

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Diplomová práce

**Taktilní snímač využívající změny optických vlastností
optického vlákna vlivem mikroohybu**

Bc. Daniel Vondruška

© 2023 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Daniel Vondruška

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Taktilní snímač využívající změny optických vlastností optického vlákna vlivem mikroohybu

Název anglicky

Tactile transducer making use of changes optical properties of optical fibre by microbending

Cíle práce

1. Navrhněte a realizujte taktilní senzor (měřicí přípravek), který bude využívat změn optických vlastností optických vláken v závislosti na jejich mikroohybu.
2. Senzor realizujte pro skleněná optická vlákna a pro plastová optická vlákna. V přípravku použijte optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu a gradientní.
3. Navrhněte a realizujte maticový plošný snímač včetně elektronických obvodů s využitím optických vláken.

Metodika

1. Seznamte se s problematikou taktilních snímačů využívajících optická vlákna. 2. Provedte studii vhodnosti optických vláken pro jejich použití v taktilních snímačích.
3. Navrhněte a realizujte taktilní senzor (měřicí přípravek), který bude využívat změn optických vlastností optických vláken v závislosti na jejich mikroohybu. Senzor realizujte pro skleněná optická vlákna a pro plastová optická vlákna.
4. Navrhněte a realizujte maticový plošný snímač včetně elektronických obvodů s využitím optických vláken

Doporučený rozsah práce

50 – 60 str.

Klíčová slova

optické vlákno, taktilní snímač, mikroohyb

Doporučené zdroje informací

Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha, 1996

Jenčík, J., Volf, J. a kol.: Technická měření, skriptum ČVUT, Praha, 2000

Jenstorm, D.T., Chin-Lin Chen: A Fiber Optic Microbend Tactile sensor Array. Sensor and Actuators, 1989. pp.: 239-248

Kisen, A., Asundi, A.: Fiber Optic Micro Bend Sensor for Crack Detection in Human Tooth. School of Mechanical & Production Engineering Nanyang Technological University, Singapore.

Turán, J., Petřík, S.: Optické vláknové senzory. ALFA, Bratislava, 1991

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Konzultant

Vladimír Ryženko, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 26. 1. 2023

doc. Ing. Monika Hromasová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 31. 1. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 11. 03. 2023

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Taktilní snímač využívající změny optických vlastností optického vlákna vlivem mikroohybu vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. “

V Praze dne 31.3.2023

.....
Bc. Daniel Vondruška

Poděkování

Tímto děkuji svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc. za pomoc od výběru tématu, přes odborné poznatky a rady během tvorby až po dokončení této práce. Dále děkuji své rodině, přítelkyni a přátelům za podporu během celého studia.

Abstrakt: Tato diplomová práce se věnuje problematice taktilních senzorů s optickým vláknem fungujícím na základě mikroohybu. Taktilní snímače slouží pro získání informace o dotyku. V úvodních kapitolách jsou uvedeny oblasti využití taktilních snímačů v robotice a automatizaci. V následujících kapitolách jsou představeny jednotlivé typy taktilních snímačů a podrobněji jsou popsány principy a typy snímačů s optickým vláknem. Součástí práce je studie vhodnosti optických vláken z několika materiálů na základě statických vlastností výstupního napětí závislého na deformaci a zatěžovací síle. K tomuto měření slouží přípravek s deformačními hroty, které jsou navrženy na základě vlastností měřených optických vláken. Poslední částí práce je návrh a výběr vhodných komponent pro maticový plošný snímač, který funguje na principu mikroohybu optických vláken.

Klíčová slova: Taktilní snímač, optické vlákno, mikroohyb, robotika, automatizace

Tactile transducer making use of changes optical properties of optical fibre by microbending

Summary: This diploma thesis deals with the issue of tactile sensors with an optical fiber operating on the basis of microbending. Tactile sensors are used to obtain information about touch. In the introductory chapters, the areas of use of tactile sensors in robotics and automation are presented. In the following chapters, individual types of tactile sensors are introduced and the principles and types of optical fiber sensors are described in more detail. Part of the work is a study of the suitability of optical fibers made of several materials based on the static properties of the output voltage depending on the deformation and loading force. For this measurement, a device with deformation tips is used, which are designed on the basis of the properties of the measured optical fibers. The last part of the work is the design and selection of suitable components for the matrix area sensor, which works on the principle of microbending of optical fibers.

Key words: Tactile sensor, optical fibre, microbending, robotics, automation

Obsah

1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE	2
3	METODIKA PRÁCE	3
4	ROBOTIZACE.....	4
4.1	ROBOTIZACE V OBLASTI SLUŽEB.....	4
4.2	ROBOTIZACE VÝROBNÍCH PROCESŮ	5
4.2.1	<i>Konstrukce průmyslových robotů</i>	<i>6</i>
4.2.2	<i>Koncové efekторы</i>	<i>8</i>
5	TAKTILNÍ SENZORY	10
5.1	TAKTILNÍ SENZORY S ELASTOMERY	13
5.1.1	<i>Taktilní senzory s vodivými elastomery</i>	<i>13</i>
5.1.2	<i>FSR senzory.....</i>	<i>15</i>
5.1.3	<i>Senzory s odporovou vrstvou.....</i>	<i>16</i>
5.2	TAKTILNÍ SENZORY S TENZOMETRY.....	17
5.3	KAPACITNÍ TAKTILNÍ SENZORY	21
5.4	TAKTILNÍ SENZORY S PIEZOELEKTRICKÝMI MATERIÁLY	22
5.5	MAGNETICKÉ TAKTILNÍ SENZORY	24
5.5.1	<i>Magnetostrikční taktilní senzory</i>	<i>24</i>
5.5.2	<i>Magnetoanizotropní taktilní senzory.....</i>	<i>25</i>
6	PROBLEMATIKA SENZORŮ S OPTICKÝM VLÁKNEM.....	26
6.1	SOUČÁSTI SNÍMAČE S OPTICKÝM VLÁKNEM.....	27
6.1.1	<i>Optická vlákna</i>	<i>27</i>
6.1.2	<i>Konektory.....</i>	<i>30</i>
6.1.3	<i>Zdroje optického záření</i>	<i>31</i>
6.1.4	<i>Detektory</i>	<i>31</i>
6.2	OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY.....	32
6.2.1	<i>Principy OVS.....</i>	<i>33</i>
6.2.2	<i>Rozdělení OVS.....</i>	<i>33</i>
6.2.3	<i>Důležité parametry OVS.....</i>	<i>35</i>
6.2.4	<i>Rozdělení OVS podle fyzikálního principu</i>	<i>35</i>
7	STUDIE VHODNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN PRO POUŽITÍ V TAKTILNÍCH SNÍMAČÍCH A NÁVRH MĚŘICÍHO PŘÍPRAVKU	40
7.1	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ	43
7.1.1	<i>Výběr optického vlákna</i>	<i>43</i>
7.1.2	<i>Návrh deformačních destiček</i>	<i>44</i>
7.1.3	<i>Návrh optické a elektrické části</i>	<i>46</i>
7.2	MĚŘENÍ STATICKÝCH CHARAKTERISTIK	47
7.2.1	<i>Popis měření</i>	<i>48</i>
7.2.2	<i>Zpracování naměřených hodnot</i>	<i>49</i>
7.2.3	<i>Zhodnocení výsledků měření.....</i>	<i>52</i>
8	MATICOVÝ PLOŠNÝ SNÍMAČ.....	55
9	ZÁVĚR.....	57
10	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	60

1 Úvod

Současný vývoj klade důraz na automatizaci a robotizaci výrobních a jiných procesů. Pro správné fungování je nutné přesně a spolehlivě získávat informace o probíhajících dějích, aby bylo dosaženo zrychlení, zefektivnění a zvýšení bezpečnosti. Ke sběru informací o různých fyzikálních veličinách v reálném čase slouží senzory a jsou nezbytnou součástí regulačních a měřících systémů. Mezi měřené veličiny se řadí například tlak, teplota, vlhkost, chemické složení nebo vibrace. Senzory mají využití v automatizaci výrobních procesů, robotice či ve zdravotnictví. Výběr vhodných senzorů zásadně ovlivňuje výslednou přesnost a úspěšnost konkrétní aplikace. (1)

Taktilní senzory jsou určené ke snímání dotyku, tlaku, deformace a dalších fyzikálních veličin spojených s mechanickým kontaktem s objektem. V robotice se používají ke zlepšení interakce robotů s prostředím a přizpůsobení se změnám okolí. Umožňují měkký úchop předmětu, ochranu robota nebo realizaci pohybu při kinematických omezeních. Mezi taktilní senzory se řadí mikrosplínače pro detekci dotyku, senzory úchopné síly či prokluzu nebo senzory složitější konstrukce, které nahrazují lidský hmat. (2)

Pro své vlastnosti se řadí mezi vhodné taktilní senzory optovláknové senzory. Tyto senzory fungují na základě změn přenosových vlastností optického vlákna vlivem jeho deformace. Přednostmi těchto senzorů jsou citlivost, přesnost a odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Další výhodou jsou menší zástavbové rozměry, které umožňují aplikace s omezenými prostorovými možnostmi. Maticové uspořádání optovláknového senzoru umožňuje přesnější popis snímaných vlastností. Toto řešení má nevýhodu v počtu nutných prvků snímačů a přijímačů, kdy pro každé vlákno musí být použit jeden pár. Tím je ovlivněna cena a spotřeba elektrické energie. (2)

2 Cíl práce

Cílem této práce bude návrh a realizace taktilního senzoru, který využívá optických vlastností optických vláken v závislosti na jejich mikroohybu. Tento senzor bude sloužit k měření tlaku, deformace a dalších veličin. V práci budou dále porovnány rozdíly vlastností mezi optickými vlákny skelnými a plastovými a vlákny se skokovou a gradientní změnou indexu lomu. Poslední částí této práce bude návrh a realizace maticového plošného snímače včetně elektronických obvodů s využitím optických vláken. Tento snímač bude mít výhodu větší hustoty informací a rychlejšího snímání. Tento snímač bude využívat principu mikroohybu optických vláken. Porovnání různých typů umožní výběr vhodného typu pro konkrétní aplikaci v taktilním senzoru.

3 Metodika práce

Základem je seznámení se s problematikou taktilních snímačů využívajících optická vlákna, vysvětlení fyzikálních principů, které umožňují snímání deformace optického vlákna a popis vlastností různých druhů optických vláken. Na základě těchto informací budou zvolena vlákna z vhodných materiálů, které budou svými vlastnostmi odpovídat použití v taktilním senzoru. Vybraná optická vlákna budou porovnána měřením v měřícím přípravku.

Pro realizaci řešení této práce byl zvolen přípravek pro deformaci optických vláken, ve kterém byla vybraná vlákna testována při různé deformaci. Pro měření zatížení a výstupního napětí byla využita platforma Arduino, ve které probíhalo vzorkování výstupního napětí a síly, která působila na deformované vlákno. Výhodou platformy Arduino je cena a dostupnost modulů a programování jazykem Wiring, pomocí kterého se programují mikrokontrolery.

Stěžejním prvkem práce je měřící přípravek pro měření vlastností optických vláken, který pracuje na principu amplitudové modulace optického signálu v optickém vláknu pomocí deformačních hrotů, čímž dochází k mikroohybu a část světla uniká do pláště nebo prostředí a tím se snižuje intenzita světla. Měřenou veličinou je výstupní napětí na přijímači optického signálu a závisí na deformaci optického vlákna, kterým optický signál z vysílače prochází.

Maticové uspořádání taktilního snímače umožňuje přesnější snímání díky větší hustotě informací oproti lineárnímu uspořádání. Další výhodou je menší náchylnost k chybovosti a zkreslení naměřených hodnot. Zároveň je snímána větší plocha.

4 Robotizace

V kombinaci nízké nezaměstnanosti a obecnému nezájmu o fyzicky náročné profese je současný trend nahrazovat v těchto činnostech lidskou práci stroji. V této souvislosti se vyvíjí roboty v oblasti výrobních procesů nebo i sociální oblasti. Se zdokonalujícími schopnostmi a technickému vývoji robotů se lidská práce přesouvá z manuálních činností na činnosti kontrolní a zadavatelské.

4.1 Robotizace v oblasti služeb

Robotizace se týká nejen výrobních procesů, ale vyvíjí se i v oblasti služeb. Jsou vyvíjeni roboty, kteří mají nahradit práci číšníků v restauracích nebo nemocničního personálu za účelem manipulace s pacienty. Dalším příkladem dle (6) je dezinfekční robot od firmy Akara Robotics, jehož účelem je samostatná dezinfekce místnosti s určením kritických míst, kde je častější potřeba dezinfekce. Tento robot se používá například v nemocnicích a k dezinfekci používá UV světlo. Další oblastí jsou roboti, jejichž cílem je dělat společnost a komunikovat s lidmi, čímž nahrazují domácího mazlíčka či partnera. V této oblasti jsou taktilní senzory používány za bezpečnostním účelem nebo při přemísťování objektů a živých organismů.

Obrázek 1 Dezinfekční robot (6)



4.2 Robotizace výrobních procesů

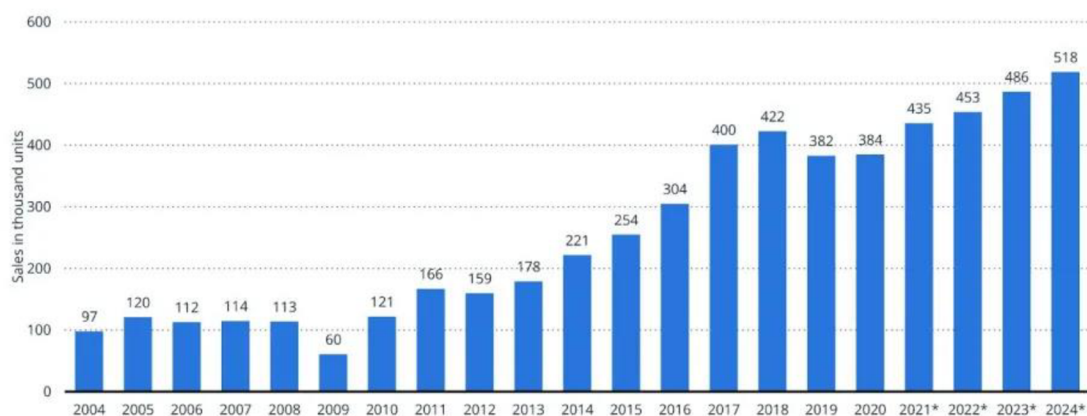
V oblasti výrobních procesů je vývoj robotiky rychlejší a rozšířenější. Použití robotu ve výrobě má pozitivní dopady jak z ekonomického, tak z kvalitativního hlediska. Roboty se zde používají především repetitivních úkolech výrobního řetězce, kdy je požadována přesnost, kvalita a opakovatelnost operace.

Průmyslový robot je složen z ramen a os, které nezávisle na sobě vykonávají rotační nebo translační pohyb, čímž je docílena požadovaná pozice a natočení koncového bodu. Pro industriální roboty existují různé efektory, což je koncová část ramene, která určuje robotův účel a může být výměnný. Podle zdroje (7) prodeje industriálních robotů v posledních letech přesahují 400 tisíc prodaných kusů ročně, bližší vývoj je popsán grafem na obrázku 2 níže.

Obrázek 2 Počet celosvětových instalací industriálních robotů v průběhu let (7)

Worldwide installations of industrial robots from 2004 to 2020, with a forecast through 2024 (in 1,000 units)

Industrial robots - worldwide shipments 2004-2024



Description: Worldwide industrial robot shipments amounted to some 384,000 in 2020, just a slight increase compared to 2019. It is projected that industrial robot shipments will increase significantly in the coming years, even surpassing the peak in 2018 when around 422,000 industrial robots were shipped worldwide. It is expected that in 2024, global industrial robot shipments will amount to about 518,000. [Read more](#)

Notes: Worldwide, 2004 to 2020

Sources: IFR, Webotika (ingenieur.de)

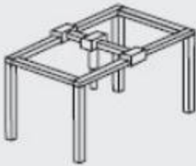
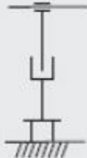

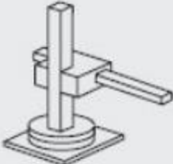



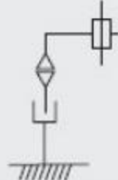

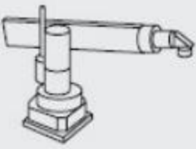





statista

Z grafu je patrné, že trend robotizace výrobních procesů je stále rostoucí a podle předpovědi na rok 2024 počet prodaných kusů přesáhne hodnotu 500 tisíc. Největší podíl je ve výrobě elektroniky, dále se jedná o výrobu automobilů a zpracování kovů a plastů.

4.2.1 Konstrukce průmyslových robotů

Základním parametrem průmyslových robotů počet nezávisle řízených os, jejichž počet je stejný jako počet těchto os. Aby mohlo být dosaženo libovolného nastavení koncové části robotu, tak je potřeba tří stupňů volnosti (tří os), které umožňují pohyb rotační, translační nebo jejich kombinaci. Podle zdroje (8) kombinací možných pohybů rozlišujeme jednotlivé typy kinematik průmyslových robotů, jak je zobrazeno na obrázku 3.

Obrázek 3 Typy kinematiky průmyslových robotů (8)

Typ	Konstrukce	Kinematika	Pracovní prostor
TTT			
RTT			
			
RRT			
RRR			

Od typu kinematiky se odvíjí pracovní prostor robotu, což je patrné z obrázku 3. Dalším dělením průmyslových robotů je podle počtu os, který se obvykle pohybuje mezi jednou až šesti osami, ale může jich být kvůli specifickým požadavkům i více. Nejčastějším typem kinematiky je RRR s kulovým pracovním prostorem.

Příkladem robotu této konstrukce je paletizační robot od firmy Kuka typ KR Quantec PA, který má 5 os a je určen k paletizaci různých objektů, jejichž typ se odvíjí od použitého efektoru. Níže na obrázku 4 je zobrazen tento robot v katalogu firmy Kuka a vpravo dole je naznačen pracovní prostor robotu. Na obrázku 5 jsou popsány jeho parametry v různých konfiguracích. (13)

Obrázek 4 Kuka KR Quantec PA (13)



Obrázek 5 Parametry robotu Kuka KR Quantec PA (13)

KR QUANTEC PA	KR 240 R3200-1 PA	KR 180 R3200-1 PA	KR 120 R3200-1 PA	KR 240 R3200-2 PA	KR 180 R3200-2 PA	KR 140 R3200-2 PA
Controller	KR C4	KR C4	KR C4	KR C5	KR C5	KR C5
Number of axes	5	5	5	5	5	5
Payload	240 kg	180 kg	120 kg	240 kg	180 kg	140 kg
Reach	3,195 mm	3,195 mm	3,195 mm	3,195 mm	3,195 mm	3,195 mm
Pose repeatability	±0.06 mm	±0.06 mm	±0.06 mm	±0.07 mm	±0.07 mm	±0.07 mm
Weight	1,103 kg	1,093 kg	1,075 kg	1,017 kg	1,017 kg	1,017 kg
Variants	A, HO	A, HO	A, HO	HO	HO	HO
Installation position	Floor	Floor	Floor	Floor	Floor	Floor

A Arctic version to -30°C **HO** Food compatible lubricants

4.2.2 Koncové efektory







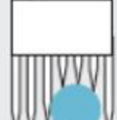



Konečným prvkem robotu je efektor, který definuje jeho určení. Jedná se o speciální zařízení, které je uzpůsobeno konkrétní aplikaci. Může se jednat o přemísťování předmětu, obrábění nebo kontrolní operace. Nejčastější úlohou průmyslových robotů je přemísťování objektů, úchopné efektory jsou tudíž nejrozšířenějšími koncovými zařízeními robotů.

