



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## NÁVRH OPTOVLÁKNOVÉHO TEPELNÉHO SENZORU PRO DETEKCE NARUŠENÍ OBRANNÉHO PERIMETRU

DESIGN OF OPTICAL FIBER TEMPERATURE SENSOR FOR DETECTION OF DEFENSE PERIMETER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Zámečník

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Ondřej Zámečník

**ID:** 186463

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh optovláknového tepelného senzoru pro detekce narušení obranného perimetru

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Cílem práce je navrhnout a realizovat vláknový tepelný senzor, který na základě změny polarizace světla detekuje i velmi malé změny teploty.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Filka, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

[2] Kyselák, M., Dvořák, F., Maschke, J., Vlček, Č. Sensitivity and dynamic phase response to thermal radiation of a polarization-maintaining fiber. Optica Applicata, 2018, vol. vol. 48, no. 2, p. 249-261. ISSN 0078-5466.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

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

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření teploty prostředí pomocí jednovláknového optického vlákna, použitého jako senzor teploty. Práce popisuje základní poznatky o polarizovaném světle, jeho šíření v optickém vlákne a popisuje speciální vlákna, která zachovávají polarizaci. Dále se zabývá zobrazením polarizačních stavů na Poincarého kouli a využití Stokesových a Jonesových vektorů. V praktické části se měří několik vybraných metod přívodu optického signálu na teplotní senzor. Následně se z naměřených výsledků zhodnotí vhodnost daných metod a průběhy se porovnají se záznamy naměřenými z reálných tras. Cílem práce je tak výběr vhodného připojení teplotního senzoru na dlouhou trasu optického vlákna a ověření jeho funkčnosti.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizace, Poincarého koule, Stokesovy vektory, dvojlom, optické vlákno, senzor teploty

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with the issue of measuring the ambient temperature using a single-mode optical fiber used as a temperature sensor. The thesis describes the basic knowledge about polarized light, its propagation in optical fiber and describes special fibers that preserve polarization. It also deals with the representation of polarization states on a Poincaré sphere and the use of Stokes and Jones vectors. In the practical part, several selected methods of optical signal supply to the temperature sensor are measured. Subsequently, the suitability of the given methods is evaluated from the measured results and the courses are compared with the records measured from real routes. This thesis aims to select a suitable connection of a temperature sensor for a long route of optical fiber and verify its functionality.

## KEYWORDS

Polarization, Poincaré sphere, Stokes vectors, birefringence, optical fiber, temperature sensor

ZÁMEČNÍK, Ondřej. *Návrh vláknového tepelného senzoru pro detekce narušení obranného perimetru*. Brno, 2020, 57 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh vláknového tepelného senzoru pro detekce narušení obranného perimetru“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval konzultantovi diplomové práce docentovi Martinovi Kyselákovi za odborné vedení, konzultace, trpělivou a vřelou výpomoc a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Purkynova 118, CZ-61200 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

Úvod	12
<b>1 Světlo a jeho vlastnosti</b>	<b>13</b>
1.1 Metody polarizace	13
1.1.1 Polarizace odrazem - Brewsterův úhel	14
1.1.2 Polarizace lomem	14
1.1.3 Polarizace dvojlomem	15
1.1.4 Polarizace průchodem – Malusův zákon	15
1.2 Polarizační elipsa	16
1.3 Degenerované stavy polarizace	17
1.3.1 Lineární polarizace	18
1.3.2 Kruhová polarizace	19
1.4 Jonesovy a Stokesovy vektory	19
1.5 Stupeň polarizace - DOP	21
1.6 Poincarého koule	21
<b>2 Optická vlákna</b>	<b>23</b>
2.1 Vícevidová vlákna	23
2.2 Jednovidová vlákna	23
2.3 Vlákna zachovávající polarizaci	24
2.3.1 Vlákna PM se stresovými prvky	24
2.3.2 Vlákna PM s eliptickou strukturou	25
2.4 Polarizační přeslechy v PM vláknech	25
2.5 Sensorická vlákna	26
<b>3 Návrh měření</b>	<b>27</b>
3.1 Zdroj světla	28
3.2 Lineární polarizátor	29
3.3 Vlákna a spoje	29
3.4 Optovláknový senzor	30
3.5 Dělič výkonu zachovávající polarizaci	30
3.6 Polarimetr	31
3.7 Fotodioda	31
3.8 Měřič výkonu laseru	32
3.9 Řídící software	33

