektivní výstavbu dřevostaveb, 2023-2025
- MPO OP PIK (CZ.01.1.02/0.0/0.0/19_262/0020242) Vývoj komplexního senzorického systému pro efektivní řízení snímkování magnetické rezonance, 2020–2022
- MŠMT (EF16_019/0000867) Centrum výzkumu pokročilých mechatronických systémů, 2018–2022
- MŠMT (EF17_049/0008425) Platforma pro výzkum orientovaný na Průmysl 4.0 a robotiku v ostravské aglomeraci, 2018–2022
- MVČR (VI20152020008) Komplexní bezpečnost kritických infrastruktur a objektů řešená optovláknovými senzory s užitím moderních informačních systémů, 2015–2020

Vlastní reference

- [A1] Marcel Fajkus, Jan Nedoma, Stanislav Kepak, Lukas Rapant, Radek Martinek, Lukas Bednarek, Martin Novak, and Vladimir Vasinek. Mathematical model of optimized design of multi-point sensoric measurement with bragg gratings using wavelength division multiplex. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9889, 2016. Cited by: 28.
- [A2] M. Fajkus, P. Kovar, J. Skapa, J. Nedoma, R. Martinek, and V. Vasinek. Design of fiber bragg grating sensor networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 2022. cited By 7.
- [A3] M. Fajkus, M. Novak, J. Nedoma, E. Hrubesova, P. Mec, and R. Martinek. Parameter analysis of a pair of bragg gratings with overlapping spectra for power measurement of small deformations. *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*, 13:168–174, 2019. cited By 3.
- [A4] M. Fajkus, M. Fridrich, M. Kostelansky, and E. Bednar. Optovláknový vibrační snímač. Užitený vzor č. 36640 zapsán na ÚPV dne 14.12.2022. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/40289&plang=CS.
- [A5] M. Papes, J. Jaros, M. Fajkus, J. Hurta, A. Liner, D. Hruby, and V. Vasinek. Concrete deflection measurement using fiber optic distributed strain system. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9659, 2015. cited By 5.
- [A6] M. Fajkus, J. Nedoma, P. Mec, M. Novak, and S. Zabka. Standard optical cables for building structures monitoring with botdr in harsh environments. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10795, 2018.
- [A7] M. Fajkus, J. Nedoma, M. Pinka, P. Mec, M. Novak, and S. Zabka. Deformation sensor composed of fiber bragg grating and the strain gauge for use in civil engineering. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10796, 2018.
- [A8] P. Mec, M. Fajkus, S. Zabka, M. Novak, and R. Jaros. Design of encapsulation of fiber bragg grating for the traffic applications. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 11028, 2019.
- [A9] M. Fajkus, M. Fridrich, J. Nedoma, R. Kahankova, R. Martinek, E. Bednar, and J. Kolarik. Pdms-fbg-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas. *IEEE Access*, 8:127648–127658, 2020. cited By 5.

- [A10] Jan Nedoma, Ondrej Zboril, Marcel Fajkus, Petr Zavodny, Stanislav Kepak, Lukas Bednarek, Radek Martinek, and Vladimir Vasinek. Fiber optic system design for vehicle detection and analysis. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9889, 2016. Cited by: 21.
- [A11] J. Nedoma, M. Fajkus, R. Kahankova, R. Martinek, M. Dvorsky, J. Vanus, V. Vasinek, and D. Cvejn. Fiber-optic interferometric sensor for monitoring automobile and rail traffic. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26:2986–2995, 2018. cited By 13.
- [A12] M. Fridrich, M. Fajkus, M. Kostelansky, and J. Jargus. Mobile fiber-optic bragg sensor for monitoring axles of vehicles in urban traffic. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 12272, 2022.
- [A13] V. Vasinek, J. Nedoma, J. Cubik, S. Kepak, P. Zavodny, R. Martinek, M. Fajkus, and P. Siska. Způsob měření rychlosti v dopravním provozu a nedestruktivní systém pro provádění tohoto způsobu. Patent č. 306992 udělen ÚPV dne 1.11.2017. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/2016-447&plang=CS.
- [A14] V. Vasinek, J. Nedoma, J. Cubik, S. Kepak, P. Zavodny, R. Martinek, M. Fajkus, and P. Siska. Nedestruktivní systém pro měření rychlosti v dopravním provozu. Užitečný vzor č. 30137 zapsán na ÚPV dne 13.12.2016. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/32601&plang=CS.
- [A15] M. Fridrich, M. Fajkus, P. Mec, J. Nedoma, M. Kostelansky, and E. Bednar. Portable optical fiber bragg grating sensor for monitoring traffic density. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9, 2019. cited By 4.
- [A16] M. Stolarik, M. Pinka, J. Nedoma, M. Fajkus, and R. Martinek. Tram type influence on the frequency spectrum character of the subsoil dynamic response [badania sejsmicznych charakterystyk widmowych różnych typów pojazdów szynowych]. *Przegląd Elektrotechniczny*, 94:96–100, 2018.
- [A17] J. Cubik, S. Kepak, J. Doricak, V. Vasinek, J. Jaros, A. Liner, M. Papes, and M. Fajkus. The usability analysis of different standard single-mode optical fibers and its installation methods for the interferometric measurements. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 11:535–542, 2013. cited By 14.
- [A18] J. Cubik, S. Kepak, M. Fajkus, O. Zboril, J. Nedoma, A. Davidson, and V. Vasinek. Fixing methods for the use of optical fibers in interferometric arrangements. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10142, 2016. cited By 12.