Obecně lze efektory podle zdroje (8) rozdělit na

- Manipulační
- Technologické
- Kombinované
- Speciální

Manipulační (úchopné) výstupní hlavice slouží k uchopení, přemístění a uvolnění objektu. Dále mohou být rozděleny na univerzální a speciální. Častěji jsou použity hlavice navržené na míru pro konkrétní aplikaci. Dalším možným rozdělením manipulačních hlavic je podle způsobu uchycení objektu, jak je vidět na obrázku 6 níže. Taktilní senzory, které jsou tématem této práce největší využití nacházejí u mechanických úchopných hlavic, kde díky informacím ze senzoru je dosaženo měkkého úchopu, díky kterému není manipulovaný předmět zničený či deformovaný. (8)

Obrázek 6 Druhy úchopných hlavic (8)

mechanické		podtlakové	magnetické	adhezní	adaptabilní	jehlové
nůžkové	vidlicové		elektromagnetické	adhezní fólie		
						
s paralelními čelistmi	třibodové		s permanentními magnety			
						

Technologickými výstupními hlavicemi jsou myšleny hlavice svařovací, obráběcí a hlavice nanášející nátěr či jiné hmoty a další hlavice zastupující technologické procesy ve výrobě. Svařování je prováděno elektrickým obloukem. Obráběcí hlavice slouží k obrábění a jedná se především o frézování a vrtání. Oproti obráběcímu stroji však není dosaženo takové přesnosti vzhledem k nižší tuhosti robotu. Dalšími technologickými efekty jsou efekty dělicí materiál například pomocí laserového, plazmového nebo vodního paprsku. Povrchová úprava je prováděna nejčastěji lakovacími efekty. (8)

Obrázek 7 Robot se svařovacím efektem (14)



Kombinované efekty jsou kombinací výše zmíněných efektorů. Nejčastěji se jedná o efekty manipulační kombinované s některým z technologických efektorů nebo o kombinaci dvou a více technologických hlavic, které svými určeními na sebe navazují. (8)

Speciální efekty nelze pro svou specifčnost zařadit do některé z výše uvedených kategorií. Jedná se o hlavice na míru navržené pro neobvyklou operaci. Do této kategorie patří efekty použité například v medicínských aplikacích. (8)

5 Taktilní senzory

Pro interakci robotu s objektem je nutné získat, maximum informací o úchopu či doteku. V současné době je snaha napodobit množství informací, které člověk získává pomocí receptorů na konečcích prstů. Tyto požadavky jsou kladeny na roboty průmyslové, tak na roboty sociální. Ukázka robotické ruky s taktilními senzory je na obrázku 8 níže.

Obrázek 8 Robotická ruka s taktilními senzory (15)



Podle zdroje (3) jsou taktilní senzory zařízení, která se používají pro sběr informací o kontaktní síle, skluzu a geometrii objektu. Tyto vjemy umožňují realizaci měkkého úchopu křehkých předmětů, provedení pohybu při prostorových omezeních, měření polohy objektu v prostoru nebo působení silou nebo momentem v konkrétním směru. Tyto senzory umožňují regulaci úchopové síly tak, aby byla úchopová síla dostatečná, aby robot předmět neupustil a zároveň menší než kritická pro poškození uchopeného objektu. Taktilním senzorem se rozumí soubor několika taktilních snímačů v maticovém nebo jiném uspořádání.

V předchozí kapitole byly představeny různé druhy hlavic robotů. Jak bylo zmíněno, tak taktilní senzory se nejčastěji používají u manipulačních hlavic, kde je díky informacím z těchto senzorů dosaženo pevného, ale nedestruktivního úchopu manipulovaného předmětu. Ukázka manipulační hlavy je na obrázku 9 níže. U ostatních efektorů se jedná o použití především bezpečnostní nebo například pro kalibraci vzdálenosti technologické hlavy od výrobku. U humanoidního typu robotů jsou taktilní senzory použity robotických rukou.

Obrázek 9 Manipulační efektor (16)



Taktilní senzory se dělí podle způsobu získání informace na primární a sekundární. Primární taktilní senzory jsou rozšířenější a přicházejí bezprostředně do styku se snímaným objektem. Sekundární taktilní senzory získávají taktilní informaci zprostředkovaně a řadí se mezi ně například proximní senzory. Dále je možné dělit senzory na proporcionální (se spojitým výstupním signálem) a na diskrétní (signál digitálního charakteru). (4)

Alternativním způsobem získání informací o úchopu jsou podle zdroje (4) obrazové metody. Ty mají nevýhodu, že veličiny nejsou měřeny v místě dotyku, ale dopočítávají z obrazu. Oproti nim mají taktilní senzory výhodu, že je možné jejich zakomponování do úchopné hlavice. To umožňují jejich menší zástavbové rozměry a nízká hmotnost. Taktilní senzory jsou odolné vůči vnějším vlivům, nepůsobí na ně negativně nevhodné osvětlení a některé druhy jsou odolné i vůči elektromagnetickému rušení. Dalšími výhodami jsou možnost paralelního získávání informací, rychlost čtení a číslicový formát.

Podle zdroje (2) můžeme dělit taktilní senzory dle jejich určení na senzory pro určení tvaru objektu, pro zajištění bezpečnosti robotu nebo okolí, pro získání informací k úchopu anebo pro orientaci při pohybu v prostoru. Při detekci tvaru objektu je dopočítáván tvar objektu podle informací o dotyku a pozice ramena v prostoru, taktilní senzory jsou v tomto případě umístěny na úchopové hlavě robotu, kterou se objektu postupně dotýká. Bezpečnostní taktilní senzory jsou umístěny na ramenou robotu v místech, kde by mohlo dojít k nežádoucímu kontaktu s jinými objekty nebo například pracovníky. Taktilní senzory pro získávání informací o úchopu nebo pro orientaci v prostoru souvisí přímo s pracovní úlohou robotu, kdy jsou senzory umístěné na aktivní hlavici robotu a pomáhají zefektivnit jeho činnost.

Dalším možným rozdělením taktilních senzorů je podle principu snímání taktilní informace. Podle zdroje (2) se jedná o toto rozdělení:

- S elastomery
- S tenzometry
- Kapacitní
- S piezoelektrickými materiály
- S optickými vlákny

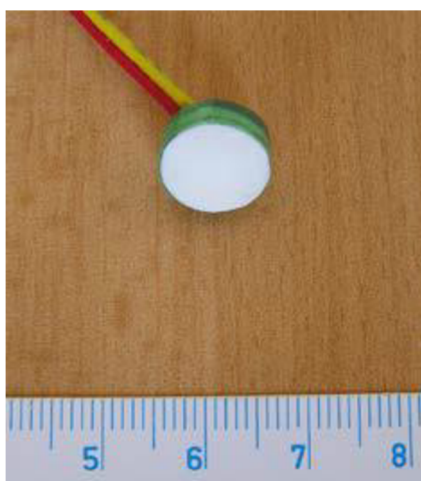
V následujících podkapitolách budou blíže představeny jednotlivé typy taktilních senzorů podle zdrojů (2)(12). Optické taktilní senzory, které jsou tématem této diplomové práce, budou představeny v kapitole 6.

5.1 Taktilní senzory s elastomery

5.1.1 Taktilní senzory s vodivými elastomery

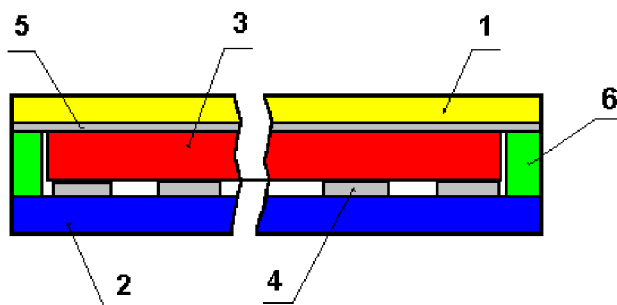
U těchto senzorů je síla převedena na elektrický signál pomocí vodivých elastomerů, které se nazývají piezorezistivní. Principem je změna elektrického odporu silikonové pryže, která je sycena železným prachem nebo grafitem. Stlačováním a relaxací poddajného materiálu se mění výsledný odpor senzoru, čímž je získávána informace o objektu, se kterým je senzor v přímém kontaktu. Na obrázku 10 je příklad taktilního senzoru s elastomery. (2)(12)

Obrázek 10 Taktilní snímač s elastomery PMT 1.3 (2)



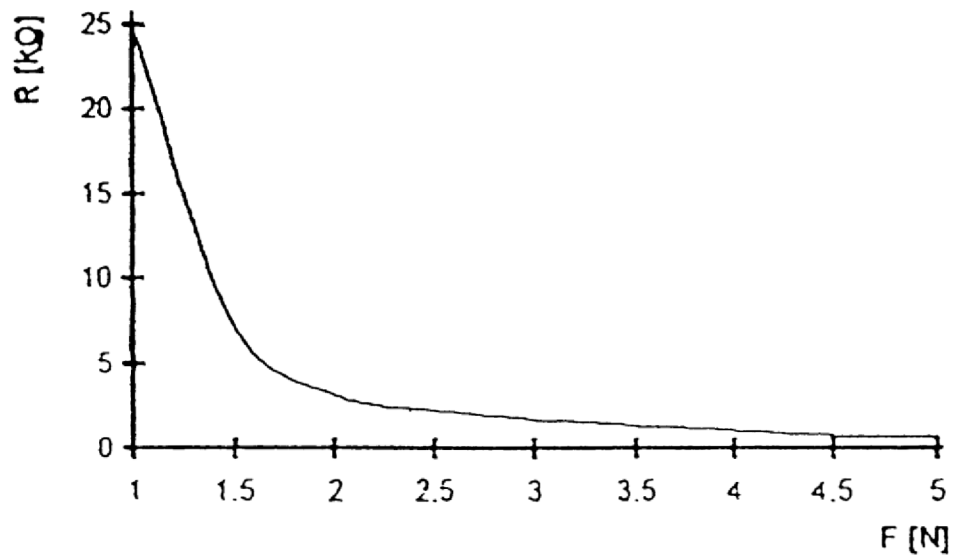
Taktilní snímač s vodivým elastomerem může poskytovat komplexní informaci o snímaném objektu, protože snímá informace po celém povrchu, se kterým je v kontaktu pomocí matice senzorů. Na obrázku 11 je zobrazena konstrukce snímače, kde 1 je krycí vrstva, 2 je základní deska, 3 je vrstva vodivého elastomeru, 4 a 5 jsou páskové elektrody v maticovém uspořádání, které mají hřebínkovitý tvar a 6 je vložka, která slouží jako spojení mezi horní a spodní částí snímače. (2)(12)

Obrázek 11 Konstrukce Taktilního snímače s plošným elastomerem (2)



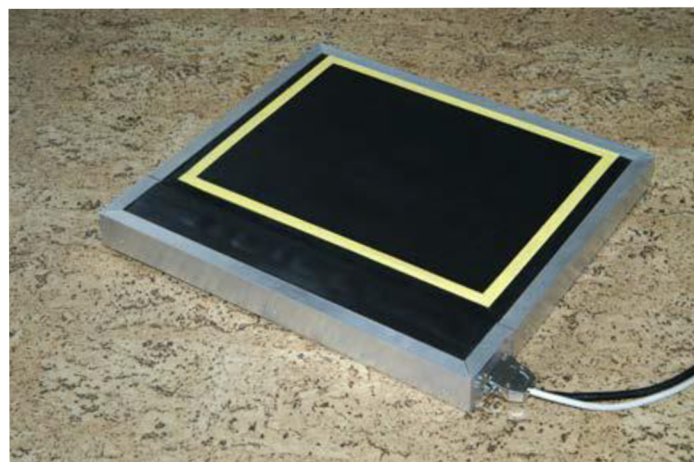
Jak již bylo zmíněno, tento typ senzoru mění svůj elektrický odpor na základě síly, která působí na vrstvu elastomeru. Průběh změny odporu je nelineární a je vhodné používat snímač v části od 2 N, kde má lineárnější charakter, jak je patrné z obrázku 12.

Obrázek 12 Závislost $R = f(F)$ pro PMT 1.3 (2)



Tyto snímače jsou určeny pro použití v robotice a biomechanice. Autor zdroje (2) využil vlastnosti snímačů s vodivými elastomery k vývoji plantografu, což je zařízení sloužící k analýze chůze člověka. Plantograf snímá rozložení dynamických a statických tlaků a je vyobrazen na obrázku 13 níže.

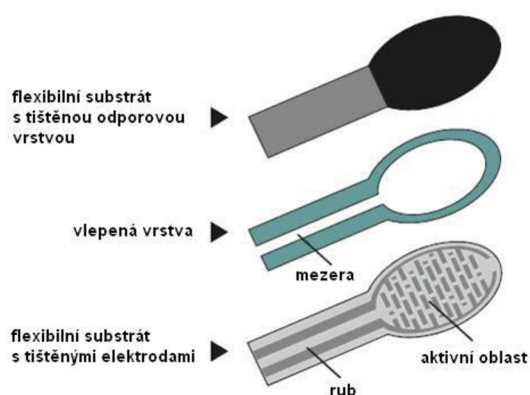
Obrázek 13 Plantograf V05 (2)



5.1.2 FSR senzory

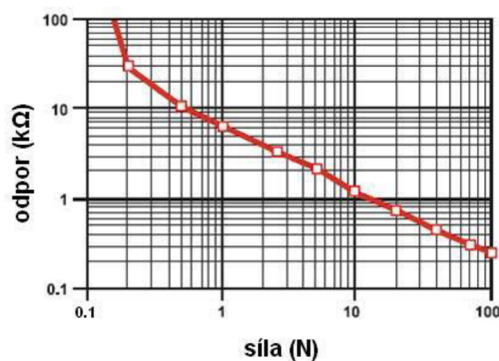
FSR senzory (z anglického Force Sensitive Sensor) jsou založeny na změně odporu polymerové vrstvy. Tyto senzory se používají například u dotykových klávesnic nebo zjišťování pozice objektů. Základem senzoru je odporová vrstva, která je vyrobena technologií tlustých vodivých polymerových vrstev (Polymer Thick Film – PTF). V této vrstvě jsou elektricky vodivé a nevodivé částice o velmi malých rozměrech, které se vlivem působení síly navzájem dotýkají, čímž se vytvářejí vodivé dráhy, čímž se snižuje výsledný odpor snímače. Na obrázku 14 je znázorněn řez FSR senzorem. (2)(12)

Obrázek 14 Řez FSR senzorem (2)



Hodnota odporu závisí na velikosti senzoru a použitém elastomeru. Podobně jako u senzorů s vodivými elastomery je začátek za působení menších sil strmý a s rostoucí silou je lineárnější. Přesnému měření však brání tolerance převodní charakteristiky, která se pohybuje od 15 % do 25 % mezi jednotlivými senzory. (2)(12)

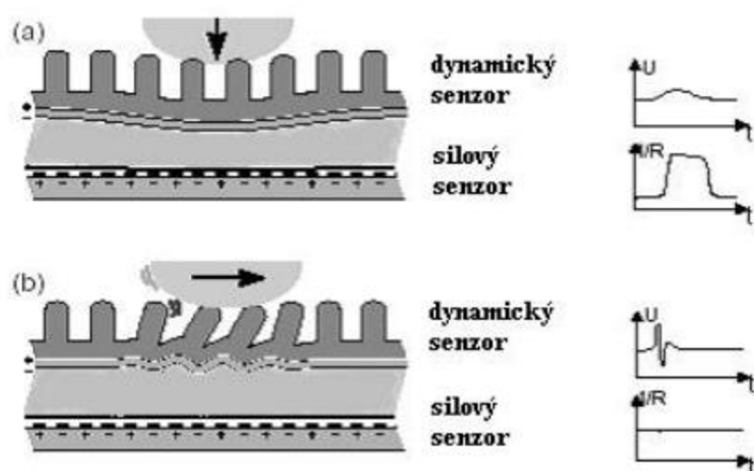
Obrázek 15 Závislost $R = f(F)$ pro FSR senzor (2)



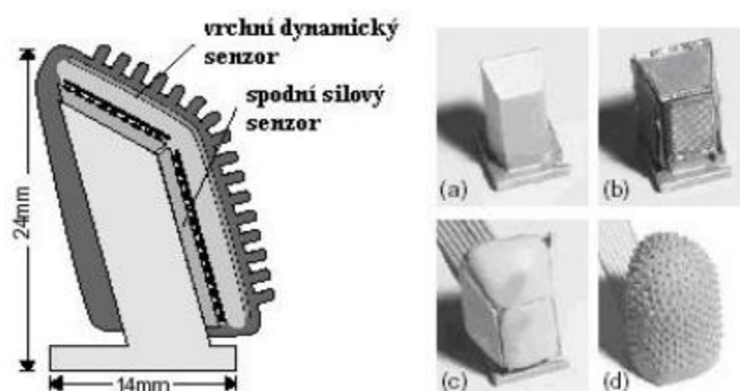
5.1.3 Senzory s odporovou vrstvou

Zdroj (9) uvádí senzor o konstrukci, která snímá jak silovou složku, tak je schopen detekovat i složku smykovou. Principem senzoru, jehož konstrukce je znázorněna na obrázku 1 níže jsou dva spojené vrstvé senzory. Vnější dynamický senzor je tvořen klky na odporové vrstvě, které vlivem smykové složky změni polohu, čímž dojde k dynamické změně napětí viz obrázek 16b. Na tuto událost spodní silová vrstva nereaguje. Spodní vrstva reaguje změnou odporu v případě statické tlakové síly, která se přenese skrz dynamickou vrstvu viz obrázek 16a. Skutečná konstrukce senzoru a použití na robotickém prstu pro manipulaci s předměty je na obrázku 17.