<b>4 Realizace měření</b>	<b>35</b>
4.1 Měření přímé trasy . . . . .	35
4.1.1 Popis měření přímé trasy . . . . .	36
4.1.2 Výsledky měření přímé trasy . . . . .	36
4.2 Měření s lineárním depolarizátorem . . . . .	40
4.2.1 Popis měření s optickým depolarizátorem . . . . .	41
4.2.2 Výsledky měření s optickým depolarizátorem . . . . .	42
4.3 Měření s kruhovým polarizátorem . . . . .	44
4.3.1 Popis měření s kruhovým polarizátorem . . . . .	44
4.3.2 Výsledky měření s kruhovým polarizátorem . . . . .	45
4.4 Zhodnocení vhodné přívodní trasy . . . . .	47
<b>5 Průzkum výsledků z reálných tras</b>	<b>49</b>
5.1 Zhodnocení výsledků měřených úseků . . . . .	49
5.2 Porovnání výsledků laboratorních měření s reálnou trasou . . . . .	52
5.3 Možnosti aplikace vlákna . . . . .	52
<b>6 Závěr</b>	<b>54</b>
<b>Literatura</b>	<b>55</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>57</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření elektromagnetické vlny . . . . .	13
1.2	Světlo nepolarizované a polarizované . . . . .	14
1.3	Polarizační elipsa . . . . .	17
1.4	Degenerované stavy polarizace . . . . .	18
1.5	Jonesovy a Stokesovy vektory pro určité polarizační stavy . . . . .	20
1.6	Stavy DPS na Poincarého kouli . . . . .	22
2.1	a) Motýlek b) PANDA . . . . .	24
2.2	a) Vlákno s eliptickým jádrem b) Vlákno s eliptickým opláštěním . . . . .	25
3.1	Schéma zapojení pracoviště . . . . .	27
3.2	Laserová dioda LPS-1550-FC . . . . .	28
3.3	Teplotní regulátor CLD1010LP . . . . .	28
3.4	In-line vláknový polarizátor ILP1550PM-FC . . . . .	29
3.5	Usazení vláknového senzoru . . . . .	30
3.6	Dělič výkonu PMC1550-90B-FC . . . . .	30
3.7	Polarimetr PAX5710VIS-T-TXP . . . . .	31
3.8	Fotodioda FGA015 . . . . .	32
3.9	Měřič výkonu laseru Ophir 7Z01560 Vega . . . . .	33
3.10	Uživatelské prostředí ovládacího softwaru polarimetru [16] . . . . .	34
4.1	Zapojení zkušebního měření tras . . . . .	36
4.2	Průběh výkonu na přímé trase 1 km 2 hod . . . . .	37
4.3	Průběh výkonu na přímé trase 10 km 2 hod . . . . .	37
4.4	Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 1 km 2 hod . . . . .	38
4.5	Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 10 km 2 hod . . . . .	38
4.6	Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 1 km 24 hod . . . . .	39
4.7	Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 40 km 24 hod . . . . .	39
4.8	Průběh stokesových vektorů na přímé trase 10 km 18 hod . . . . .	40
4.9	Průběh stupně polarizace na přímé trase 10 km 18 hod . . . . .	40
4.10	Průběh stupně polarizace na přímé trase 40 km 24 hod . . . . .	41
4.11	Schéma zapojení měření s depolarizátorem . . . . .	41
4.12	Průběh výkonu na trase 40 km s depolarizátorem 24 hod . . . . .	42
4.13	Průběh stokesových vektorů na trase 40 km s depolarizátorem 24 hod . . . . .	43
4.14	Průběh stupně polarizace na trase 40 km s depolarizátorem 24 hod . . . . .	43
4.15	Schéma zapojení měření s kruhovým polarizátorem . . . . .	44
4.16	Průběh Stokesových vektorů na trase 1 km s kruhovým polarizátorem 24 hod . . . . .	45
4.17	Průběh stupně polarizace na trase 1 km s kruhovým polarizátorem 24 hod . . . . .	46