- [A19] J. Nedoma, M. Fajkus, R. Martinek, L. Bednarek, S. Zabka, D. Hruby, J. Jaros, and V. Vasinek. Impact of fixing materials on the frequency range and sensitivity of the fiber-optic interferometer. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10208, 2017. Cited by: 6.
- [A20] J. Nedoma, M. Fajkus, R. Martinek, O. Zboril, L. Bednarek, M. Novak, K. Witas, and V. Vasinek. Analysis of the detection materials as resonant pads for attaching the measuring arm of the interferometer when sensing mechanical vibrations. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10231, 2017. Cited by: 4.
- [A21] J. Nedoma, M. Fajkus, R. Martinek, K. Witas, P. Mec, J. Jargus, S. Hejduk, P. Zavodny, and V. Vasinek. Sensor system based on the mach-zehnder interferometer for the rail transport. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10654, 2018. Cited by: 3.
- [A22] J. Nedoma, M. Fajkus, S. Zabka, and R. Martinek. Fiber-optic tram vehicle detector. *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*, 13:37–43, 2019. cited By 3.
- [A23] J. Nedoma, M. Fajkus, M. Novak, and S. Zabka. Mezikolejnicový detektor průjezdu a snímač náprav kolejových vozidel. Užitený vzor č. 31872 zapsán na ÚPV dne 25.06.2018. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/34935&plang=CS.
- [A24] J. Jargus, J. Jaros, M. Fajkus, J. Nedoma, V. Vasinek, T. Krenzelok, and T. Soural. Kompozitní optovláknový senzor pro detekci tlakové síly vznikající průjezdem kola kolejového vozidla, jeho uspořádání a způsob detekce této tlakové síly pomocí tohoto uspořádání. Patent č. 309746 udělen ÚPV dne 28.7.2023. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/2022-45&plang=CS.
- [A25] M. Fajkus, J. Nedoma, P. Mec, J. Cubik, S. Kepak, J. Jargus, M. Novak, R. Martinek, and V. Vasinek. Bragg grating sensors for the monitoring load of production press machines. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10440, 2017.
- [A26] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, L. Danys, M. Fridrich, P. Mec, and S. Zabka. Fiber-optic bragg system for the dynamic weighing of municipal waste: A pilot study. *IEEE Access*, 9:99050–99059, 2021.
- [A27] R. Martinek, J. Nedoma, M. Fajkus, and R. Kahankova. Fiber-optic bragg sensors for the rail applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 7:292–295, 2018. cited By 9.