Obrázek 16 Princip senzoru s odporovou vrstvou (9)

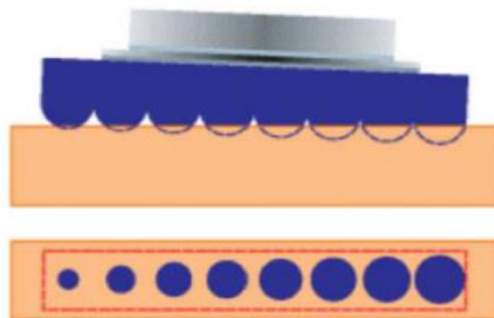


Obrázek 17 Robotický prst se senzory s odporovou vrstvou (9)



Dalším uspořádáním, které umožňuje měřit smykovou sílu je na obrázku 18. Jedná se o maticový taktilní snímač, který detekuje změnu dotykové plochy, která závisí na zatížení mezi dvěma částmi snímače. Snímač je tvořen tlačítky v maticovém uspořádání, jejichž dotyková plocha se mění s druhou mocninou síly a může být měřena například odporovou vrstvou. Tlačítka jsou stlačována proti pevné rovné ploše snímače. Smyková složka síly je měřena na základě změny kruhového tvaru dotykové plochy na eliptický. (2)(12)

Obrázek 18 Maticový taktilní snímač (2)



5.2 Taktilní senzory s tenzometry

Podle zdroje 2 jako převodník síly na elektrický signál se u těchto senzorů používá tenzometr. Tenzometry měří deformace na různých částech robotu. V případě taktilního použití se jedná o deformace spojené s úchopem předmětu. Na sledované namáhané díly se umísťují tenzometry drátkové, fóliové nebo polovodičové. U drátkových a fóliových tenzometrů je možné vypočítat relativní změnu odporu ve vztahu k relativnímu prodloužení pomocí vzorce:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \varepsilon$$

Kde

$\Delta R/R$ Relativní změna odporu tenzometru

$\Delta l/l$ Relativní změna prodloužení

K součinitel deformační citlivosti

ε poměrné prodloužení

Polovodičové tenzometry jsou oproti drátkovým a fóliovým tenzometrům až 100x citlivější a jejich zástavbové rozměry jsou menší (cca 2–3 mm). Zdroj (10) uvádí změnu odporu polovodičového tenzometru jako vztah:

$$R_{\varepsilon,t} = R_{0,25}(1 + a(t - 25) + b(t - 25)^2) + \\ + R_{0,25}[1 + C_1(\varepsilon + (\alpha_{mat} + \alpha_{Si})(t - 25)) + C_2(\varepsilon + (\alpha_{mat} + \alpha_{Si})(t - 25))^2]$$

Kde

$R_{0,25}$ odpor volného tenzometru při 25 °C (W)

$R_{\varepsilon,25}$ odpor deformovaného tenzometru při stálé teplotě 25 °C (W)

C_1 lineární koeficient deformační rovnice

C_2 kvadratický koeficient deformační rovnice

a, b teplotní součinitelé odporu nenalepeného tenzometru

ε poměrná deformace (m/m)

t teplota (°C)

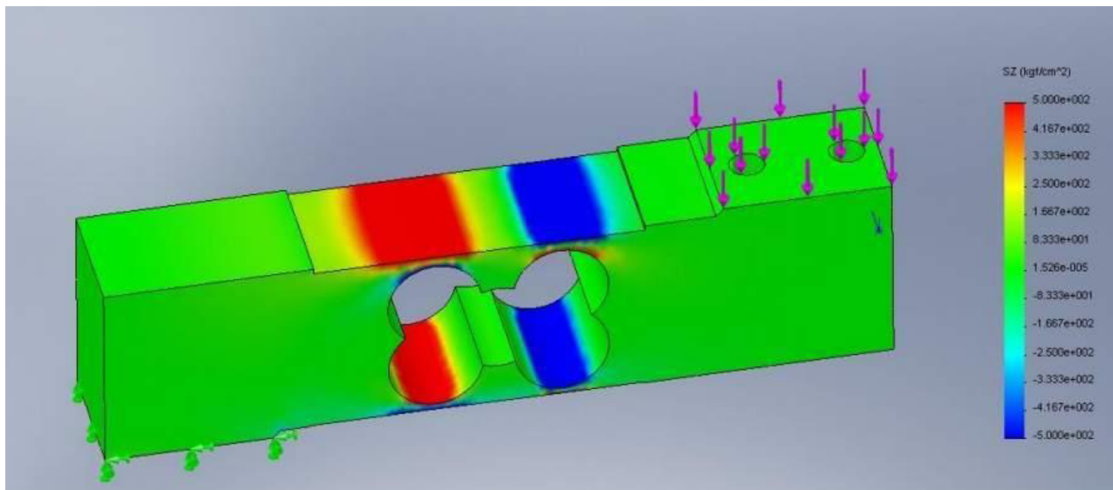
α_{mat} součinitel teplotní roztažnosti materiálu, na kterém je tenzometr nalepen

α_{Si} součinitel teplotní roztažnosti křemíku – $2,8 \cdot 10^{-6}$ (1/°C)

Obecně platí, že polovodičové tenzometry jsou mnohem citlivější na teplotní změny než tenzometry drátkové a fóliové. Z důvodu teplotní kompenzace se u tenzometrů používá půlmůstkové nebo celomůstkové zapojení, kde dochází při použití stejných tenzometrů k teplotní kompenzaci. Dalším důležitým aspektem je správné namáhání tenzometrů. (10)

Nejdůležitější částí tenzometrického senzoru je jeho deformační člen, na kterém jsou nalepené tenzometry. Jedná se o tělo ze speciální pružinové antikorozní oceli, která má jemnou strukturu a malou hysterezi. Deformační člen tenzometru musí být poddajný ve směru zatížení (na obrázku 19 je zobrazeno zatížení silou F), symetrický a chráněn proti přetížení. Konstrukce je volena tak, aby byl výstup po dobu zatěžování lineární. (17)

Obrázek 19 Tenzometrický taktilní senzor se dvěma otvory (17)



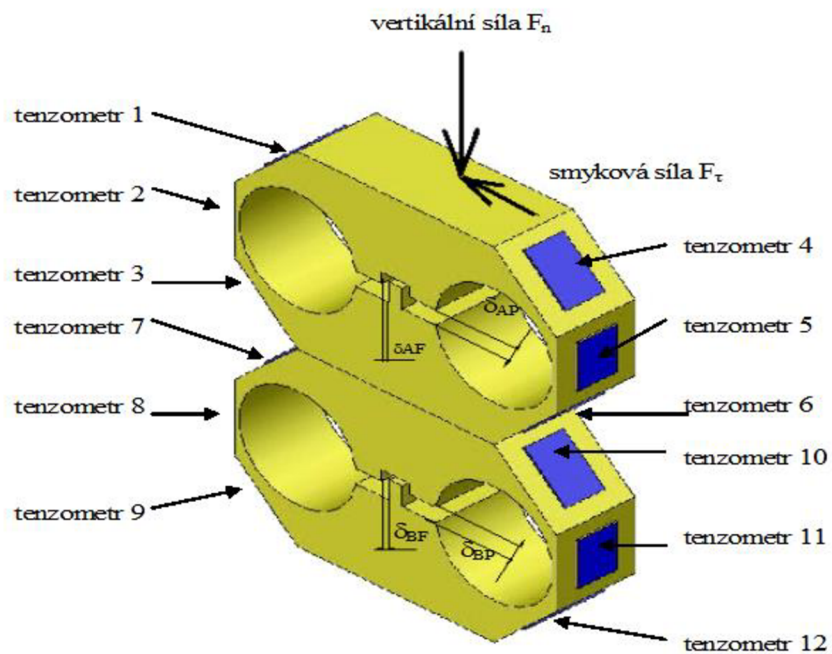
Existují různé druhy používaných konstrukcí. Na obrázku 19 výše je konstrukce senzoru se dvěma otvory. Dále existuje senzor ve tvaru vetknutého nosníku a deformační člen tvaru S. Při měření byl použit senzor viz obrázek 20.

Obrázek 20 Tenzometrické taktilní senzory (Autor práce)



Pro zjištění smykové složky se používá například konstrukce senzoru DOTS (Double octagon tactile sensor). Tento senzor je používán v robotice pro zjištění normálové a smykové úchopové síly. Základem je osmiúhelníkový tvar, který je polepen tenzometry pro měření normálové a tangenciální složky úchopové síly. Obvykle se senzor používá zdvojený, pro dosažení větší přesnosti měření. Tento senzor má dostatečně velké maximální zatížení a vysokou citlivost pro použití v robotice. Uspořádání taktilního senzoru je zobrazena na obrázku 21 níže. (2)(12)

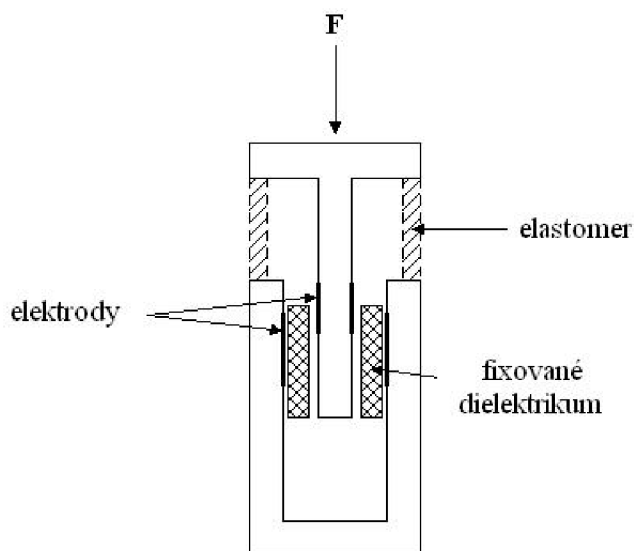
Obrázek 21 Senzor konstrukce DOTS (2)



5.3 Kapacitní taktilní senzory

Autor zdrojů (2) a (12) uvádí, že u těchto taktilních senzorů je využíváno změny společných ploch deskových elektrod nebo válcových, které se zasouvají do sebe. U tohoto typu senzoru je měřena deformace působící silou F pružného členu se známými mechanickými vlastnostmi. Konstrukce kapacitního taktilního senzoru je znázorněna na obrázku 22 níže.

Obrázek 22 Konstrukce válcového kapacitního senzoru (2)



Kapacitní taktilní senzory této konstrukce vycházejí ze známého vztahu pro válcový kondenzátor.

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Kde

- C kapacita senzoru (F)
- ϵ_0 permitivita vakua (Fm^{-1})
- ϵ_r relativní permitivita (-)
- l délka překrytí válců (l)
- r_1 poloměr vnitřního válce (m)
- r_2 poloměr vnějšího válce (m)

5.4 Taktilní senzory s piezoelektrickými materiály

Pro převod síly na elektrický signál je u těchto senzorů využitého piezoelektrického jevu. Jedná se o fyzikální jev, při němž deformace krystalu některých dielektrických látek způsobí dipólový elektrický moment objemového elementu. Polarizace krystalu je způsobena elektrickými momenty všech objemových elementů. Autoři zdroje (2)(11)(12) uvádějí, že pokud je z křemene vyjmut krystal, jehož příčná osa souhlasí s elektrickou a podélná s mechanickou, tak se při působení síly objeví náboj o velikosti vycházející ze vztahu 4. Působení sil a výbrus jsou popsány na obrázku 23 níže.

$$Q = dF_x$$

$$Q = dF_y \frac{b}{a}$$

Kde

Q náboj na elektrodách výbrusu (C)

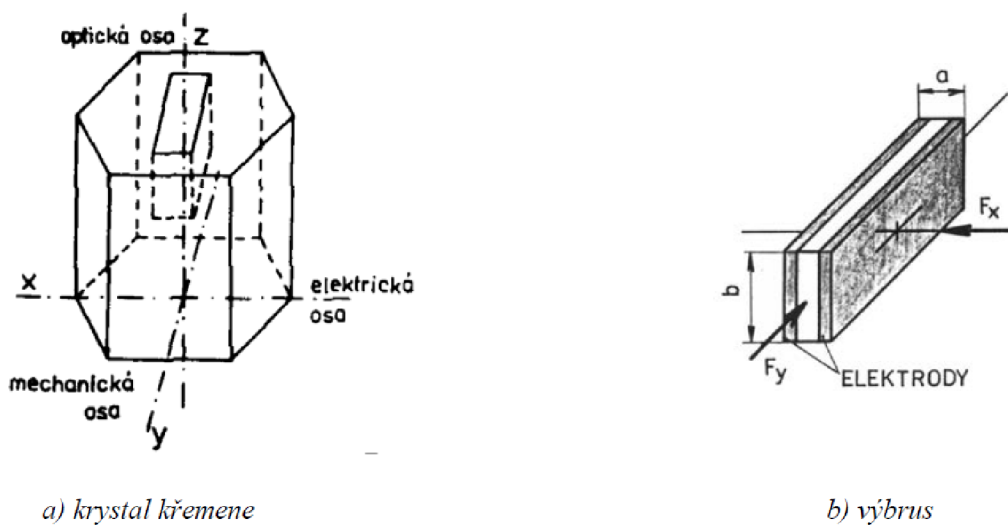
d piezoelektrická konstanta (C.N⁻¹), pro SiO₂ je $d = 2,3 \cdot 10^{-12}$ C.N⁻¹

F_x síla působící na výbrus krystalu (N)

F_y síla působící na výbrus krystalu (N)

a, b rozměry výbrusu

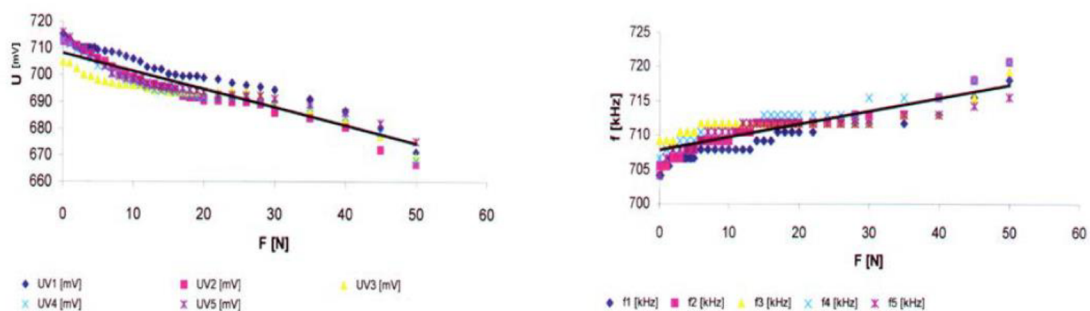
Obrázek 23 Piezoelement (2)



Mezi piezoelektrické materiály patří křemen a piezoelektrická keramika (titaničitan barnatý BaTiO_3 , titaničitan olovnatý PbTiO_3 , zirkonát olova PbZrO_3 a niobáty) nebo polyvinylidenfluorid (PVDF_2) apod. Tato čidla jsou konstrukčně velmi jednoduchá. Výhodou je malý rozměr čidla, nevýhodou velký vnitřní odpor, který vyžaduje vstupní odpor vyhodnocovacích obvodů řádově $10^{12} \Omega$. Piezoelektrické snímače jsou vhodné pro snímání dynamických sil nebo vibrací. Při snímání statických sil musí být použito nábojového zesilovače. (2)(12)

Měřená zatěžovací síla mění velikost vnitřního odporu piezoelektrického taktilního senzoru. Amplituda kmitů piezorezonátoru závisí nepřímo úměrně na velikosti vnitřního odporu, který nepřímo závisí na měřené zatěžovací síle. Vlivem zatížení se zhoršuje činitel jakosti, a tím se zvětšuje tlumení oscilátoru. Na amplitudu kmitů má rovněž vliv okolní prostředí, např. uchycení piezorezonátoru, tlumící guma apod. Na obrázku 24 níže je v grafu vyobrazena závislost napětí (vlevo) a frekvence (vpravo) na zatěžovací síle senzoru. (2)(12)

Obrázek 24 Závislost napětí a frekvence na zatěžovací síle piezoelektrického senzoru (2)

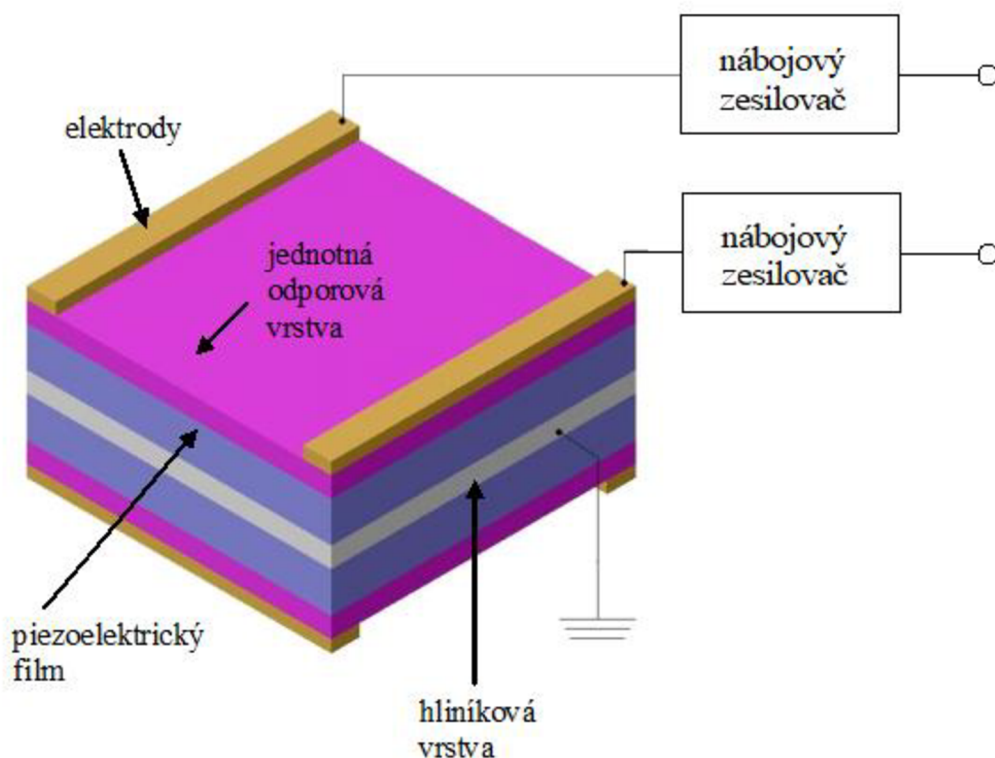


Hlavním prvkem senzoru je piezoelektrický rezonátor. Vlastnosti senzoru jsou dány piezoelektrickými a elastickými koeficienty a moduly a geometrickými rozměry rezonátoru. Tyto parametry závisí především na umístění piezoelektrického rezonátoru v senzoru. Hodnota elektromechanického vazebního činitele by měla být větší než 200, což závisí na geometrických rozměrech rezonátoru. (2)(12)

Geometrické rozměry rezonátoru jsou specifickým problémem, protože mají přímý vliv na hodnoty rezonanční frekvence rezonátoru. Na piezorezonátoru vznikají příčné, podélné a tloušťkové kmity, každé o jiné rezonanční frekvenci. Které z nich převládnu, záleží na poměru jednotlivých rozměrů rezonátoru a na tlumení krystalu. Může dojít též ke změně těchto kmitů v průběhu zatěžování. To se projevuje nespojitostmi statické zatěžovací charakteristiky. Optimální se jeví kruhový rezonátor, jehož průměr je mnohonásobně větší než jeho tloušťka.

Hlavní problematikou konstrukce taktilního senzoru s piezoelektrickými materiály je umístění rezonátoru, jeho připojení ke zdroji kmitů a mechanické uchycení. Pokud je rezonátor umístěn mimo uzly rezonančních kmitů, tak dochází k jeho tlumení. Tato podmínka je téměř nedosažitelná a v praxi je snaho co nejlíže se jí přiblížit. Konstrukce takového taktilního senzoru je znázorněna na obrázku 25 níže. (2)(12)

Obrázek 25 Konstrukce piezoelektrického senzoru s tenkým polymerem (2)



5.5 Magnetické taktilní senzory

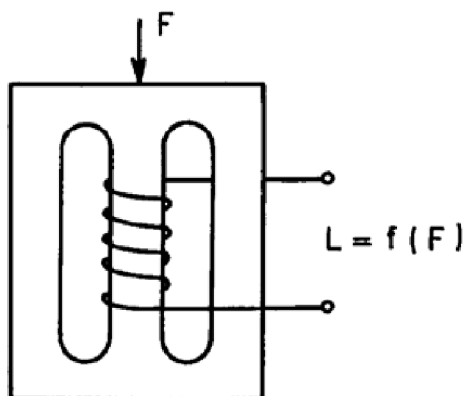
Magnetické taktilní senzory fungují na principu magnetostrikce nebo na principu magnetoanizotropie. U těchto senzorů je využito změny magnetických vlastností feromagnetik.