4.18	Průběh výkonu na trase 1 km s kruhovým polarizátorem 24 hod . . .	46
4.19	Porovnání typů depolarizátoru LCP a Quartz-Wedge [18] . . . . .	48
5.1	Průběh stokesových vektorů na trase Botanická - Lipová . . . . .	49
5.2	Průběh DOP na trase Botanická - Lipová . . . . .	50
5.3	Průběh celkového výkonu na trase Botanická - Lipová . . . . .	50
5.4	Průběh vektorů na trase závěsného optického kabelu . . . . .	51
5.5	Průběh srážek dne 28. 2. 2020 [19] . . . . .	52
5.6	Průběh průměrné rychlosti větru a nárazů větru dne 28. 2. 2020 [20] .	53

# ÚVOD

Optická vlákna jsou od jejich počátků primárně využívána v telekomunikačních technologiích pro přenos dat pomocí nepolarizovaného světla. V dnešní době však vývoj vláken značně pokročil a tak se využívá i vláken zachovávajících polarizaci. Vlastnosti a parametry takového vlákna se tak mohou využít pro měřicí účely. Jejich využití se tak rozšiřuje o senzor teploty či tlaku, kterého se v této práci využívá.

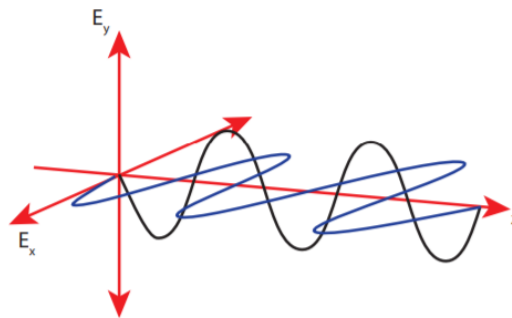
Diplomová práce se zabývá problematikou měření teploty pomocí jednovidového senzorického vlákna. K měření teploty se využívá speciálního vlákna zachovávající polarizaci. Jelikož toto vlákno není kruhově symetrické, respektive využívá se stressových prvků vložených do tohoto vlákna, dochází v jeho jádře k dvojlomu. Pomocí tohoto dvojlomu je pak možné sledovat vzájemný posun dvou rovin. Dokážeme dále vyjádřit stokesovy vektory, popsané v teoretické části této práce. Na základě těchto aspektů jsme schopni měřit chování teploty okolí senzorického vlákna.

Cílem této práce je navrhnout měřicí pracoviště pro měření teplot na velké vzdálenosti, bez zavedení elektrického proudu do kontrolované oblasti. Z toho důvodu se využívá optického vláknového senzoru, ve kterém se šíří pouze optický signál, nikoliv elektrický. Tento signál bude do vlákna přiveden přes dlouhé jednovidové vlákno, řádově až několik desítek kilometrů. V rámci diplomové práce bude vypracován vhodný návrh zapojení s určením pracovních součástí, ověření několika metod připojení optického vlákna na přívodní trasu a porovnání laboratorních výsledků s výsledky naměřenými na reálných trasách.

# 1 SVĚTLO A JEHO VLASTNOSTI

Pojem dualita částice a vlnění nás vztahuje ke skutečnosti, že se dá světlo popsat nejen jako vlna, ale i jako částice. Toho se využívá především v krátkovlnných oblastech, tedy při vysokých energiích fotonů. Z hlediska komunikačních technologií a optického přenosu signálu se o světle pojednává jako o elektromagnetickém vlnění, které je viditelné lidskému oku a nachází se v oblasti o délkách 380 - 750 nm, což odpovídá frekvenčnímu rozsahu 790 - 400 THz.

Toto elektromagnetické vlnění se skládá ze dvou složek. Ze složky elektrické a složky magnetické. Jednotlivé složky jsou reprezentovány vektorem elektrického pole  $\vec{E}$  a vektorem magnetické indukce  $\vec{B}$ , které jsou navzájem kolmé, přičemž jsou kolmé i ke směru šíření (tzv. Poyntingův vektor). Takovou vlnu nazýváme vlnou příčnou neboli transverzální [1], [2].