- [A28] J. Nedoma, M. Fajkus, M. Novak, and S. Zabka. Pouzdro pro vláknově optické fbg senzory kolejových vozidel. Užitečný vzor č. 31888 zapsán na ÚPV dne 2.07.2018. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/34947&plang=CS.
- [A29] M. Fajkus, J. Nedoma, P. Partila, J. Tovarek, and R. Martinek. Systém pro rozpoznání a klasifikaci plochých kol v kolejové dopravě. Patent č. 309233 udělen ÚPV dne 15.06.2022. Dostupné z: https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/2020-669&plang=CS.
- [A30] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, M. Fridrich, E. Bednar, S. Zabka, and P. Zmij. Pressure membrane fbg sensor realized by 3d technology. *Sensors*, 21, 2021. cited By 5.
- [A31] M. Fajkus, M. Kostelansky, M. Fridrich, J. Cubik, S. Kepak, D. Krizan, R. Martinek, M. Mohamed, and J. Nedoma. Fbg sensor for heart rate monitoring using 3d printing technology. *IEEE Access*, 2024.
- [A32] J. Nedoma, M. Fajkus, R. Martinek, and H. Nazeran. Vital sign monitoring and cardiac triggering at 1.5 tesla: A practical solution by an mr-ballistocardiography fiber-optic sensor. *Sensors (Switzerland)*, 19, 2019. Cited by: 29; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access.
- [A33] J. Vanus, J. Nedoma, M. Fajkus, and R. Martinek. Design of a new method for detection of occupancy in the smart home using an fbg sensor. *Sensors (Switzerland)*, 20, 2020. cited By 10.

Reference

- [1] Správa železnic. Mapa kolejových jízdních Řádů. Online, 2023. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/portal/Show.aspx?path=/Data/Mapy/kjr.pdf>.
- [2] International Union of Railways (UIC). Safety at level crossings. [online], 2022. Dostupné z: <https://uic.org/safety/safety-at-level-crossings/>.
- [3] Pokyny pro použití sko-05. Online, 2018. Dostupné z: https://prvni-saz.cz/wp-content/uploads/2018/04/8_pokyny-pro-pouziti-SK0-05.pdf.
- [4] Railswing koa-1 - elektronické kolejové obvody. Online. Dostupné na: AZD Praha: <https://www.azd.cz/admin-data/storage/get/1161->.
- [5] ČSN 34 2613 Ed. 3 - Požadavky na elektroinstalace nízkého napětí. Online, 2014. Dostupné na: Technické Normy ČSN: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-34-2613-ed-3-342613-182808.html>.
- [6] AK Signal. Počítač náprav. Online. Dostupné na: AK Signal: <https://aksignal.cz/produkty/pocitac-naprav>.
- [7] Frauscher Sensortechnik. Datasheet rsr180. Online. Dostupné na: Frauscher Media Center: <https://www.frauscher.us/Frauscher/Mediencenter/Datasheets/EN-US/Datasheet%20RSR180-AEB.pdf>.
- [8] European Union Agency for Railways. European rail traffic management system (ertms). https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms_en, 2024. Accessed: 2024-04-15.
- [9] European Commission. Etc levels and modes. https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/etc-levels-and-modes_en, 2024. Accessed: 2024-04-15.
- [10] Network Rail. Gsm-r: Communicating on the railway. <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/gsm-r-communicating-on-the-railway/>, 2024. Accessed: 2024-04-15.
- [11] S.Mohamed Nizar and B.Elizabeth Caroline. Comparison of fiber optic sensors based on fbg-a review. In *2019 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking, ICSCAN 2019*, 2019.

REFERENCE

- [12] Abhisek Ukil, Hubert Braendle, and Peter Krippner. Distributed temperature sensing: Review of technology and applications. *IEEE Sensors Journal*, 12(5):885 – 892, 2012. Cited by: 311; All Open Access, Green Open Access.
- [13] Xiaoyi Bao, Zichao Zhou, and Yuan Wang. Review: distributed time-domain sensors based on brillouin scattering and fwm enhanced sbs for temperature, strain and acoustic wave detection. *Photonix*, 2(1), 2021. Cited by: 39; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access.
- [14] Zuyuan He, Qingwen Liu, Xinyu Fan, Dian Chen, Shuai Wang, and Guangyao Yang. A review on advances in fiber-optic distributed acoustic sensors (das). volume Part F113-CLEOPR 2018, 2018. Cited by: 3.
- [15] A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam, and E.J. Friebele. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1442–1463, 1997.
- [16] Y. J. Rao and D. A. Jackson. *Principles of Fiber-Optic Interferometry*, pages 167–191. Springer US, Boston, MA, 2000.
- [17] J.W. Palmer. The need for train detection. In *IET Seminar Digest*, volume 2012, page 60 – 74, 2012.
- [18] Nguyen Thanh Hai and Dang Quang Thach. Design and manufacturing of axle counting equipment. In *Proceedings - 12th IEEE International Conference on Control, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2023*, page 51 – 55, 2023.
- [19] Cong Du, Susom Dutta, Pradeep Kurup, Tzuyang Yu, and Xingwei Wang. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 303, 2020.
- [20] N. Roveri, A. Carcaterra, and A. Sestieri. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre bragg grating sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60:14 – 28, 2015.
- [21] Lee Kang Kuen and S.L. Ho. Unconventional method of train detection using fibre optic sensors. *HKIE Transactions Hong Kong Institution of Engineers*, 13(1):16 – 21, 2006.
- [22] Georges Kouroussis, Damien Kinet, Edgar Mendoza, Julien Dupuy, Véronique Moeyaert, and Christophe Caucheteur. Edge-filter technique and dominant frequency analysis for high-speed railway monitoring with fiber bragg gratings. *Smart Materials and Structures*, 25(7), 2016.