5.5.1 Magnetostrikční taktilní senzory

Magnetostrikční taktilní senzory využívají fyzikálního jevu magnetostrikce. Při tomto fyzikálním jevu se využívá změny permeability feromagnetického materiálu na základě změny jeho rozměrů vlivem zatěžovací síly. Tento senzor je také nazýván magnetický tenzometr.

Na obrázku 26 je znázorněn tento typ senzoru, který je tvořen uzavřeným magnetickým okruhem a minimálně jedním vinutím. Pro tento senzor je vhodné použití materiálu s vysokou permeabilitou a malou hodnotou magnetické indukce při sycení. Těmto požadavkům vyhovuje permalloy, což je slitina niklu, železa a molybdenu. (2)

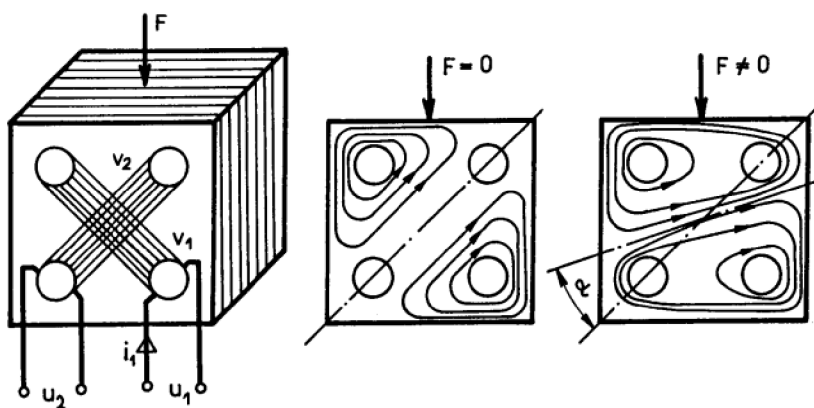
Obrázek 26 Magnetostrikční taktilní senzor (2)



5.5.2 Magnetoanizotropní taktilní senzory

Tyto senzory fungují na principu deformace magnetického pole při deformaci feromagnetika. Senzor je tvořen feromagnetikem se čtyřmi otvory, jimiž je provlečeno kolmo na sebe primární a sekundární vinutí, jak je patrné z obrázku 27.

Obrázek 27 Magnetoanizotropní taktilní senzor (2)



V klidovém stavu, kdy na senzor nepůsobí žádná síla není na sekundárním vinutí žádné napětí. Při působení síly dochází k anizotropnímu rozložení permeability, čímž je rozložena magnetická vodivost. To má za následek zasáhnutí sekundárního vinutí částí magnetického toku primárního budícího vinutí. Velikost napětí je úměrná působící síle. (2)

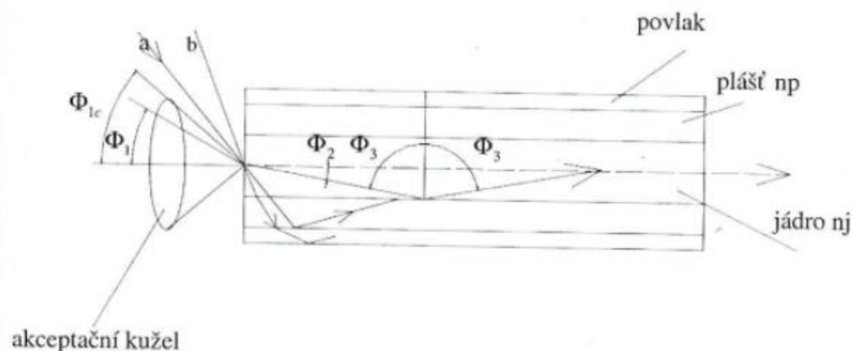
6 Problematika senzorů s optickým vláknem

Senzory s optickým vláknem využívají odrazu optického paprsku v optickém vlákně na rozhraní jádra s indexem n_j a pláštěm s indexem n_p , kde dochází k odrazu světla. Pokud je odraz totální, dochází k šíření světla, jinak dochází k útlumu. Kritický úhel ϕ_{3c} pro totální odraz se určuje ze Snellova zákona (5).

$$\sin\phi_{3c} = \frac{n_p}{n_j} < 1$$

Struktura užívaná pro vláknový vlnovod je znázorněna na obrázku 28 níže. Je-li úhel dopadu větší než kritický, nastávají nejdříve odrazy na rozhraní pláště a povlaku (paprsek a) a světlo se šíří pláštěm. Další zvyšování ϕ_1 má za následek lom světla do povlaku (paprsek b). (18)

Obrázek 28 Vláknový vlnovod (18)



Z vlnové teorie plyne, že ne všechny paprsky vstupující v akceptačním kuželu projdou až na konec optického vlákna, ale existuje maximální konečný úhel úhlů, tzv. vidů (písmeno m v rovnici). Prostupující vlny musí splňovat následující podmínku (6).

$$\frac{\Delta l}{\lambda} 2\pi + 2\phi_r = 2m\pi$$

Kde

Δl rozdíl drah

λ vlnová délka

ϕ_r fázový posuv při odrazu

Maximální počet vidů pro válcové optické vlákno je dán následující rovnicí. Mnohavidová vlákna mají větší poměr $\frac{d}{\lambda}$, pokud je $m_{max} < 2$, jedná se o jednovidová vlákna.

$$m_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} NA \right)^2$$

Kde

NA numerická aperatura

d průměr jádra

λ vlnová délka

m_{max} Maximální počet vidů

Numerická aperatura se používá k definici vrcholového úhlu akceptačního kužele (ϕ_{1c}) podle následujícího vztahu.

$$NA = \sqrt{n_j^2 - n_p^2} = \sin \phi_{1c}$$

6.1 Součásti snímače s optickým vláknem

Základním prvkem OVS je optické vlákno, které svými vlastnostmi umožňuje velmi dobrou odolnost téměř v každém prostředí. Další součástí jsou konektory, které propojují vlákna s další součástí OVS, kterou jsou zdroje a detektory optického záření.

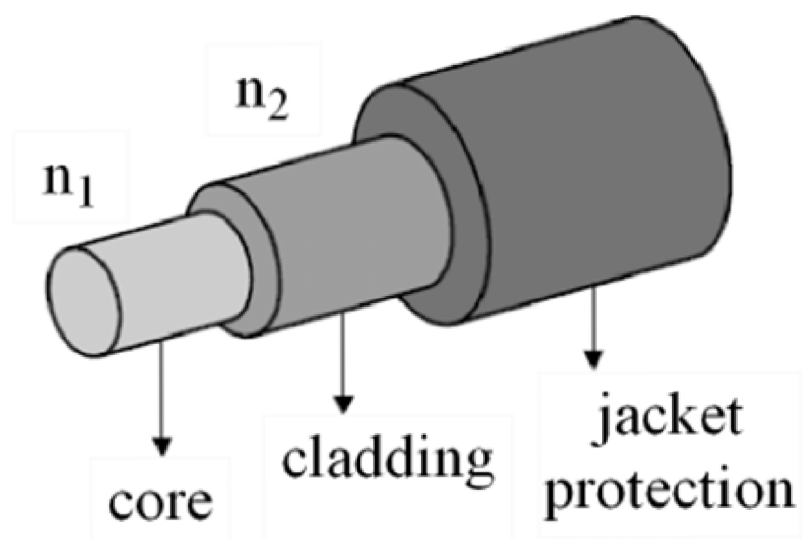
6.1.1 Optická vlákna

Optická vlákna jsou velmi rozšířená a existuje velké množství druhů s rozdílnými mechanickými a optickými vlastnostmi. Proto je důležité se seznámit s těmito vlastnostmi před použitím optického vlákna. Výhodami optických vláken jsou šířka pásma, malé rozměry a hmotnost, elektrická izolace, bezpečnost přenosu optického signálu, nízké ztráty při přenosu, potenciálně nízké náklady, hutnost a flexibilita. Konstrukce optického vlákna je vyobrazena na obrázku 29 níže.

Ve vláknové optice se používají tři základní přenosová vlákna:

- 850nm mnohovidová optická vlákna
- 1300nm mnohovidová optická vlákna
- 1310nm jednovidová optická vlákna
- 1550nm mnohovidová optická vlákna

Obrázek 29 Struktura optického vlákna (19)



Základními vlastnostmi optických vláken jsou:

- Útlum
- Disperze
- Numerická apertura

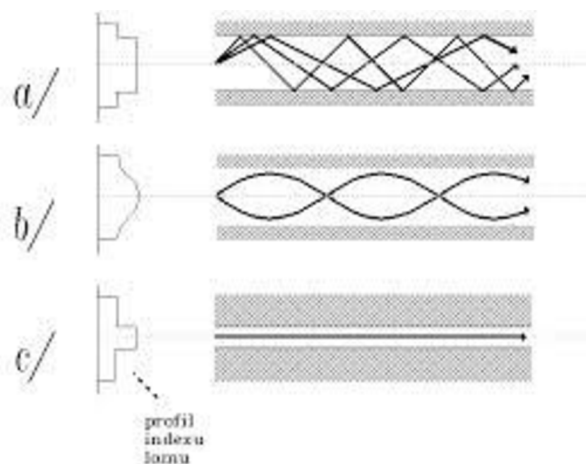
Útlum optických vláken je dán součtem absorpce, reyleighova rozptylu, rozptylu na makroskopických neregularitách, rozptylu na mikroohybech a rozptylu na makroohybech. Je udáván v Db/km. (18)

Disperze optických vláken je příčinou zkreslení a deformace přenášeného optického signálu. Disperze může být chromatická, která se dále dělí na materiálovou a vlnovodnou. Dalšími druhy je disperze polarizační vidová, která je způsobena rozdílnou rychlostí šíření navzájem kolmých složek téhož vidu, a vidová, jenž je způsobena rozdílnou dobou šíření jednotlivých vidů mnohovidovým vláknem. (18)

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 6, tak numerická apertura je podmínkou pro vedení vln ve vlnovodu znamenající totální odraz paprsku na rozhraní jádra a pláště.

Optické vlnovody mohou být rozděleny na mnohovidové se skokovou změnou indexu lomu, mnohovidové s gradientní změnou indexu lomu a jednovidová vlákna. V případě skokové změny indexu lomu je trajektorie paprsků ve tvaru lomených úseček a útlum se pohybuje mezi 5 a 10 dN/km. Oproti tomu gradientní změnou indexu lomu je trajektorie paprsku ve tvaru sinu, což umožňuje vyšší šířku pásma a útlum těchto vláken se pohybuje mezi 0,8 a 5 dB/km. U jednovidových vláken se šíří pouze jeden osový paprsek a jejich útlum se pohybuje pouze kolem 0,3 dB/km. Mnohovidová vlákna mají větší hodnotu NA a snadněji se díky tomu navazuje světlo do vlákna, budí pomocí LED a spojují vlákna mezi sebou. Trajektorie jsou znázorněny na obrázku 30 níže. (18) (19)

Obrázek 30 Trajektorie paprsků různých druhů vláken (20)

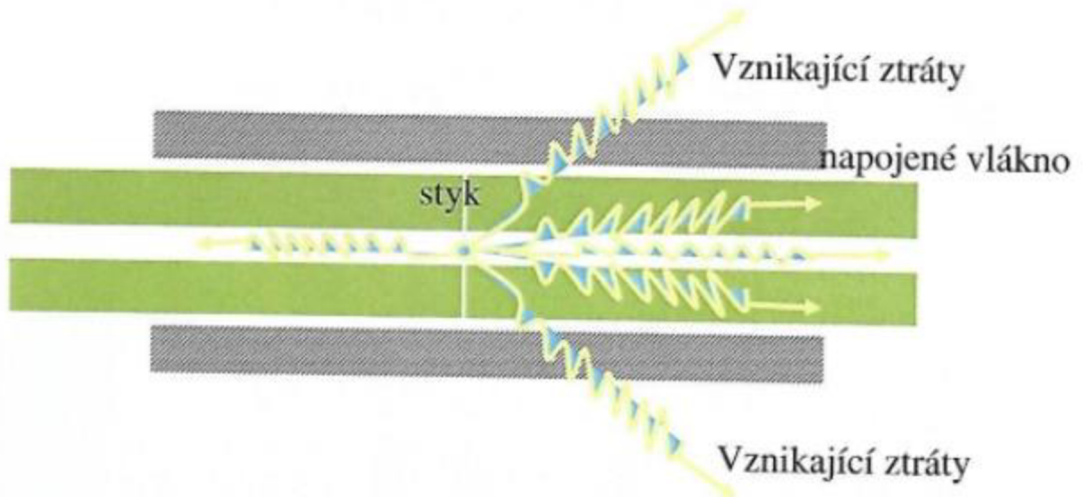


Vzhledem k nárokům na kvalitu a jakost vyráběného optického vlákna je výroba velmi problematická. Vyrábí se z tzv. preformy, která se následně zahřeje a tažením je vytvořeno optické vlákno, které podléhá zpětné kontrole průměru. Následně jsou aplikovány ochranné vrstvy a výsledek je navíjen na bubny. V některých aplikacích je optické vlákno nedostatečné a je nutné použít optický kabel, který je tvořen svazkem optických vláken, ochranou proti vlhkosti a zvýšenou mechanickou ochranou. (18)

6.1.2 Konektory

Spojování kabelů je uskutečňováno pomocí kabelových spojek. Každá spojka je chráněna proti vlhkosti a dalším vnějším vlivům. Pomocí těchto spojek je spojeno každé vlákno zvlášť, a to pomocí svařování nebo pomocí konektorů. Při použití konektoru však vznikají ztráty, které jsou znázorněny na obrázku 31 níže. Používané druhy optických vláken jsou na obrázku 32.

Obrázek 31 Ztráty vzniklé v konektorech (18)



Obrázek 32 Používané typy konektorů optických kabelů (18)

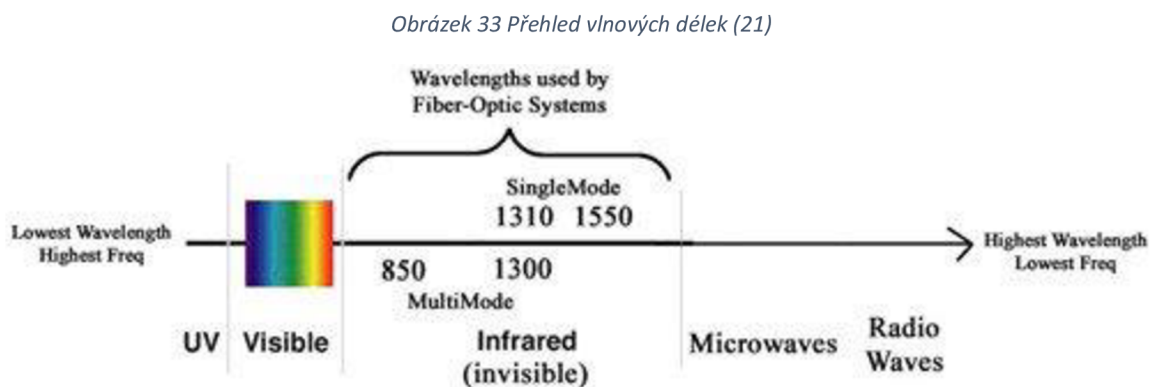
Angled air-gap connector			Physical contact connector							Angled physical contact connector																				
WAN CATV			LAN WAN							WAN CATV																				
Air-gap			.../PC							.../APC																				
<table border="1"> <tr> <th>Insertion loss</th> <th>Return loss</th> </tr> <tr> <td>0.4 to 0.8 dB</td> <td>> 60 dB</td> </tr> </table>			Insertion loss	Return loss	0.4 to 0.8 dB	> 60 dB	<table border="1"> <tr> <th>Insertion loss</th> <th>Return loss</th> </tr> <tr> <td>< 0.5 dB</td> <td>> 30 dB</td> </tr> <tr> <td>< 0.5 dB</td> <td>> 40 dB</td> </tr> <tr> <td>< 0.5 dB</td> <td>> 50 dB</td> </tr> </table>							Insertion loss	Return loss	< 0.5 dB	> 30 dB	< 0.5 dB	> 40 dB	< 0.5 dB	> 50 dB	<table border="1"> <tr> <th>Insertion loss</th> <th>Return loss</th> </tr> <tr> <td>< 0.5 dB</td> <td>> 60 dB</td> </tr> </table>					Insertion loss	Return loss	< 0.5 dB	> 60 dB
Insertion loss	Return loss																													
0.4 to 0.8 dB	> 60 dB																													
Insertion loss	Return loss																													
< 0.5 dB	> 30 dB																													
< 0.5 dB	> 40 dB																													
< 0.5 dB	> 50 dB																													
Insertion loss	Return loss																													
< 0.5 dB	> 60 dB																													
SIMPLEX																														
VFO	EC-RACE	HRL-11	FC	ST	SC	D4	Biconic	DIN-LSA	E2000	Mini-BNC	F-SMA	Escon	SC Duplex	Duplex-MIC FDDI																
			.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC	.../PC																
			.../APC	.../APC	.../APC			HRL-10	.../APC				.../APC																	

6.1.3 Zdroje optického záření

Zdroje optického záření se dělí na širokopásmové, úzkopásmové a úzkopásmové koherentní. Mezi širokopásmové zdroje patří halogenové žárovky, výbojky, zdroje ultrafialového záření apod. Úzkopásmovými zdroji optického záření jsou elektroluminiscenční dioda LED a superluminiscenční dioda apod. Úzkopásmovými koherentními zdroji jsou myšleny lasery. (18)

U všech těchto druhů záření je nutné při volbě dbát na jejich základní parametry. Těmi jsou především geometrické vlastnosti emitovaného záření, spektrální vlastnosti emitovaného záření, elektrooptické přenosové charakteristiky a vliv okolního prostředí na daný zdroj světla.