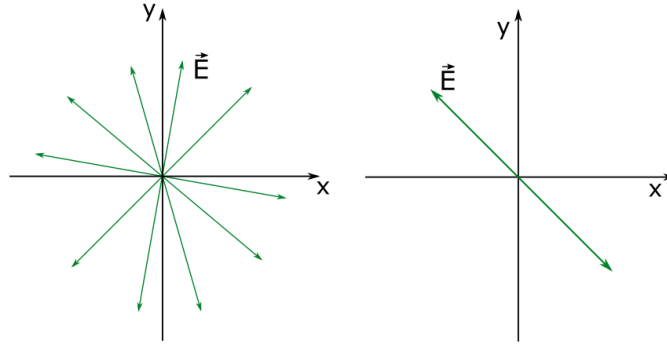


Obr. 1.1: Šíření elektromagnetické vlny

## 1.1 Metody polarizace

Vektor intenzity elektrického pole se vždy nachází v rovině kolmé k šíření paprsku světla a v případě přirozeného světla je směr tohoto vektoru v rovině náhodný. V takovém případě jej označujeme jako světlo nepolarizované.

Nepolarizované světlo jsme však schopni změnit na světlo polarizované, a to ovlivněním elektrické intenzity, respektive jejím omezením na stálou velikost i směr. Toho můžeme docílit několika způsoby. Příkladem může být polarizace reflexí, polarizace refrakcí, nebo polarizace průchodem polarizačními filtry, či anizotropními krystaly. Určité typy používaných metod polarizace jsou uvedeny dále.



Obr. 1.2: Světlo nepolarizované a polarizované

### 1.1.1 Polarizace odrazem - Brewsterův úhel

V případě, že paprsek světla dopadne na rozhraní, část tohoto paprsku se odrazí a část se láme. Pokud se mezi odraženým a lomeným paprskem nachází úhel  $90^\circ$ , tedy paprsky jsou vůči sobě kolmé, paprsek světla odrážející se z povrchu má tendenci být lineárně úplně polarizovaný, zatímco lomený paprsek pouze částečně polarizovaný. Převládá v něm však jeden směr kmitání vektoru  $\vec{E}$ . Směr polarizace odraženého paprsku, neboli směr vektorů elektrického pole, je pak rovnoběžný s rovinou rozhraní, od kterého se světelný paprsek odrazí [3], [4].

V tomto případě, kdy odražený a lomený paprsek jsou vůči sobě kolmé, se úhel dopadajícího paprsku nazývá Brewsterův úhel a je dán vztahem

$$\tan \theta_B = n_2/n_1 \quad (1.1)$$

Tento výraz lze díky znalosti goniometrických funkcí odvodit ze Snellova zákona, který patří k základním zákonům popisujícím šíření vlnění při přechodu přes rozhraní dvou různých prostředí 1.2. Pomocí úhlu dopadu lze také určit stupeň polarizace – DOP (*Degree of Polarization*), viz kapitola 1.5.

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (1.2)$$

### 1.1.2 Polarizace lomem

Jak již bylo zmíněno, polarizace lomem nastává v případě, kdy paprsek dopadá na rozhraní dvou prostředí a šíří se dále do druhého prostředí. Jedná se však pouze o částečnou polarizaci, při níž vektor intenzity elektrického pole kmitá ve směrech blízkých k rovině dopadu. V tomto případě nikdy nedochází k úplné lineární polarizaci světla. Nicméně existuje situace, při které dochází k úplné lineární polarizaci,

a to v případě dopadu nepolarizovaného světla na speciální anizotropní krystal. V takovém případě dochází k polarizaci dvojlomem.

### 1.1.3 Polarizace dvojlomem

Tato polarizace závisí na optických vlastnostech anizotropního prostředí, přes který prochází paprsek. Využívá se určitých krystalů a to pro jejich anizotropní chování při šíření světla, tj. v různých směrech se světlo šíří různým způsobem. Způsobují to různé indexy lomu pro jednotlivé osy krystalu.