REFERENCE

- [23] Chu-Liang Wei, Chun-Cheung Lai, Shun-Yee Liu, W.H. Chung, T.K. Ho, Hwa-Yaw Tam, S.L. Ho, A. McCusker, J. Kam, and K.Y. Lee. A fiber bragg grating sensor system for train axle counting. *IEEE Sensors Journal*, 10(12):1905 – 1912, 2010.
- [24] Georges Kouroussis, Damien Kinet, Véronique Moeyaert, Christophe Caucheteur, and Julien Dupuy. Development of structural railway monitoring solutions using fbg sensors. In *ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics*, 2016.
- [25] Georges Kouroussis, Damien Kinet, Véronique Moeyaert, Julien Dupuy, and Christophe Caucheteur. Railway structure monitoring solutions using fibre bragg grating sensors. *International Journal of Rail Transportation*, 4(3):135 – 150, 2016.
- [26] Chuliang Wei, Qin Xin, W.H. Chung, Shun-Yee Liu, Hwa-Yaw Tam, and S.L. Ho. Real-time train wheel condition monitoring by fiber bragg grating sensors. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 2012.
- [27] Bastien Van Esbeen, Cyrille Finet, Robin Vandebrouck, Damien Kinet, Kevin Boelen, Corentin Guyot, Georges Kouroussis, and Christophe Caucheteur. Smart railway traffic monitoring using fiber bragg grating strain gauges. *Sensors*, 22(9), 2022.
- [28] Sheng Wang, Tianfu Zhang, Lu Zhang, and Yang Li. A fiber sensor system for axle counting in railway application. In *Asia Communications and Photonics Conference, ACP*, volume 2022-November, page 142 – 146, 2022.
- [29] Kivilcim Yüksel, Damien Kinet, Veronique Moeyaert, Georges Kouroussis, and Christophe Caucheteur. A trackside sensor system for train axle counting by fiber bragg grating accelerometer. In *Optics InfoBase Conference Papers*, volume Part F124-OFS 2018, 2018.
- [30] Kivilcim Yüksel, Damien Kinet, Veronique Moeyaert, Georges Kouroussis, and Christophe Caucheteur. Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers. *Smart Materials and Structures*, 27(10), 2018.
- [31] Daniel Kacik, Ivan Martinec, Juraj MacIak, and Matej Goraus. Fabry-pérot interferometer monitoring system for counting train axle. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 2022.
- [32] Ivan Martinec, Daniel Kacik, and Jakub Horak. Interferometric optical fiber sensor for monitoring of dynamic railway traffic. *Optics and Laser Technology*, 140, 2021.
- [33] Stanislav Kepak, Jakub Cubik, Petr Zavodny, Stanislav Hejduk, Jan Nedoma, Alan Davidson, and Vladimír Vasínek. Fibre optic portable rail vehicle detector. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10142, 2016.

REFERENCE

- [34] Xiang Ni, Yuanli Wang, and Honghai Wang. Research and realization of high stability fiber bragg grating track axle counting system. In *EEI 2022 - 4th International Conference on Electronic Engineering and Informatics*, page 425 – 428, 2022.
- [35] Daniele Tosi. Review and analysis of peak tracking techniques for fiber bragg grating sensors. *Sensors (Switzerland)*, 17(10), 2017.