Nejpoužívanějšími zdroji světla v OVS jsou polovodičové zdroje optického záření, které jsou dobře přizpůsobené vláknové optice a dosahují větší účinnosti navázání optického výkonu do optických vláken. Další výhodou je, že je možné je modulovat budícím proudem. V senzorech, kde se nevyžaduje koherentního záření se používají elektroluminiscenční diody (LED), které mají širší spektrum vyzařování. V oblasti vlnových délek okolo 0,85 μm se používají diody na bázi GaAlAs, u větších vlnových délek jsou to diody na bázi GaInAsP. Na následujícím obrázku jsou znázorněny vlnové délky a k nim příslušná optická vlákna používaná v optovláknových senzorech. (18) (21)



6.1.4 Detektory

V optovláknových optických senzorech se využívají různé druhy fotodetektorů, mezi nejpoužívanější patří fotonásobiče, fotodiody PIN, lavinová dioda, fotodiody APD, fotorezistory, dvojice PIN-fet, soustava prvků CCD a jiné. (18)(21)

K detekci záření v oblasti blízké infračervené oblasti spektra, kde fotodetektory nejčastěji pracují, se využívá vnější a vnitřní fotoemisivita. Vnější fotoemisivita se používá u fotonásobičů a vnitřní u polovodičových fotodetektorů. (18)(21)

U fotodetektorů je důležitý malý detekční limit, vysoká citlivost, detekce záření v zadané spektrální oblasti, vysoká kvantová účinnost, velká šířka frekvenčního pásma, rychlá odezva, malá úroveň šumu a velká životnost. (18)(21)

6.2 Optovláknové senzory

Optické vláknové senzory je možné použít pro téměř všechna měření fyzikálních veličin. Svými vlastnostmi převyšují některé klasické senzory a v některých je úplně nahrazují. První optovláknové senzory určené pro vojenskou techniku vznikaly v 70. letech 20. století. Jednou z prvních aplikací byly hydrofony, což jsou mikrofony určené k detekci zvuků ve vodě. Dalšímu rozvoji dopomohl vznik polovodičové techniky, techniky optických vláken a optoelektroniky. (18)

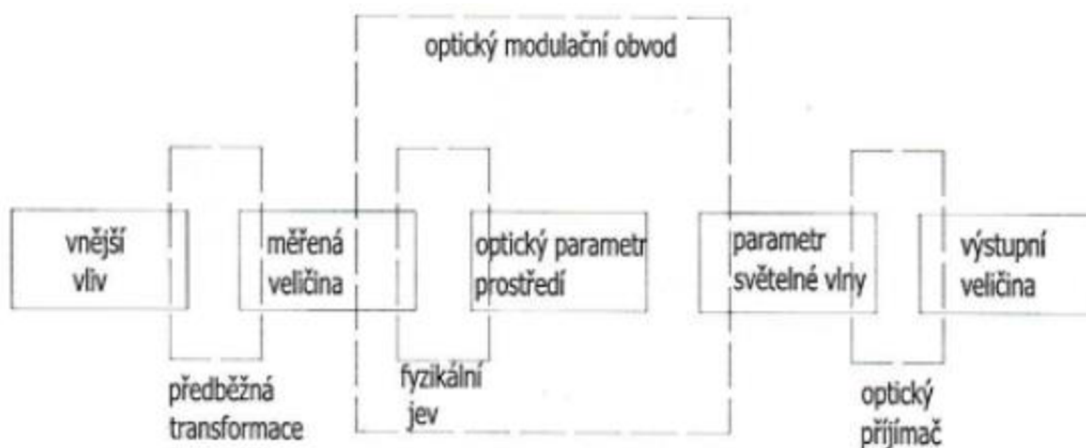
V porovnání s běžnými senzory vynikají vysokou citlivostí, geometrickou přizpůsobivostí a společnou technologickou základnou pro senzory různých fyzikálních veličin. Optovláknové senzory je možné použít v prostředí s vysokými teplotami, vysokým napětím v hořlavých prostředích apod. (18)

6.2.1 Principy OVS

Optovláknové senzory mají na vstupu zdroj optického záření, který injektuje spojitý nebo impulsový optický signál do optického vlákna. Na výstupu senzoru je fotodetektor, který přijímá senzorem modulovaný optický signál. Aktivní součástí senzoru jsou elektrické prvky a obvody na řízení zdroje, fotodetektoru a na zpracování detekovaného signálu.

Podstatou senzoru je snímanou veličinou vyvolaný fyzikální jev, který působí mezi zdrojem a detektorem světla, který způsobuje změnu přenášeného optického signálu odpovídajícího snímané veličině. Princip transformace fyzikální veličiny je popsán obrázkem 34.

Obrázek 34 Transformace fyzikálních veličin v OVS (18)



Pokud je možné rozlišit vstupní a výstupní optické vlákno, tak se jedná o přenosový optovláknový senzor, který působí jako pasivní převodník ve středu sloučení optického vlákna a způsobuje modulaci optického signálu přenášeného optickým vláknem. Pokud není možné fyzikálně rozlišit vstupní a výstupní optické vlákno, tak se jedná o optovláknový senzor odrazový.

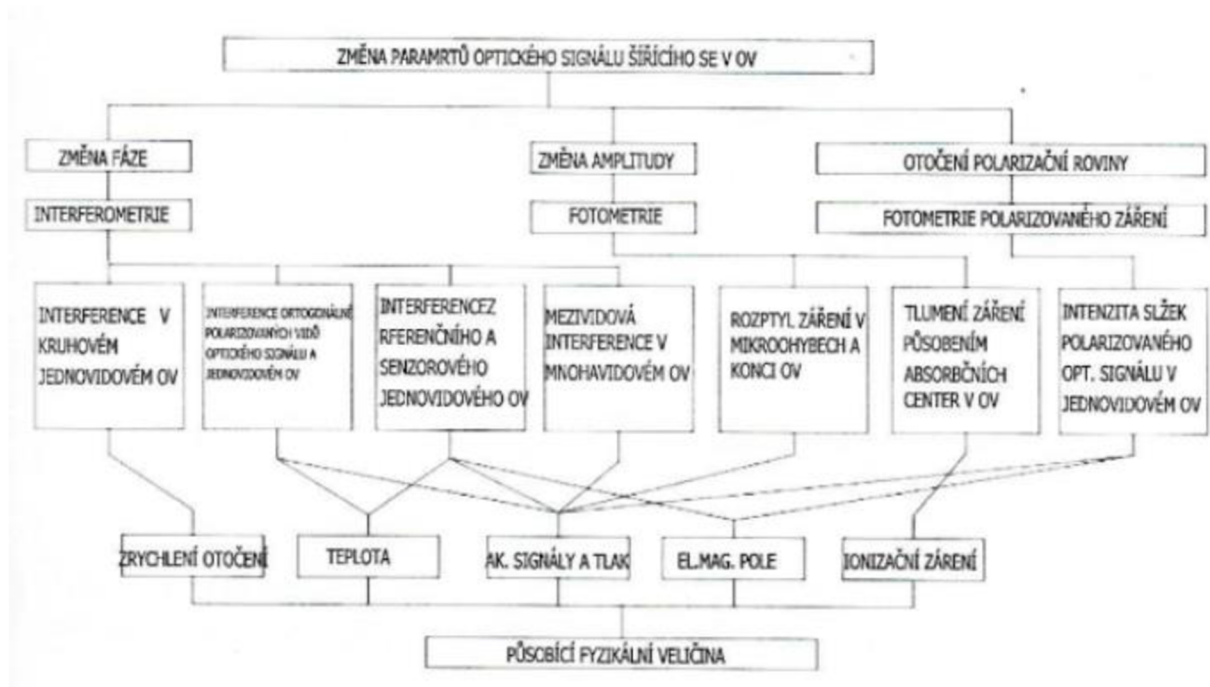
6.2.2 Rozdělení OVS

Dalším rozdělením OVS je rozdělení na vlastní a nevlastní optické senzory. U vlastních OVS je použito optické vlákno jako citlivý prvek. U senzorů, kde se vlákno používá jako prvek vstupu a výstupu se jedná o nevlastní OVS.

Podle typu použitých vláken je možné rozlišit senzory na jednovidové a mnohovidové. Jednovidové senzory používají jednovidové optické vlákno a koherentní zdroj záření. Snímacím prvkem těchto senzorů je optické vlákno, na které působí fyzikální veličina, která se

vyhodnocuje na základě změny vlastností optického vlákna. Mnohovidové senzory využívají mnohovidové optické vlákno a nekoherentní zdroj záření. Využívají odvod části intenzity světla z optického vlákna, přerušení optického vlákna nebo změnu tlumení optického vlákna, způsobující modulaci intenzity optického signálu. Přehled typů některých optovláknových senzorů je na obrázku 35 níže. (18)

Obrázek 35 Rozdělení senzorů (18)



6.2.3 Důležité parametry OVS

- Citlivost – vyjádřena pomocí hodnoty napětí měronosného signálu na výstupu při působení jednotkové snímané veličiny
- Práh citlivosti – velikost snímané veličiny při působení měronosného signálu, který se na výstupu rovná střední kvadratické hodnotě vnitřních šumů senzoru
- Dynamický rozsah – určen intervalem přípustných hodnot měřené veličiny, určeným prahem citlivosti a maximální přípustnou hodnotou snímané veličiny
- Linearita – lineární závislost hodnoty napětí měronosného signálu na výstupu detekčního systému senzoru od hodnoty snímané veličiny

6.2.4 Rozdělení OVS podle fyzikálního principu

Hlavním rozdělením optovláknových senzorů podle zdroje (2) a (18) je podle fyzikálního principu. V této kapitole budou podrobněji přiblíženy amplitudové OVS, protože mezi ně spadají i senzory s porušením okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí, které jsou předmětem této práce. Krátce bude představen princip fázových OVS.

Fázové optovláknové senzory jsou založeny na fázové modulaci světelné vlny šířící se v optickém vlákne. Tyto senzory jsou velmi citlivé a je možné měřit velmi malé změny optického signálu. Snímaná fyzikální veličina způsobuje změnu fáze světelné vlny prostřednictvím změny délky, indexu lomu a průřezu optického vlákna. Základem těchto senzorů jsou interferometry nebo Fabryho-Perotov rezonátor. Optické interferometry můžeme rozdělit do 3 skupin:

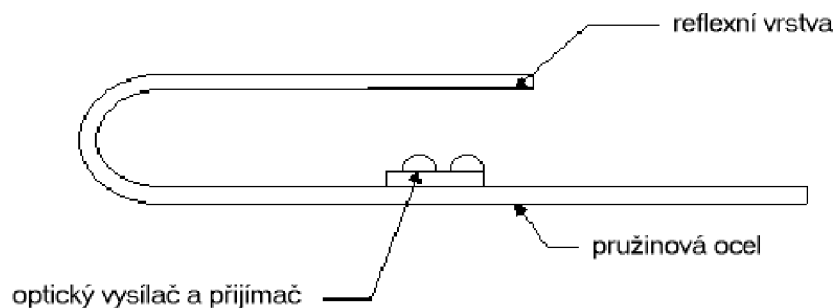
- Dvojramenný jednovidový interferometr (Machov-Zehnderův nebo Michelsonov) využívá porovnání fáze světelné vlny, která se šíří sensorovým optickým vláknem a vlny, která se šíří referenčním vláknem
- Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou (Sagnacův) porovnává fázi dvou světelných vln, které se šíří proti sobě v cívice optického vlákna
- Mezividový interferometr využívá interferenci mezi dvěma nebo více vidy světelné vlny, které se šíří stejným optickým vláknem. Jeho nevýhodou je problém s vyhodnocením interferenčního obrazu.

Z fázových OVS se nejčastěji používají senzory s Michelsonovým interferometrem, který se používá ke snímání fyzikálních veličin, které způsobují změnu odrazových vlastností konce sensorového optického vlákna. Mohou se s ním měřit například velmi malé posuny, rychlost pohybu externího zrcadla a na základě Dopplerova jevu je možné měřit rychlost pohybujících se částic.

Amplitudové optické senzory využívají amplitudové modulace optického signálu šířícího se optickým vláknem a je jí možné dosáhnout jedním z následujících způsobů:

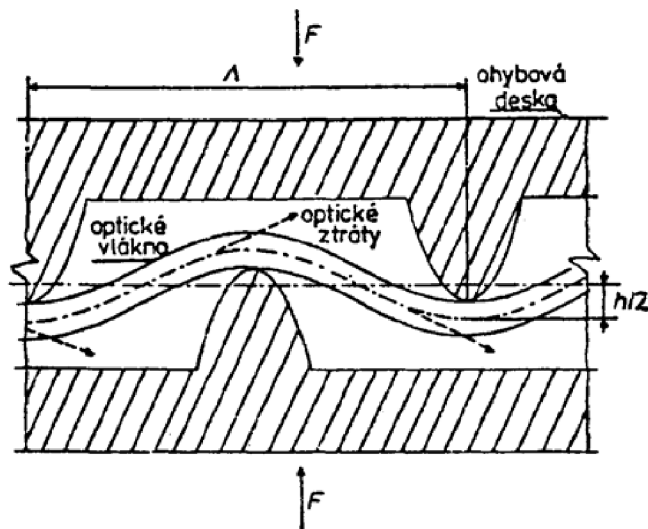
- a) **Změnou tlumení** – U těchto sensorů je jako citlivá část využité optické vlákno nebo optické prostředí mezi vstupním a výstupním optickým vláknem. Tento typ sensorů se používá například pro měření radioaktivního záření a jako senzor teploty. (2)(18)
- b) **Změnou přechodu a odrazu světla** – U těchto sensorů je změna intenzity dosažena přerušením optického vlákna a ovlivňováním vazby mezi jeho konci. Je snímána změna vysílané energie, která se vrací od reflexní vrstvy do snímacího vlákna s detektorem. Konstrukce tohoto senzoru je na obrázku níže. (2)(18)

Obrázek 36 Senzor s pružným členem a reflexní vrstvou (2)



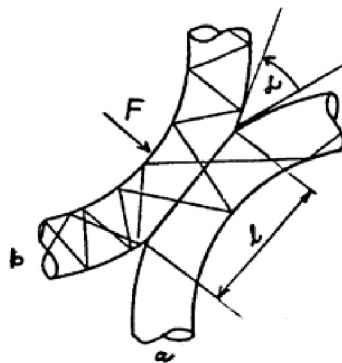
- c) **Porušením okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí** – U těchto senzorů se využívá porušení podmínky úplného vnitřního odrazu např. na rozhraní mezi jádrem a pláštěm optického vlákna. Tuto podmínku je možné porušit buď změnou geometrie (zakřivením) vlnovodu nebo změnou poměru indexů lomu. Při ohýbání optického vlákna pod kritický poloměr nastává porušení podmínky pro vidy vyšších řádů, tj. průnik světla do pláště optického vlákna, čímž je snížena intenzita světla, které se šíří jádrem optického vlákna. Konstrukce mikroohybového snímače je znázorněna na obrázku níže. (2)(18)

Obrázek 37 Mikroohybový snímač (2)



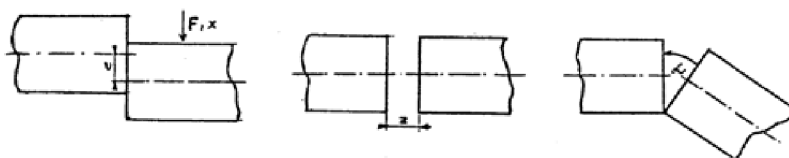
- d) **Změnou vzájemné vazby světlovodů** – Modulace světla se v těchto senzorech uskutečňuje prostřednictvím porušení synchronizace vidů šířících se ve světlovodu nebo přenosem části energie do sousedního světlovodu. V těchto senzorech se využívá optického tunelového jevu. (2)(18)

Obrázek 38 Senzor se vzájemnou vazbou světlovodů (2)



Obě vlákna v místě dotyku mají odstraněn plášť, a tím odhalena jádra, která přicházejí do vzájemného kontaktu, jak je znázorněno na obrázku výše. Při vhodném návrhu parametrů (délka stykové plochy vláken l a úhlu α) vlivem působící síly, a tím těsnější vzájemné vazby, přechází úměrná část energie z prvního vlákna do druhého. Ke zdroji světla je připojeno první optické vlákno k detektoru druhé. Dalším způsobem změny vzájemné vazby je vzájemný posun, který je znázorněn na následujícím obrázku, kde vlivem působící síly dochází k posunu vláken a tím i změně přenášené světelné energie. (2)(18)

Obrázek 39 Senzor se změnou vzájemné vazby (2)



Generování záření – Tyto senzory jsou založené na detekci tepelného záření, které vzniká v ohřívaném úseku optického vlákna nebo ve vhodném materiálu umístěném na konci vlákna. Jejich výhodou je, že nepotřebují zdroj světla a teplotu je možné určit nezávisle od místa ohřívaného bodu. Výkon vyzařovaný na všech vlnových délkách rychle narůstá se zvýšením teploty. (2)(18)

Senzorovou hlavu tvoří safírové vlákno dlouhé 0,3 až 1 mm zakončené vrstvou oxidu iridia a hliníku. Umožňuje určit teploty v rozsahu 500 až 2000 °C, přičemž přesnost měření je přibližně 100krát větší než u termočlánků. (2)(18)

Senzory se změnou tlumení vynikají jednoduchostí konstrukce, která obsahuje pohyblivé mechanické části, používají se však jen v omezené míře vlivem nedostatku materiálů, které mění svůj koeficient tlumení vlivem jiných fyzikálních veličin.

Senzory se změnou odrazu a přechodu světla mají dobrou linearitu a využívají mnohovidová optická vlákna. Jejich největším nedostatkem je poměrně náročná a málo odolná konstrukce mechanických částí, která je potřeba nastavovat s velkou přesností. Jsou využitelné pro měření síly, tlaku, posunutí a veličin snadno přetransformovatelných na uvedené veličiny.

Senzory s porušením okrajových podmínek šíření světla jsou velmi citlivé a kompaktní. Mají jednoduché optické schéma. S vyhotovením nejsou takové problémy jako u senzorů se změnou odrazu a přechodu světla, protože optická část se u těchto senzorů nemusí nastavovat.

Senzory se změnou vzájemné vazby světlovodů mají vysokou citlivost, malé zástavbové rozměry a hmotnost. Jejich nevýhodou je složitost výrobní technologie vzhledem k nárokům na přesnost výroby.

Senzory s generací doplňujícího záření vynikají jednoduchostí konstrukce a nevyžadují zdroj světla. Nevýhodami jsou ohraničená oblast jejich použití a speciální vlákno, které musí být jiného typu než u ostatních senzorů.

Všeobecným nedostatkem amplitudových optických vláknových senzorů je citlivost na změny intenzity světla a v některých případech vysoké nároky na přesnost nastavení a stabilitu mechanické konstrukce.