V krystalu dochází k rozdělení paprsku na dva lineárně polarizované paprsky s navzájem kolmými rovinami polarizace, různou rychlostí a různými směry. Krystalem se tak šíří dva paprsky, které se označují jako řádný a mimořádný. Řádný paprsek se řídí známým Snellovým zákonem lomu, viz. 1.2, kdežto mimořádný je závislý na směru světla šířícího se krystalem.

Příklad zmíněný výše se týká krystalu jednoosého. Tento typ krystalu v každém směru dělí procházející paprsek na oba výše zmíněné typy paprsků, přičemž mimořádný se může pohybovat buďto vyšší rychlostí než paprsek řádný (opticky negativní krystal), nebo rychlostí menší (opticky aktivní krystal). V případě proudu ve směru optické osy může projít i paprsek nepolarizovaného světla.

V případě dvouosého krystalu dochází k rozdělení na dva paprsky mimořádné, což značí, že rychlost obou paprsků závisí na směru šíření světla. Vzhledem k tomu, že jsou roviny těchto dvou paprsků navzájem kolmé, můžeme pomocí dvojlomu získat dva úplně polarizované, oddělené paprsky.

Dvojlom může také nastat také v optickém vlákně, a to z několika důvodů. Lze je rozdělit na vlastní a způsobené vnějším vlivem. Vlastní dvojlom může být způsoben nedokonalou výrobní technologií. Příkladem může být eliptický tvar jádra, vzduchová kapsle ve skle nebo případně nečistoty. Vnější vlivem je především myšlen vliv mechanický či teplotní. Při instalaci vlákna dochází k jeho ohybu, tlaku na vlákno nebo zahřívání [5] [6].

### 1.1.4 Polarizace průchodem – Malusův zákon

Další způsob, jak docílit polarizace světla je selektivní absorpce s vektory elektrického pole směřujícími v určitém směru. Určité materiály, známé jako dichroické, absorbují světlo polarizované jedním směrem, avšak neabsorbují světlo polarizované kolmo k tomuto směru. Pokud je materiál dostatečně silný, aby absorboval veškeré světlo polarizované v jednom směru, bude světlo vycházející z materiálu lineárně polarizované.

Dopadá-li lineárně polarizovaná vlna na lineární polarizátor, propustí ji polarizátor bez utlumení pouze v případě, že je tato vlna, respektive složka elektrické

intenzity, orientována ve směru polarizační roviny polarizátoru. V případě, že kmitá ve směru kolmém na směr polarizační roviny, vlnění polarizačním filtrem neprojde. Vztah popisující tuto skutečnost se dá zapsat jako

$$E_p = E_0 \cos(\alpha), \quad (1.3)$$

kde  $\alpha$  vyjadřuje úhel mezi polarizační rovinou polarizátoru a vektorem elektrické intenzity vlnění  $E_0$ , dopadajícího na polarizátor. Výsledkem pak bude elektrická intenzita  $E_p$ , která prošla polarizátorem.

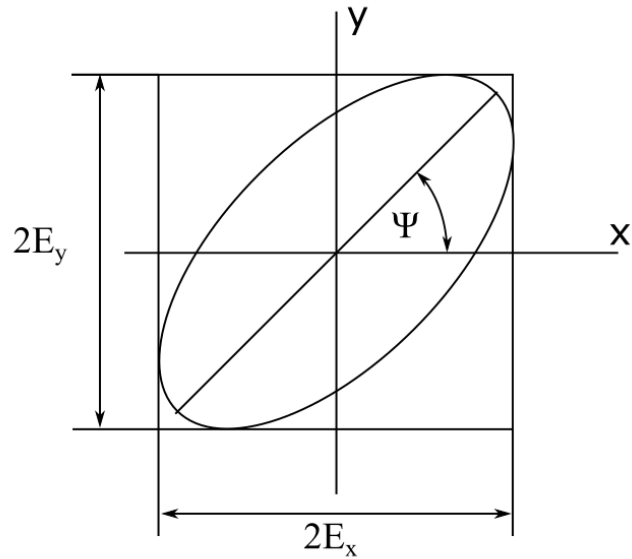
Vztah mezi optickou intenzitou světelné vlny dopadající na polarizátor a intenzitou prošlé vlny se nazývá Malusův zákon. Vzhledem k přímé úměře, která platí mezi optickou intenzitou a druhé mocnině amplitudy elektrické intenzity se pak dá zapsat ve tvaru

$$I_p = I_0 \cos^2(\alpha). \quad (1.4)$$

Pokud jsou dva polarizátory umístěny za sebou, druhý polarizátor se obecně nazývá analyzátor. Pokud jsou osy polarizátorů ortogonální, polarizátory by neměly propustit teoreticky žádné světlo.

## 1.2 Polarizační elipsa

Elektrické pole rovinné vlny lze popsat jako vektorový součet dvou ortogonálních složek, obvykle nazývaných jako horizontální a vertikální složka. Tyto dvě složky se vyznačují amplitudami a vzájemnou fází. Při pohledu po směru šíření sleduje hrot vektoru elektrického pole plně polarizované vlny pravidelný vzorec. Ve většině případů se jedná o tvar elipsy, jak je vidět na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Polarizační elipsa

Elipsa má majoritní osu  $a$  a minoritní osu  $b$ , přičemž úhel svíraný mezi kladnou částí vodorovné osy  $x$  a hlavní osy elipsy  $a$  se značí písmenem  $\Psi$ . Tento úhel může nabývat hodnot mezi  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

Tvar elipsy je řízen velikostmi a relativní fází mezi vodorovnými a svislými složkami vektoru elektrického pole. Díky tomu získáme různé tvary eliptické polarizace, přičemž se může jednat i o speciální degenerované stavy [9], které jsou popsány v následující kapitole 1.3.

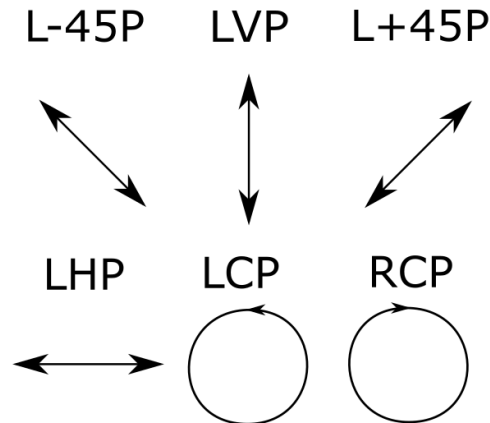
### 1.3 Degenerované stavy polarizace

I když se dá obecně říci, že optické pole je polarizováno elipticky, v závislosti na orientaci elektrického pole klasifikujeme i obzvláště důležité případy. Tyto případy nazýváme degenerovanými polarizačními stavy, neboli DPS. Mezi DPS zahrnujeme následující typy:

- lineárně horizontálně polarizované - LHP
- lineárně vertikálně polarizované - LVP
- lineárně  $\pm 45^\circ$  polarizované světlo - L+45P / L-45P
- levé kruhově polarizované světlo - LCP
- pravé kruhově polarizované světlo - RCP

V případě LCP rotuje světlo v protisměru hodinových ručiček při šíření směrem k pozorovacímu bodu, kdežto při RCP rotuje světlo ve směru. Tyto zmíněné stavy jsou také poměrně snadno realizovatelné například pomocí lineárních či kruhových

polarizátorů. Většina polarizačních měření díky jejich jednoduchosti využívá právě tyto stavy [7] [8].



Obr. 1.4: Degenerované stavy polarizace

### 1.3.1 Lineární polarizace

Jedná se o jeden ze způsobů, jak polarizovat vlnu, přičemž v takovém případě je směr vektoru elektrického pole  $E$  v konkrétní rovině neměnný. Což znamená, že jeho amplituda se mění, avšak fáze zůstává stejná. Může vzniknout několika způsoby, a to lomem, odrazem, nebo dvojlomem světla, případně pomocí polarizátorů. Jednotlivé případy jsou popsány v kapitole 1.1.