(2)(18)

7 Studie vhodnosti optických vláken pro použití v taktilních snímačích a návrh měřícího přípravku

Dle rozdělení uvedeném v kapitole 6 lze řadit maticový taktilní plošný snímač mezi amplitudové senzory, které využívají porušení okrajových podmínek pro šíření světla v optickém prostředí. Tyto senzory pracují na základě mikroohybů optických vláken, čímž je měněna geometrie vlnovodů a dochází k porušení zmíněné podmínky, která je definována jako:

$$\phi_c \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Kde

ϕ_c úhel dopadu

n_1 index lomu jádra

n_2 index lomu pláště

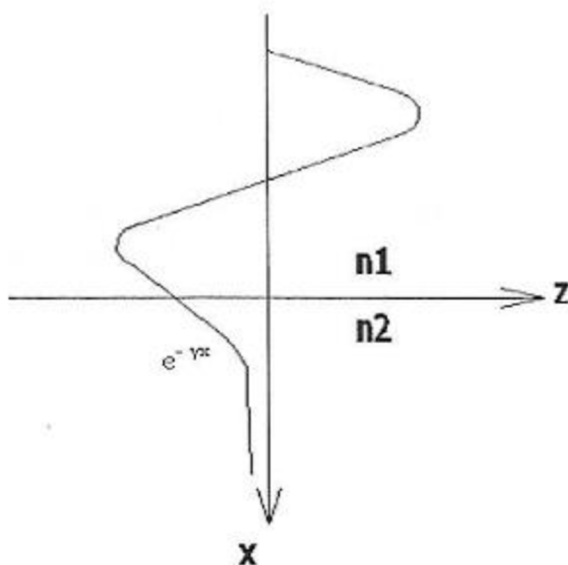
Pokud je $n_1 > n_2$, tak se vlna láme od kolmice. Totální odraz je klíčovým jevem v teorii vlnovodů. Mechanismem vedení vln v těchto vlnovodech je právě totální odraz. V případě překročení mezního úhlu se v prostředí za rozhraním šíří vlna, jejíž amplituda ve směru kolmo od rozhraní ubývá podle exponenciály. Tato vlna se šíří ve směru osy Z (podél rozhraní viz obrázek 40). Je to vlna neuniformní, která má rovinu konstantní fáze kolmou na rozhraní a rovinu konstantní amplitudy má rovnoběžnou s rozhraním. (18)

Obrázek 40 Vznik evalescentní vlny (18)



Této neuniformní vlně se též říká evalescentní (zanikající) vlna, povrchová vlna nebo vlna pomalá. Vznik evalescentní vlny je znázorněn na obrázku 40 výše. Dopadající a odražená vlna nad rozhraním superponuje a vytváří ke směru osy X stojatou vlnu. Rozložení amplitudy pole po obou stranách rozhraní při totálním odrazu znázorňuje obrázek 41. (18)

Obrázek 41 Rozvržení amplitudy pole při totálním odrazu (18)



Při ohybu optického vlnovodu může docházet k pomalejšímu zánikání evalescentní vlny vlivem zmenšení úhlu dopadu vlny na rozhraní jádra a pláště. To může mít za následek vznik tunelujících a vyzařovaných vln přes plášť vlnovodu do okolí, čímž se zvyšují ztráty. Tunelující vlna se vyznačuje tím, že do jistého poloměru má charakter evalescentní vlny a od tohoto poloměru má charakter vlny vyzařované. Tyto vlny jsou nežádané. Překročí-li ohyb vlákna určitý poloměr, dochází k vyzařování světla z vlákna. Paprsek je vedený vlákem na základě totálního odrazu od rozhraní jádra a pláště pod úhlem menším, než je úhel kritický. Dojde-li k ohybu vlákna, úhel dopadu narůstá. Jestliže ne poloměr ohybu malý (řádově několik milimetrů), tak nedochází k totálnímu odrazu, protože úhel dopadu je větší než kritický úhel a dochází k vyzařování do pláště vlákna. (18)

Pro kritický poloměr křivosti R_k , kdy ztráty prudce narůstají, platí pro dvouvrstvé optické vlákno s homogenním jádrem vztah:

$$R_k = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Kde

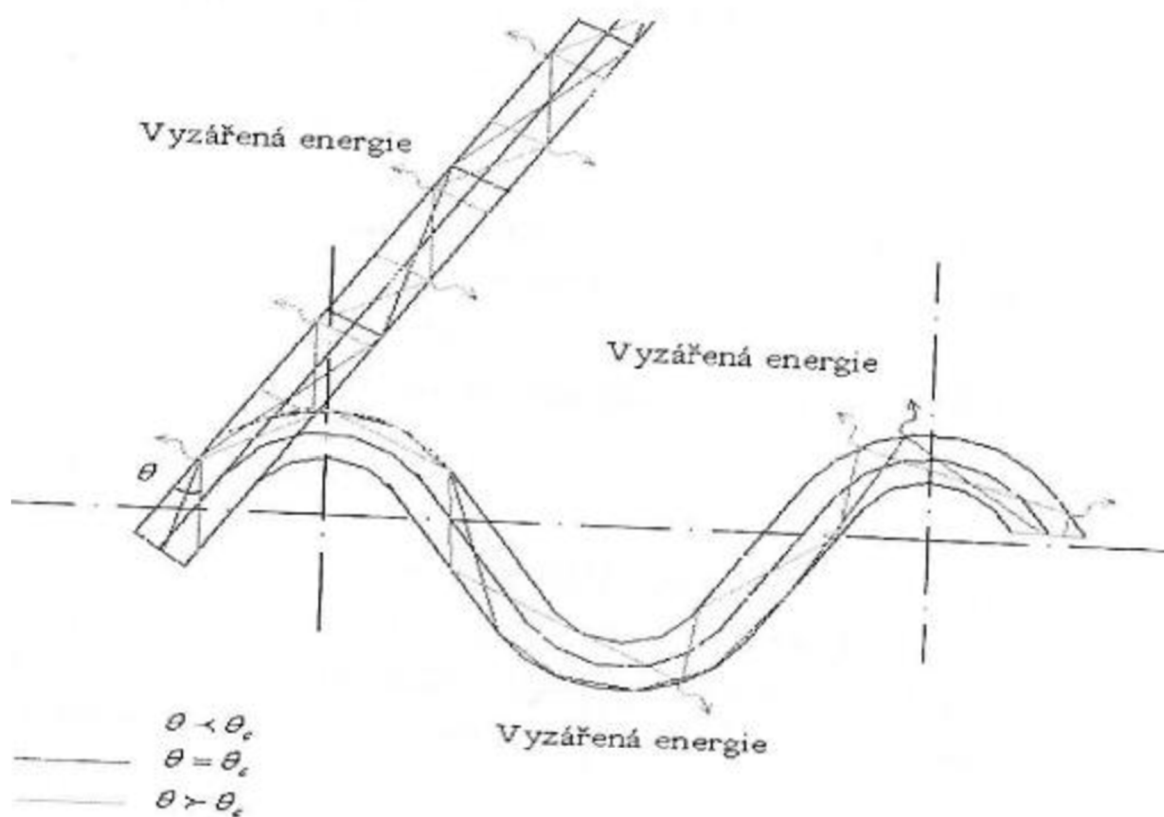
n_1 index lomu jádra

n_2 index lomu pláště

λ vlnová délka

Tento vztah platí pro vlny vzdálené meznímu kmitočtu, pro vlny blízké meznímu kmitočtu R_k prudce narůstá. Kritický poloměr je závislý na konstrukci vlákna. Základní druhy paprsků při ohybu vlákna jsou zobrazeny na obrázku 42 níže.

Obrázek 42 Základní druhy paprsků při ohybu (18)



7.1 Návrh zkušebního zařízení

Mikroohyby optického vlákna se tvoří pomocí speciálně tvarovaných deformačních destiček. Jeho profil je navržen podle vlastností použitých optických vláken. Podle velikosti mikroohybů vzniká ve vláknech útlum, který zapříčiní změnu intenzity světelného výkonu, která se pak detekuje. Každé optické vlákno je opatřeno laserovým zdrojem a detektorem optického výkonu, který je tvořen fotodiodou. Oba členy jsou navázány na vlákno pomocí konektorů. Tato optická vlákna jsou umístěna mezi deformační destičky.

Vlákno je voleno vícevidové s co největší vlnovou délkou (citlivost) o délce 30 cm. U detektoru jsou kladeny nároky na citlivost, vlnovou délku stejnou jako zdroj světla, velikost dynamického rozsahu hodnot a dobu odezvy. U zdroje světla je kladen důraz na vlnovou délku jako detektor, stabilní vyzařovací výkon v závislosti na teplotním rozdílu, buzení elektrickým proudem a navázání optického výkonu do vlákna.

7.1.1 Výběr optického vlákna

Byly zvoleny 3 typy optických vláken s vlnovou délkou 850 nm, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Vlastnosti použitých optických vláken

Typ vlákna	Vnější průměr (mm)	Průměr jádra (mm)	Index lomu jádra (850 nm)	Index lomu pláště (850 nm)	Numerická apertura
POF	1	0,98	1,492	1,417	0,47
HCS	0,125	0,05	1,483	1,478	0,2
SiO ₂	0,23	0,2	1,457	1,407	0,37

7.1.2 Návrh deformačních destiček

Deformační destičky nejprve poslouží jako zkušební deformační trasa pro simulaci mikroohybů na přenosové cestě u jednotlivých druhů vybraných optických vláken. Podle výsledků statických charakteristik a chování vláken při deformaci bude vybrána nejvhodnější kombinace a použita pro další vývoj maticového snímače.

Kritická perioda mikroohybů Λ_c je vypočtena z následujícího vztahu:

$$\Lambda_c = \frac{\sqrt{2\pi a n_1}}{NA}$$

Kde

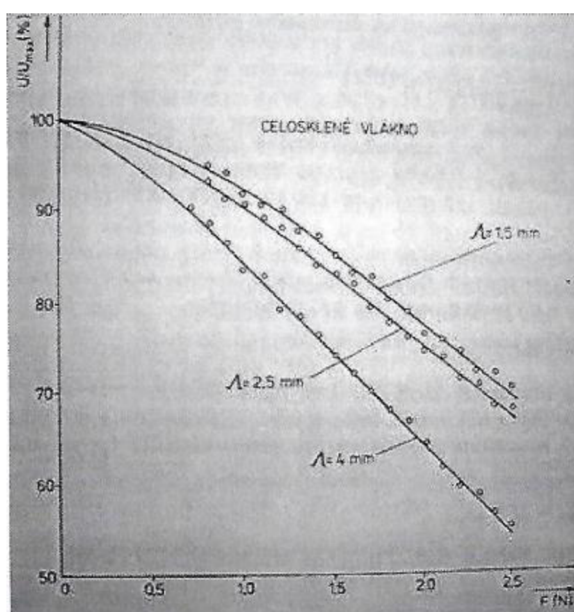
a poloměr jádra

n_1 index lomu jádra

NA numerická apertura

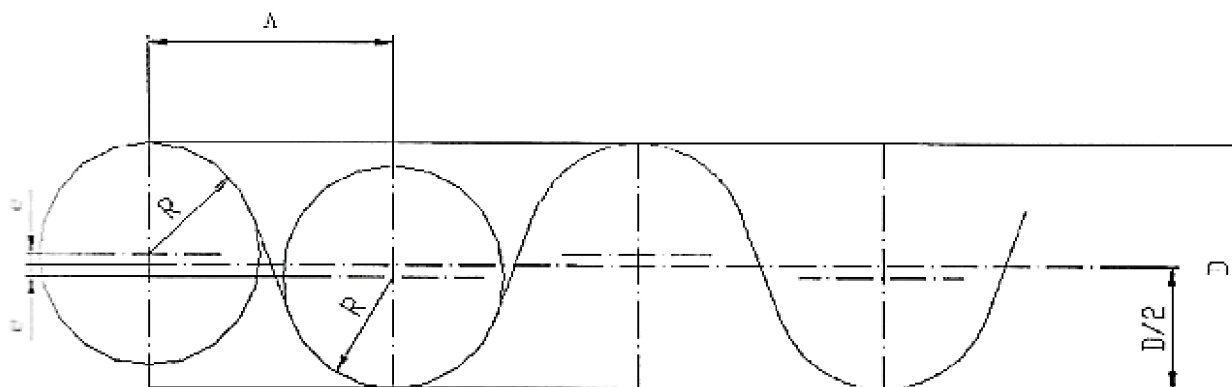
Perioda mikroohybů musí být větší, než vypočtená kritická perioda a musí být naddimenzována vzhledem k mechanickým vlastnostem zvoleného vlákna. Na následujícím obrázku je znázorněn vliv zvolené periody mikroohybů na citlivost na působící sílu a omezení dynamického rozsahu.

Obrázek 43 Vzorová závislost výstupního napětí pro různě zvolené Λ (18)



Další podmínkou je dodržení podmínky pro kritický poloměr křivosti R_k , podle kterého a výrobních možností je zvolen poloměr R , ze kterého je dopočten poloměr spodní R_s a horní R_h desky s ohledem na používaný prořez řezného drátu 0,3 mm. Amplituda D je volena podle kružnicové aproximace vyobrazené na obrázku níže jako polovina zvolené periody mikroohybů.

Obrázek 44 Kružnicová aproximace (18)



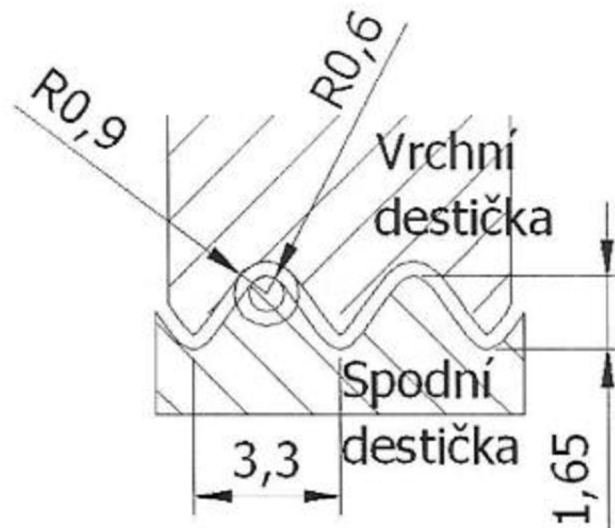
V následující tabulce 2 jsou uvedeny vypočtené a zvolené hodnoty pro jednotlivé typy vláken.

Tabulka 2 Vypočtené hodnoty pro jednotlivé typy vláken

Typ vlákn	Λ_c (mm)	Λ (mm)	D (mm)	R_k (mm)	R (mm)	R_s (mm)	R_h (mm)
POF	4,65	10	5	0,00835	2,25	2,1	2,4
HCS	2,6	3,3	1,65	0,00794	0,75	0,6	0,9
SiO ₂	2,41	2,6	1,3	0,248	0,55	0,4	0,7

Destičky jsou navrženy s dostatečnou rezervou a vůlí, aby nedošlo k poškození vlákna vlivem působící síly. Návrh počítá s výrobou na drátořezu, který má prořez 0,3 mm, díky čemuž jsou destičky synchronizovány a vyrobeny s dostatečnou vůlí. Na obrázku níže je znázorněn náčrt deformačních destiček pro vlákno HCS.

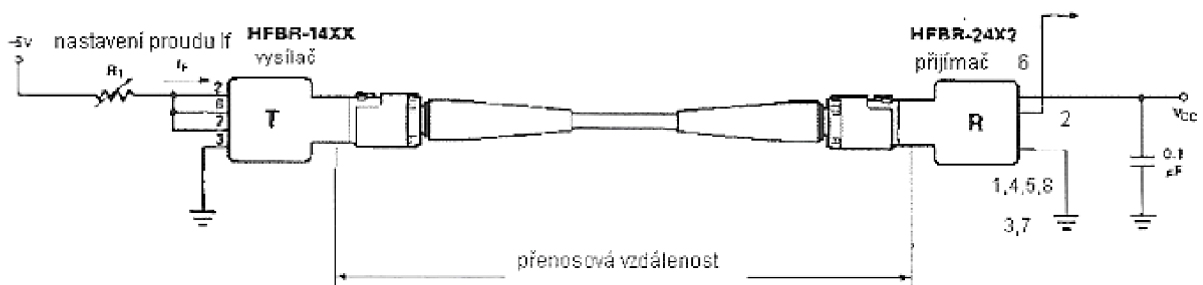
Obrázek 45 Rozměry deformačních destiček pro vlákno HCS (Autor práce)



7.1.3 Návrh optické a elektrické části

Pro měření byly zvoleny součásti firmy Agilent Technologies. Pro spojení vysílače a detektoru s optickým vláknem byly použity FC konektory. Vysílač byl použit typu HFBR 1412 a přijímač nese označení HFBR 2416. Přijímač má analogový výstup. Na následující obrázku 46 jsou vyobrazeny použité součástky a schéma zapojení.

Obrázek 46 Elektrické zapojení optických členů (Autor práce)



7.2 Měření statických charakteristik

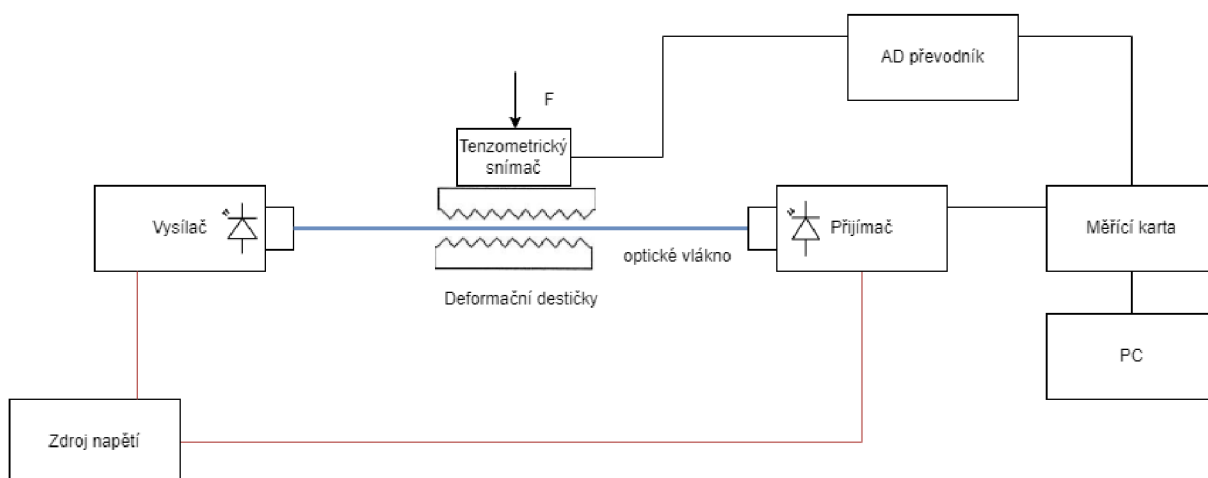
Pro měření statických charakteristik je použit mechanický přípravek, který je tvořen základní deskou, uchycením deformačních destiček, uchycením optického vysílače a přijímače a uchycením mikrometru. Důležité je zachování kolmosti a mechanického napnutí optického vlákna, což zajišťují pružiny a vodící tyče.

Pro sběr dat byla použita deska Arduino UNO, která byla připojena k PC a na její piny byl připojen převodník HX711 s tenzometrickým snímačem, který pracuje na principu popsaném v kapitole 5.2. Přes analogový pin A0 bylo měřeno výstupní napětí na přijímači. Pro sběr dat mohl být použit i digitální multimetr nebo jiná měřicí karta. Platforma Arduino byla zvolena na základě zkušeností autora a dostupnosti. Na obrázku 47 níže je zobrazeno schéma zapojení měřícího obvodu a na obrázku 48 je vyfoceno měřící pracoviště. Na obrázku 49 je detail deformace optického vlákna.