Rovinná vlna je lineárně polarizovaná, pokud mezi  $E_x$  a  $E_y$  není fázový rozdíl. Zápis pak vypadá jako

$$E_0 = (E_x, E_y, 0), \quad (1.5)$$

přičemž vybereme celkovou fázi tak, aby  $E_x$  a  $E_y$  byly reálná čísla. Pokud vektor  $E_y$  je tedy nulový, ale vektor  $E_x$  nenulový, pak takové uskupení označujeme jako lineárně polarizované ve směru x - stav LHP. Podobně tomu může být v případě, kdy vektor  $E_x = 0$ , kdežto vektor  $E_y \neq 0$ . Takový případ nazýváme lineárně polarizovaný ve směru y - stav LVP.

Nejjednodušší vyjádření pak matematicky vypadá následovně:

$$E_x = \hat{x}a \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (1.6)$$

kde  $\omega = 2\pi f$  udává úhlovou rychlost,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  velikost vlny,  $z$  je směr šíření,  $a$  je amplituda,  $\varphi_0$  značí fázi a  $\hat{x}$  je jednotkový vektor.

### 1.3.2 Kruhová polarizace

Jestliže se rozdíl fází dvou vzájemně kolmých, lineárně polarizovaných složek elektrické intenzity se stejnou amplitudou rovná  $\pm\frac{\pi}{2}$ , pak říkáme, že je vlna kruhově polarizována.

$$E_x = a \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \quad (1.7)$$

$$E_y = a \cos(\omega t - kz \pm \varphi_0) = \pm a \sin(\omega t - kz + \varphi_0) \quad (1.8)$$

Z daných rovnic 1.7 a 1.8 pak můžeme vyjádřit výsledný tvar

$$E = \hat{x}a \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \pm \hat{y}a \sin(\omega t - kz + \varphi_0) \quad (1.9)$$

V případě, že je  $\varphi = +\pi/2$ , rotuje elektrické pole po směru hodinových ručiček, a takové světlo pak označujeme za pravotočivě kruhově polarizované. Je-li  $\varphi = -\pi/2$  označujeme jej za levotočivě kruhově polarizované světlo [8], [9].

## 1.4 Jonesovy a Stokesovy vektory

Libovolný polarizační stav může být popsán za pomoci lineární kombinace vektorů tvořících ortonormální<sup>1</sup> soubor. Příkladem může být přepis horizontálně lineárně polarizovaného záření jako součet levotočivě a pravotočivě kruhově polarizovaného záření o stejné intenzitě.

Vlastnosti jednotlivých polarizačních prvků popíšeme pomocí Jonesovy matice. V případě řešení komplexního modelu o více prvcích se v Jonesově formalismu dané matice násobí.

Nejčastější polarizační stavy a jejich vektory jsou patrné z tabulky níže.

Jonesův vektor lze však použít pouze pro popis plně polarizovaného záření, nikoliv pro částečně polarizované. Vzhledem k tomuto faktu, a také z důvodu setkávání se v praxi převážně s částečně polarizovaným nebo nepolarizovaným světlem, využívá se pro popis polarizačního stavu Stokesův vektor definovaný jako




$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

kde

$$I = \langle E_{0x}^2 \rangle + \langle E_{0y}^2 \rangle \quad (1.11)$$

---

<sup>1</sup>vektory zároveň ortogonální a jednotkové délky

polarizační stav	Jonesův vektor	Stokesův vektor	grafický symbol
lineární polarizace horizontální	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\longleftrightarrow$
lineární polarizace vertikální	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\updownarrow$
lineární polarizace svírající $\angle 45^\circ$ s osou $x$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\nearrow$
obecná lineární polarizace s azimutem $\alpha$	$\begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \pm \sin \alpha \end{pmatrix}$		$\nearrow$
pravotočivá kruhová polarizace	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	
levotočivá kruhová polarizace	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	
obecná eliptická polarizace	$\begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha e^{-i\alpha} \end{pmatrix}$		

Obr. 1.5: Jonesovy a Stokesovy vektory pro určité polarizační stavy

$$Q = \langle E_{0x}^2 \rangle - \langle E_{0y}^2 \rangle \quad (1.12)$$

$$U = \langle 2E_{0x}E_{0y} \cos \Delta \rangle \quad (1.13)$$

$$V = \langle 2E_{0x}E_{0y} \sin \Delta \rangle \quad (1.14)$$

Rozdíl fází se určí vztahem  $\Delta = \varphi_x - \varphi_y$ .