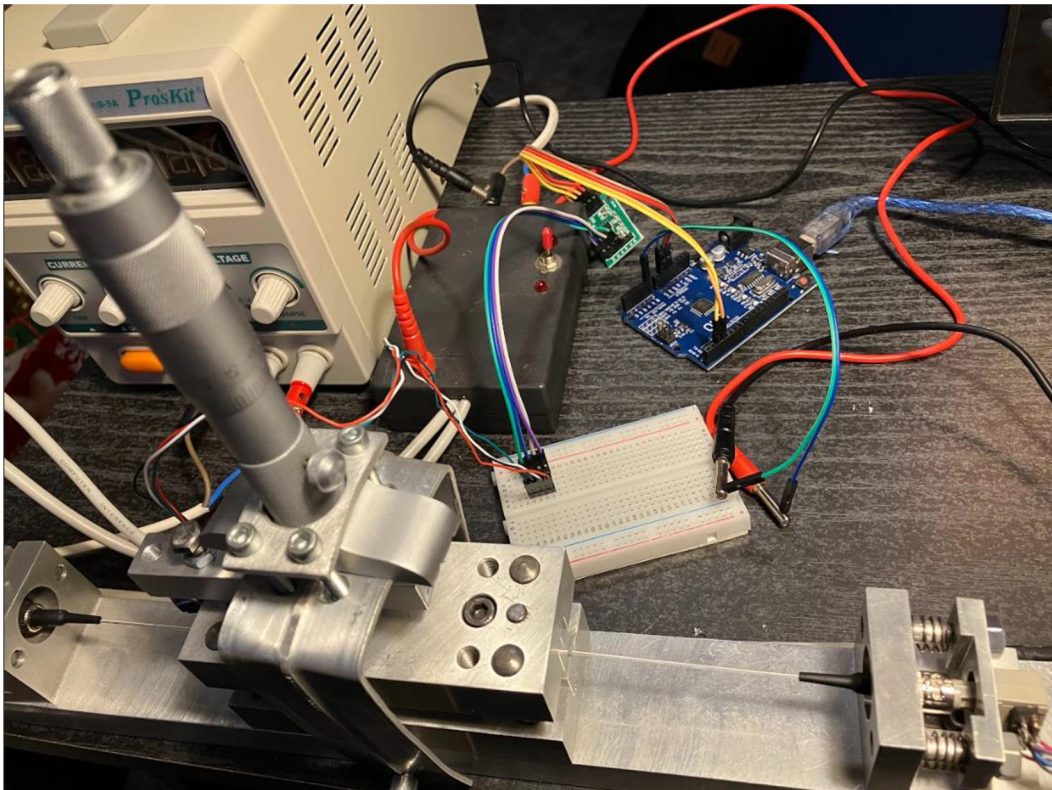
Použité přístroje:

- Zdroj Pro'sKit TE-5305
- Arduino UNO
- AD převodník HX711
- Tenzometrický snímač
- Mikrometrický hloubkoměr
- Kalibrační závaží

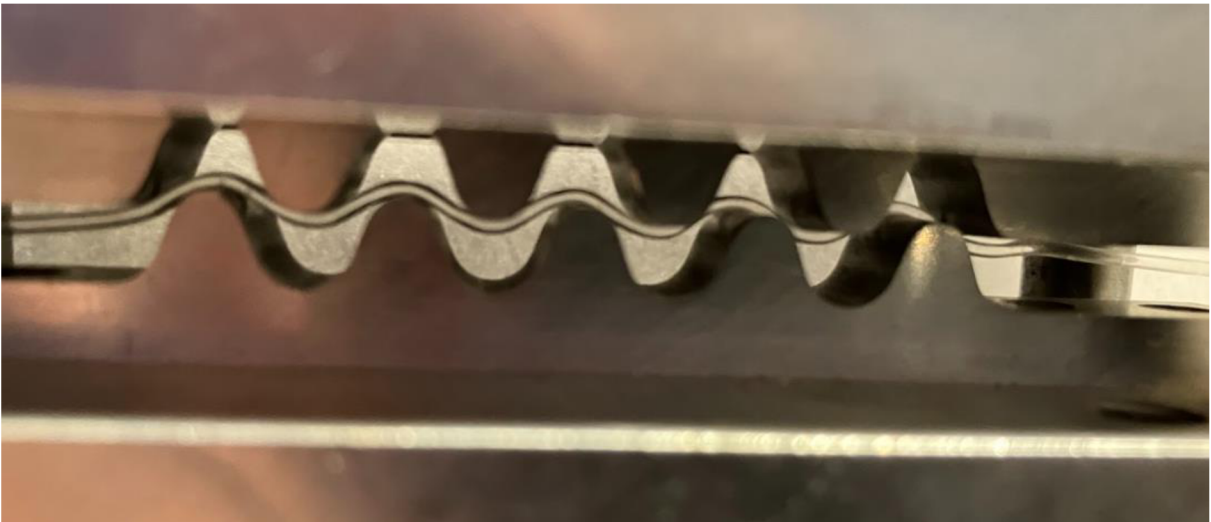
Obrázek 47 Schéma zapojení měřícího obvodu (Autor práce)



Obrázek 48 Měřicí pracoviště (Autor práce)



Obrázek 49 Detail deformace optického vlákna POF



7.2.1 Popis měření

Nejdříve byl pomocí kalibračního závaží zkalibrován tenzometrický snímač. Následně bylo nastaveno vstupní napětí 5 V pro vysílací a přijímací část. Byl nastaven předřadný odpor, který odpovídá budicímu proudu vysílací fotodiody 100 mA. Po sepnutí obvodu začala pracovat fotodioda vysíláním elektromagnetické vlny (světla) o vlnové délce 850 nm. Po průchodu optickým vláknem je přijímačem detekován zbylý světelný tok. Na deformační destičky působí

mikrometrický šroub na základě hodnot tenzometrického snímače nebo hodnoty posuvu mikrometrického šroubu. Podle dříve popsanych jevů dochází k útlumu světelného toku, který prochází k přijímači.

Při měření jsou uvažované nejistota typu A, která je rovna směrodatné odchylce aritmetického průměru jednotlivých skupin měření, a nejistota typu B, u které je předpokládána chyba měřicí karty a chyba mikrometrického šroubu.

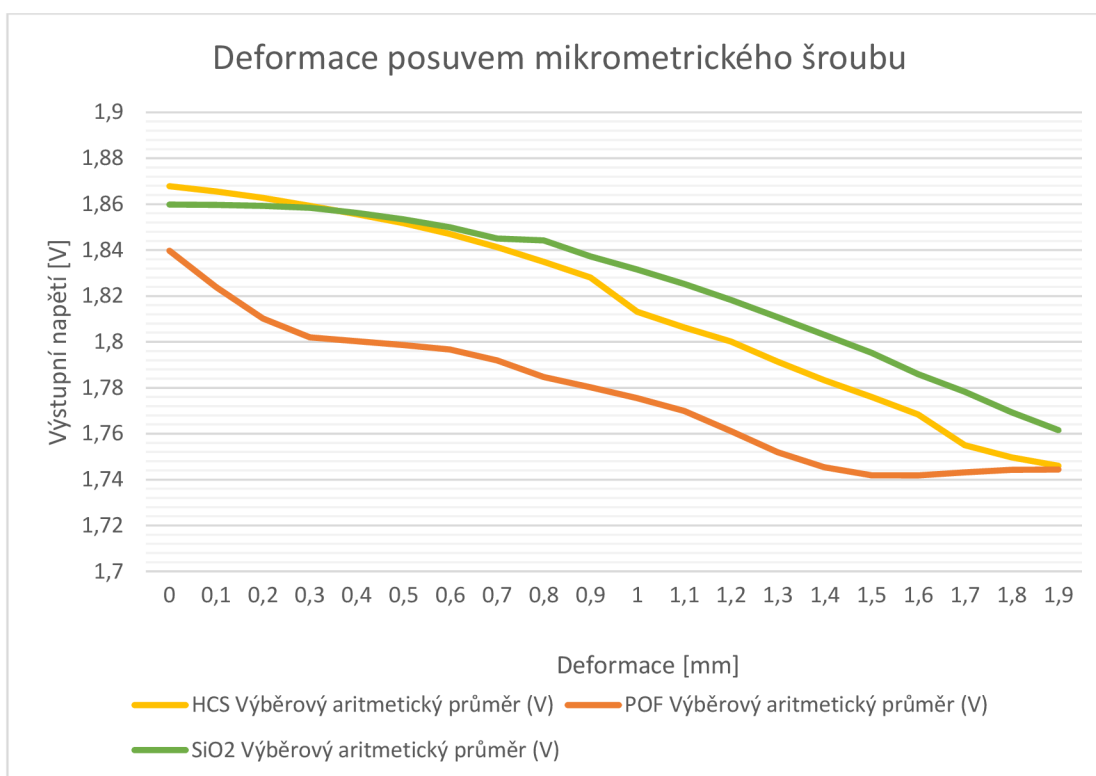
7.2.2 Zpracování naměřených hodnot

Byla naměřena data pro deformaci odpovídající posuvu mikrometrického šroubu a zatížení (viz první sloupec tabulek s výsledky měření). Ke každé deformaci proběhlo 10 měření, ze kterých byl spočítán výběrový aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka. Data jsou rozdělena do tabulek dle typu deformace, ve kterých jsou uvedeny výsledky pro všechny 3 typy použitých optických vláken.

Tabulka 3 Deformace podle posuvu mikrometrického šroubu

Typ vlákna	POF		HCS		SiO2	
deformace (mm)	Výběrový aritmetický průměr (V)	Výběrová směrodatná odchylka (V)	Výběrový aritmetický průměr (V)	Výběrová směrodatná odchylka (V)	Výběrový aritmetický průměr (V)	Výběrová směrodatná odchylka (V)
0	1,86845	0,03813263	1,86995	0,00031654	1,86035	0,00049551
0,1	1,83972	0,02317602	1,86783	0,00053941	1,85983	0,00042883
0,2	1,82391	0,01275834	1,86547	0,00045249	1,85974	0,00033525
0,3	1,81025	0,00632847	1,86273	0,00055511	1,85922	0,00033967
0,4	1,80203	0,00552784	1,85921	0,00064346	1,85847	0,00031216
0,5	1,80032	0,00523651	1,85562	0,00041084	1,85613	0,00024671
0,6	1,79858	0,00542321	1,85171	0,00032591	1,85342	0,00028473
0,7	1,79665	0,00472952	1,84702	0,00032509	1,84993	0,00030189
0,8	1,79187	0,00348796	1,84127	0,00029489	1,84503	0,00032415
0,9	1,78462	0,00297485	1,83492	0,00030467	1,84427	0,00051268
1	1,78022	0,00251486	1,82805	0,00028133	1,83721	0,00046785
1,1	1,77553	0,00249657	1,81314	0,00027457	1,83153	0,00048524
1,2	1,76985	0,00223174	1,80628	0,00028961	1,82523	0,00050129
1,3	1,76116	0,00224746	1,80021	0,00026882	1,81826	0,00051466
1,4	1,75195	0,00239842	1,79134	0,00027394	1,81069	0,00037668
1,5	1,74542	0,00243566	1,78326	0,00023501	1,80302	0,00062485
1,6	1,74194	0,00247249	1,77603	0,00025113	1,79523	0,00020953
1,7	1,74182	0,00251564	1,76834	0,00028475	1,78591	0,00031452
1,8	1,7432	0,00257832	1,75492	0,00023518	1,77829	0,00033514
1,9	1,74425	0,00239861	1,74967	0,00027136	1,7693	0,00035128
2	1,74437	0,00252419	1,74601	0,0002316	1,76154	0,00055968

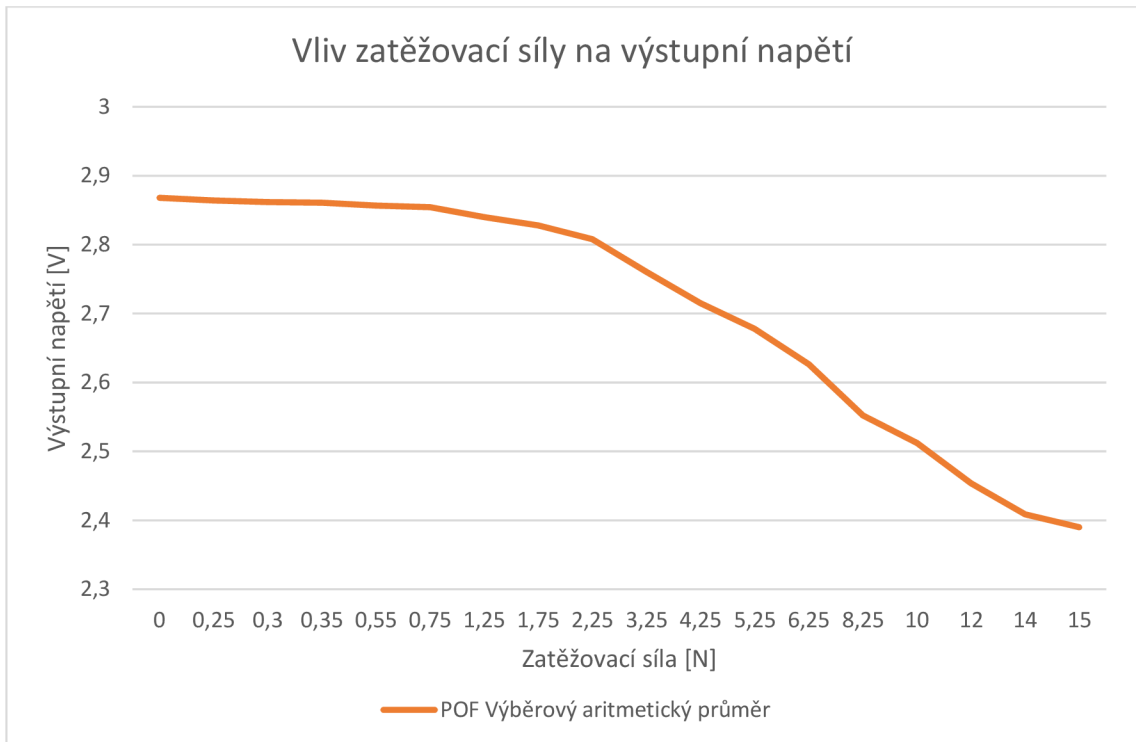
Obrázek 50 Graf závislosti výstupního napětí na deformaci [mm] (Autor práce)



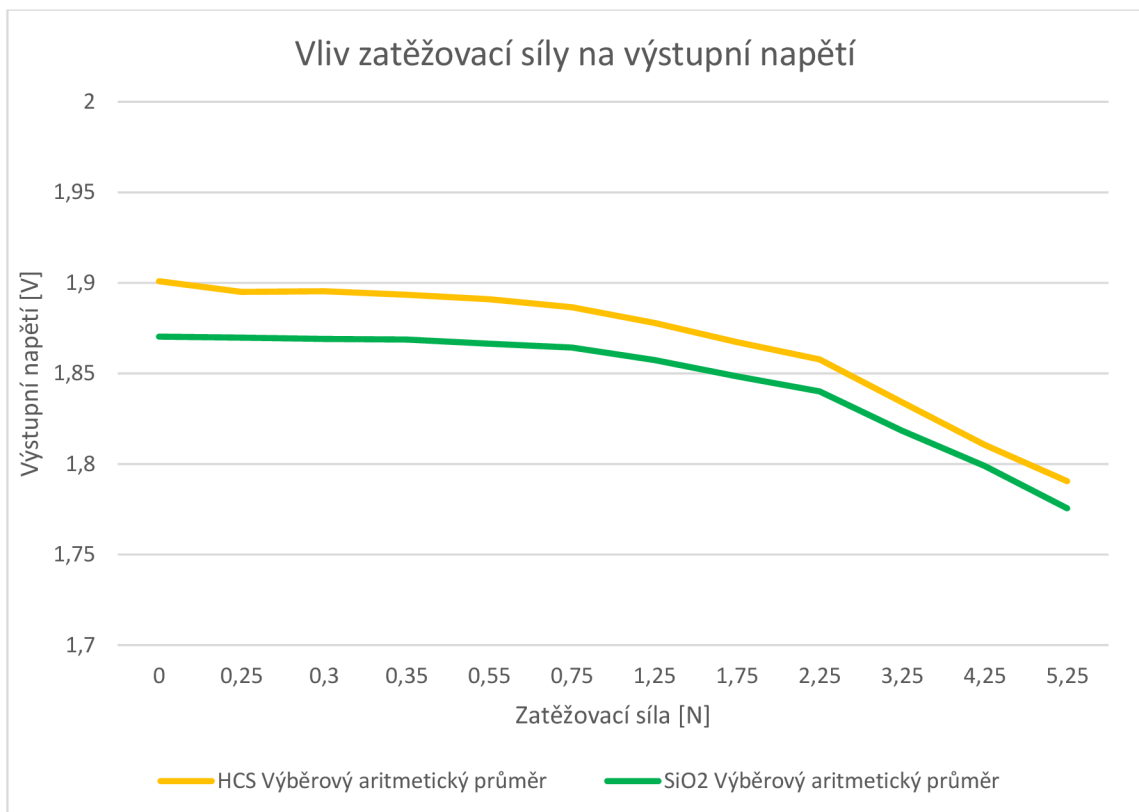
Tabulka 4 Deformace zatěžovací silou

Typ vlákna	POF		HCS		SiO2	
	Výběrový aritmetický průměr (V)	Výběrová směrodatná odchylka (V)	Výběrový aritmetický průměr (V)	Výběrová směrodatná odchylka (V)	Výběrový aritmetický průměr (V)	Výběrová směrodatná odchylka (V)
Síla (N)						
0	2,86791	0,01245749	1,90092	0,00142215	1,87032	0,0004951
0,25	2,86405	0,01065479	1,89496	0,00168857	1,86979	0,0005283
0,3	2,86158	0,01199263	1,89538	0,00152789	1,86914	0,0005352
0,35	2,86083	0,01206327	1,89351	0,00164365	1,86863	0,0006418
0,55	2,85674	0,01006887	1,89097	0,00139863	1,86645	0,0007123
0,75	2,85423	0,01069544	1,88653	0,00165433	1,86421	0,0007461
1,25	2,83981	0,01106484	1,87794	0,00171125	1,85742	0,0007473
1,75	2,82804	0,01207525	1,86732	0,00153264	1,84837	0,0007189
2,25	2,80815	0,01274354	1,85769	0,00189235	1,84009	0,0006375
3,25	2,76058	0,01278961	1,83415	0,00221651	1,81839	0,0010048
4,25	2,71511	0,01347533	1,81064	0,00237955	1,79886	0,0011735
5,25	2,67772	0,01325856	1,79048	0,00187352	1,77551	0,0014824
6,25	2,62647	0,01393034				
8,25	2,55198	0,01487995				
10	2,51203	0,01622148				
12	2,45374	0,01688141				
14	2,40851	0,01548632				
15	2,39003	0,01355021				

Obrázek 51 Graf závislosti výstupního napětí na zatěžovací síle [N] POF (Autor práce)



Obrázek 52 Graf závislosti výstupního napětí na zatěžovací síle [N] HCS a SiO2(Autor práce)



7.2.3 Zhodnocení výsledků měření.

V tabulkách 3 a 4 je uveden výběrový aritmetický průměr deseti provedených měření a výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru. Je počítáno s nejistotou typu A, která je v případě přímého měření rovna výběrové směrodatné odchylce aritmetického průměru jednotlivých skupin, a nejistotou typu B, která je dána chybou měřicí karty a chybou mikrometrického šroubu. Složkou této nejistoty by měla být i chyba vysílače a přijímače optického signálu, které však není možné jednoznačně určit.

Chyba mikrometrického šroubu je uvedena 0,01 mm a chyba analogového pinu měřicí karty Arduino UNO je 5/1024 V, což je rovno 4,88 mV. Nejistota typu B je určena z těchto chyb a vypočítána podle následujícího výpočtu.

$$u_{z1B} = \frac{\Delta Z_{1max}}{Z} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 5,77 \times 10^{-3} V$$

$$u_{z2B} = \frac{\Delta Z_{2max}}{Z} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 5,64 \times 10^{-4} V$$

$$u_{xB} = \sqrt{u_{z1B}^2 + u_{z2B}^2} = \sqrt{(5,77 \times 10^{-3})^2 + (5,64 \times 10^{-4})^2} = 5,80 \times 10^{-3} V$$

Kde

Z poměr mezní výchylky a směrodatné odchylky pro vybraný typ rozdělení

ΔZ_{1max} maximální chyba mikrometrického šroubu

ΔZ_{2max} maximální chyba měřicí karty

u_{z1B} chyba mikrometrického šroubu

u_{z2B} chyba měřicí karty

u_{xB} Výsledná nejistota typu B

Kombinovaná nejista u_x se určuje pro každou skupinu dat zvlášť a je dána vztahem:

$$u_x = \sqrt{u_{xA}^2 + u_{xB}^2}$$

Kde

u_x kombinovaná nejistota

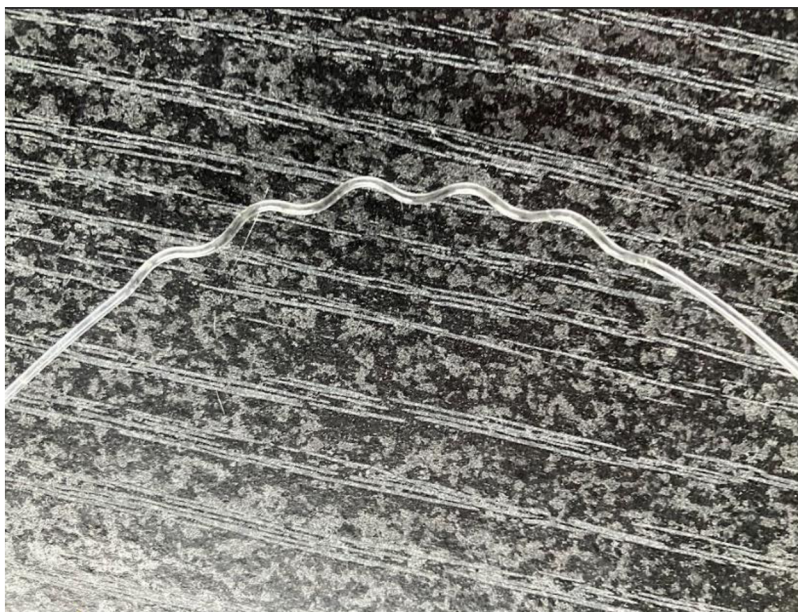
u_{xA} nejistota typu A = výběrová směrodatná odchylka a. průměru

u_{xB} Výsledná nejistota typu B

Větší směrodatná odchylka u POF vlákna při zatěžování posuvem mikrometrického šroubu je způsobena vznikem trvalé deformace při prvním měření po zatížení vlákna. U jiných typů vláken nevznikla trvalá deformace v takovém rozsahu. Z grafů na obrázcích xx a xx je patrné, že vlákna typu HCS a SiO₂ mají podobné průběhy a vlákno typu POF se liší jak tvarem, tak rozsahem napětí na výstupu.

U vlákna POF je výhodou zjištěný vyšší rozsah deformace, což je však vyváženo vznikající trvalou deformací, která vzniká po prvním zatížení a nižší citlivostí vlákna (obrázek 53). Z tohoto důvodu je určen tento typ vlákna pro použití ve snímači za méně vhodný, případně vhodný pro použití v míře do meze pružnosti, kdy jsou vlastnosti vlákna poměrně stálé.

Obrázek 53 Trvalá deformace POF vlákna (autor práce)



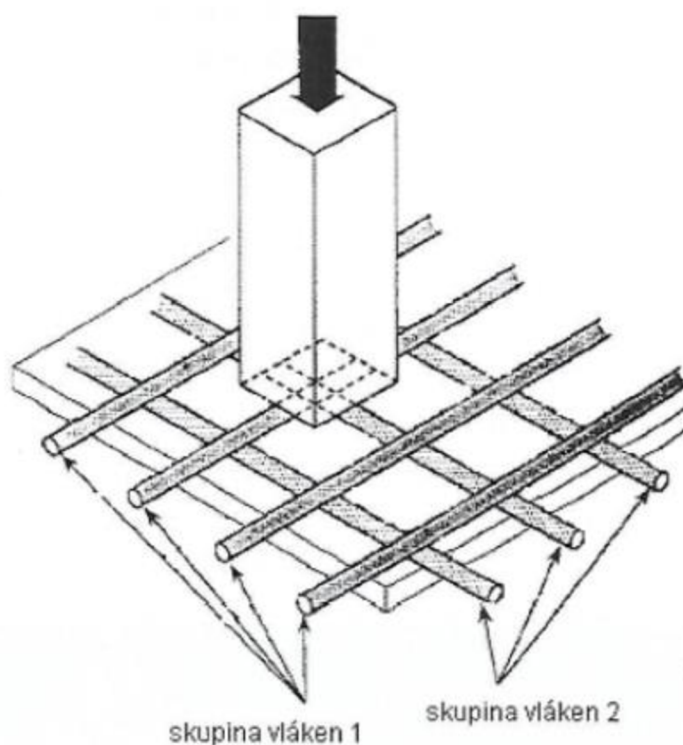
Vlákno HCS má stálejší zatěžovací charakteristiky i při opakování měření. Oba druhy měření se vzájemně přibližují výslednými hodnotami. Oproti POF je u tohoto vlákna nižší rozsah deformace a vyšší citlivost na ohyby.

Vlákno SiO₂ má nejvyšší citlivost a jeho nevýhodami je nižší deformační rozsah a menší mechanická odolnost podobně jako u HCS.

8 Maticový plošný snímač

Maticový plošný taktilní snímač, jehož nákras je zobrazen na obrázku xx je založen na principu mikroohybu optických vláken, který byl popsán v předešlých kapitolách s tím, že je použito větší množství optických vláken a párů vysílačů a přijímačů optického signálu. Optická vlákna jsou u tohoto typu snímače uspořádána do matice a na základě informací o deformaci v konkrétních vláknech jsou určeny informace o dotyku. Při působení síly je deformována celá síť, čímž je ovlivňován světelný tok v optických vláknech. Největší útlum je v místě působení deformačního tělíska a s narůstající vzdáleností od místa působení klesá, díky čemuž je možné poměrně přesně určit místo a velikost deformace. Konstrukce maticového plošného snímače je na obrázku 54. (22)

Obrázek 54 Konstrukce maticového plošného snímače (18)



Návrh vychází z poznatků z kapitoly 7, kde se osvědčila vlákna HCS a SiO₂. U maticového taktilního snímače je nutné pro každou řadu použít samostatný pár vysílače a přijímače. Zapojení optické a elektrické části je obdobné jako u měřícího přípravku. Dalšími prvky, kterými se maticový snímač liší jsou deformační tělísko, způsob propletení vláken a materiál dosedací plochy snímače.

Základem snímače je optická trasa (vysílač, optické vlákno, snímač), jejichž výběr proběhl v předchozí kapitole. Jedná se o vysílač HFBR 1412 a přijímač HFBR 2416 viz obrázek 55. Zapojení optoelektrické části je stejné jako v případě měření v kapitole 7, pouze se zvyšuje počet použitých prvků. Z výsledků předchozího měření nejlépe vyšlo vlákno z materiálu SiO₂, které disponovalo větší citlivostí, která je klíčovou vlastností taktilního snímače.

Obrázek 55 Vysílač a přijímač optického signálu (autor práce)



Metody propletení optických vláken mají jiné vlastnosti. Při křížovém propletení optických vláken je dosaženo vyšší tuhosti snímače, která je vyvážena tím, že se různé části snímače nechovají stejně. To je způsobeno tím, že křížovým propletením vlákno je v jednom místě křížení (uzlu) nad vláknem kolmým a v dalším uzlu je provlečeno pod kolmým vláknem. Tyto uzly se nazývají vrcholy a díry. V případě deformace v uzlu, který je dírou, dochází k dříve popisovanému mikroohybu a útlumu světelného signálu. Pokud je deformace ve vrcholovém uzlu, tak dochází k narovnávání vlákna a útlum se naopak snižuje do doby, než dojde k deformaci na opačnou stranu. Další možností je pokládání vláken na sebe, kdy se snadněji identifikuje výsledný dotyk, ale tato konstrukce nedosahuje takové stálosti snímače, proto je vhodnější křížové propletení.

Dosedací materiál, do kterého se budou vlákna deformovat, se musí volit s ohledem na to, že použití nevhodného materiálu může ovlivnit chování snímače a měřené vlastnosti. V případě příliš tvrdého materiálu je riziko poškození snímače při překročení maximální zatěžovací síly. Pokud by byl zvolený materiál příliš měkký, byl by snímač méně citlivý. Jako vhodný materiál se jeví měkká pryž (guma).

9 Závěr

Tématem této diplomové práce jsou taktilní optovláknové snímače na základě mikroohybu. V úvodních kapitolách proběhlo seznámení s problematikou taktilních snímačů. Byly uvedeny oblasti robotiky, ve kterých mají taktilní snímače využití a seznámení s typy taktilních snímačů, které se používají v automatizaci a robotice pro uvedení optovláknových snímačů do kontextu. V následující kapitole byly uvedeny teoretické poznatky z oblasti těchto snímačů, byl vysvětlen jejich princip, rozdělení, vlastnosti a použití.

Další kapitola se věnuje návrhu přípravku pro měření mikroohybových optovláknových snímačů, kde je vysvětlen princip měření, požadované vlastnosti přípravku a výběr potřebných komponent, kterými jsou vysílač optického signálu, snímač optického signálu a optické vlákno. Kapitola 7 je věnována měření na přípravku, kdy byl přípravek zatěžován dvěma způsoby. Jedním způsobem je zatěžování na základě posuvu mikrometrického šroubu a druhým je zatěžování na základě působení síly, která je snímána tenzometrickým snímačem. Tímto měřením byly zjišťovány statické charakteristiky jednotlivých optických vláken závislé na zatěžovací síle nebo deformaci.

Výsledkem měření bylo porovnání třech materiálů optických vláken (POF, HCS, SiO₂), kde vlákno POF mělo velký rozsah deformace a výstupního signálu, ale při opakování měření bylo degradováno kvůli trvalým deformacím, které zvyšovaly útlum optického signálu. Vlákná HCS a SiO₂ se ukázala jako vhodná pro použití v taktilních senzorech, z nichž větší citlivosti dosahovalo vlákno z materiálu SiO₂. Na základě výsledků měření byly v kapitole 8 navrženy komponenty pro sestavení taktilního maticového snímače na základě mikroohybu optických vláken a provedena úvaha nad několika možnostmi konstrukce takového snímače.

10 Seznam použité literatury

- 1) BENEŠ, P. Automatizace a automatizační technika. Brno: Computer press, 2012.
- 2) VOLF, J. Taktilní senzory [přednáška] Česká zemědělská univerzita v Praze, 29.10.2020
- 3) Costanzo, M.; De Maria, G.; Natale, C.; Pirozzi, S. Design and Calibration of a Force/Tactile Sensor for Dexterous Manipulation. Sensors 2019, 19, 966. (online) (cit. 14.9.2022) Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s19040966>
- 4) Shimonomura, K. Tactile Image Sensors Employing Camera: A Review. Sensors 2019 (online) (cit. 17.9.2022) Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s19183933>
- 5) Ravinder S. Dahiya, Maurizio Valle, Robotic Tactile Sensing, Springer Dordrecht 2012 ISBN: 978-94-007-0579-1
- 6) Maruo Mereu, With Akara robots, hospitals get disinfected faster, Innovation Origins 2023 (online) (cit 7.2.2023) Dostupné z <https://innovationorigins.com/en/with-akara-robots-hospitals-get-disinfected-faster/>
- 7) Martin Placek, Industrial robots worldwide – statistics & facts, Statista (online) (cit 17.2.2023) Dostupné z <https://www.statista.com/topics/1476/industrial-robots/#topicOverview>
- 8) WOLF, Andreas, Ralf STEINMANN a Henrik SCHUNK. Grippers in motion: the fascination of automated handling tasks. Berlin: Springer, 2005, 248 p. ISBN 3540256571.
- 9) JOCKUSH, J. – WALTER, J. – RITTER, H.: Tactile Sensor System for a Three – Fingered Robot manipulator. Department of Computer Science. University of Bielefeld, 1997
- 10) VTS Zlín, Základní rovnice, VTS Zlín 2006 (online) (cit. 15.1.2023) Dostupné z <https://vtsz.cz/image4a07.pdf?i=157313.pdf&fn=>
- 11) G.Murali Krishna,K. Rajanna.: Tactile Sensor Based on Piezoelectric Rezonance, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 2002

- 12) Volf J., Taktilní senzory pro automatizaci, Automa, Praha 2008
- 13) KUKA Robotics, KR Quantec PA, Kuka Robotics (online) (cit. 17.9.2022) Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/pr%C5%AFmyslov%C3%A9-roboty/kr-quantec-pa>
- 14) Ferier. Svařovací roboty, Ferier (online) (cit. 17.9.2022) Dostupné z: <https://www.ferier.cz/svarovaci-roboty-cloos/system-robotizace-mechanika/>
- 15) Carrisa Wong, Robotic hand can crush beer cans and hold eggs without breaking them, New Scientist 2021 (online) (cit. 17.9.2022) Dostupné z: <https://www.newscientist.com/article/2301641-robotic-hand-can-crush-beer-cans-and-hold-eggs-without-breaking-them/>
- 16) Toolkit tech, Onrobot RG6 Adaptive gripper, Toolkit tech (online) (cit. 18.9.2022) Dostupné z: <https://toolkittech.com/shop/onrobot-adaptive-grippers/>
- 17) Utilcell, Úvod do tenzometrů, Utilcell (online) (cit. 7.11.2022) Dostupné z: <http://blog.tenzometry.cz/p/tenzometry.html>
- 18) Petrik, J. Turan a S.: Optické vláknové senzory. ALFA, Bratislava 1991
- 19) Militky J., Křemenáková D. Šašková J., Optical Attenuation of Linear Composites Containing SEPOF, Research gate 2018 (online) (cit. 20.11.2022) Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Typical-structure-of-optical-fiber_fig1_329895661
- 20) Peterka J., Optické kabely, Computerworld 1992 (online) (cit. 24.11.2022) Dostupné z: <https://www.eaarchiv.cz/a92/a208c110.php3>
- 21) Angelina123, Decoding the Wavelength in Fiber Optics, Fomns.com 2016 (online)(cit. 4.12.2022) Dostupné z: <https://www.fomns.com/optical-communication/angelina123/decoding-the-wavelength-in-fiber-optics/>
- 22) Jenstorm, D.T., Chin-Lin Chen, A Fiber Optic Microbend Tactile Sensor Array, Sensor and Actuators, 1989

11 Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1 Dezinfekční robot (6)	4
Obrázek 2 Počet celosvětových instalací industriálních robotů v průběhu let (7).....	5
Obrázek 3 Typy kinematiky průmyslových robotů (8)	6
Obrázek 4 Kuka KR Quantec PA (13)	7
Obrázek 5 Parametry robotu Kuka KR Quantec PA (13)	7
Obrázek 6 Druhy úchopných hlavíc (8)	8
Obrázek 7 Robot se svařovacím efektoem (14).....	9
Obrázek 8 Robotická ruka s taktilními senzory (15).....	10
Obrázek 9 Manipulační efektor (16)	11
Obrázek 10 Taktilní snímač s elastomery PMT 1.3 (2)	13
Obrázek 11 Konstrukce Taktilního snímače s plošným elastomerem (2)	13
Obrázek 12 Závislost $R = f(F)$ pro PMT 1.3 (2)	14
Obrázek 13 Plantograf V05 (2)	14
Obrázek 14 Řez FSR senzorem (2).....	15
Obrázek 15 Závislost $R = f(F)$ pro FSR senzor (2)	15
Obrázek 16 Princip senzoru s odporovou vrstvou (9)	16
Obrázek 17 Robotický prst se senzory s odporovou vrstvou (9).....	16
Obrázek 18 Maticový taktilní snímač (2).....	17
Obrázek 19 Tenzometrický taktilní senzor se dvěma otvory (17).....	19
Obrázek 20 Tenzometrické taktilní senzory (Autor práce)	19
Obrázek 21 Senzor konstrukce DOTS (2).....	20
Obrázek 22 Konstrukce válcového kapacitního senzoru (2)	21
Obrázek 23 Piezoelement (2)	22
Obrázek 24 Závislost napětí a frekvence na zatěžovací síle piezoelektrického senzoru (2)	23
Obrázek 25 Konstrukce piezoelektrického senzoru s tenkým polymerem (2).....	24
Obrázek 26 Magnetostrikční taktilní senzor (2)	25
Obrázek 27 Magnetoanizotropní taktilní senzor (2)	25
Obrázek 28 Vláknový vlnovod (18).....	26
Obrázek 29 Struktura optického vlákna (19).....	28
Obrázek 30 Trajektorie paprsků různých druhů vláken (20).....	29
Obrázek 31 Ztráty vzniklé v konektorech (18)	30
Obrázek 32 Používané typy konektorů optických kabelů (18)	30
Obrázek 33 Přehled vlnových délek (21).....	31
Obrázek 34 Transformace fyzikálních veličin v OVS (18)	33
Obrázek 35 Rozdělení senzorů (18).....	34
Obrázek 36 Senzor s pružným členem a reflexní vrstvou (2)	36
Obrázek 37 Mikroohybový snímač (2)	37
Obrázek 38 Senzor se vzájemnou vazbou světlovodů (2)	37
Obrázek 39 Senzor se změnou vzájemné vazby (2)	38
Obrázek 40 Vznik evalescentní vlny (18).....	40
Obrázek 41 Rozvržení amplitudy pole při totálním odrazu (18)	41

Obrázek 42 Základní druhy paprsků při ohybu (18)	42
Obrázek 43 Vzorová závislost výstupního napětí pro různě zvolené Λ (18)	44
Obrázek 44 Kružnicová aproximace (18).....	45
Obrázek 45 Rozměry deformačních destiček pro vlákno HCS (Autor práce).....	46
Obrázek 46 Elektrické zapojení optických členů (Autor práce).....	46
Obrázek 47 Schéma zapojení měřicího obvodu (Autor práce)	47
Obrázek 48 Měřicí pracoviště (Autor práce)	48
Obrázek 49 Detail deformace optického vlákna POF.....	48
Obrázek 50 Graf závislosti výstupního napětí na deformaci [mm] (Autor práce)	50
Obrázek 51 Graf závislosti výstupního napětí na zatěžovací síle [N] POF (Autor práce)	51
Obrázek 52 Graf závislosti výstupního napětí na zatěžovací síle [N] HCS a SiO ₂ (Autor práce)	51
Obrázek 53 Trvalá deformace POF vlákna (autor práce)	53
Obrázek 54 Konstrukce maticového plošného snímače (18)	55
Obrázek 55 Vysílač a přijímač optického signálu (autor práce)	56

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti použitých optických vláken.....	43
Tabulka 2 Vypočtené hodnoty pro jednotlivé typy vláken	45
Tabulka 3 Deformace podle posuvu mikrometrického šroubu.....	49
Tabulka 4 Deformace zatěžovací silou	50