$I$  udává celkovou intenzitu dopadajícího světelného paprsku. Zbylé složky  $Q, U, V$  odpovídají rozdílu mezi dvěma ortogonálními stavy. Parametr  $Q$  udává rozdíl mezi horizontální a vertikální rovinou, parametr  $U$  pak udává polarizaci při úhlu  $45^\circ$

a  $-45^\circ$  k ose  $x$  a parametr  $V$  reprezentuje rozdíl pravotočivě a levotočivě kruhové polarizace.

## 1.5 Stupeň polarizace - DOP

*Degree of polarization*, neboli stupeň polarizace, udává míru polarizace světelné vlny, kterou sledujeme. Hodnota se udává v procentech, přičemž dokonale polarizované světlo nabývá hodnoty 100 %, kdežto světlo nepolarizované 0 %.

DOP lze definovat za použití Stokesových vektorů podrobně popsanych v předchozí kapitole 1.4:

$$DOP = \frac{I_{pol}}{I} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \quad (1.15)$$

kde  $I_{pol}$  udává intenzitu polarizovaného světla a  $I$  je celková intenzita světla.

Tato hodnota nám však neudává zda je světlo polarizováno kruhově či lineárně. Z toho důvodu se zavedly pomocné veličiny jako stupeň lineární polarizace  $DOP_{lin}$ , který je definován obdobně

$$DOP_{lin} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (1.16)$$

a stupeň kruhové polarizace  $DOP_{kruh}$ :

$$DOP_{kruh} = \frac{V}{I}, \quad (1.17)$$

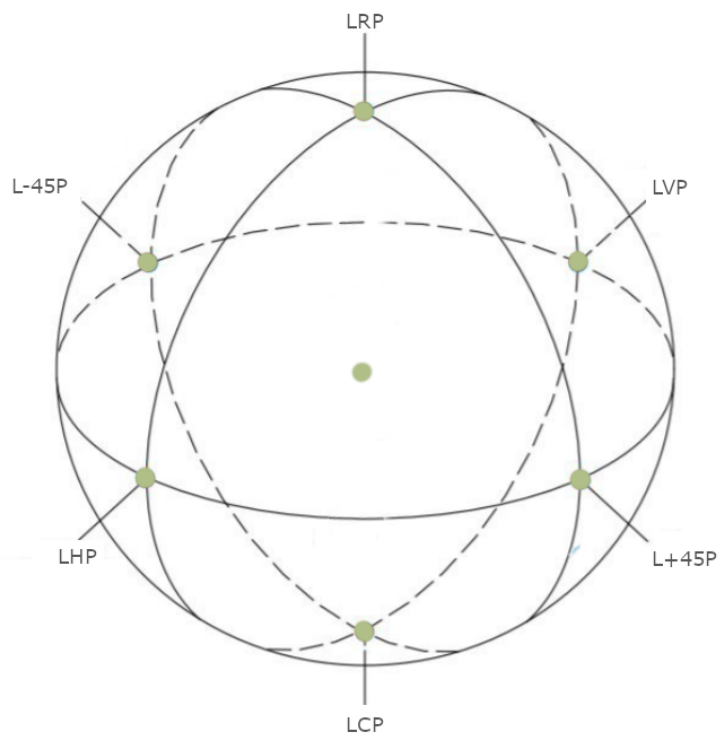
## 1.6 Poincarého koule

Jestliže chceme vyjádřit polarizované světlo, polarizační elipsa nám pomůže pouze v případech DPS. Z toho důvodu se využívá zobrazení v 3D prostoru pomocí Poincarého koule. Každý ze stavů je reprezentován bodem na povrchu koule, přičemž tento bod je koncovým bodem vektoru s počátkem ve středu koule.

Stupeň polarizace je dán vzdáleností od středu koule, přičemž na jejím povrchu dosahuje maximální hodnoty, tedy jedná se o zcela polarizované světlo, kdežto v jejím středu se nachází světlo nepolarizované.

Zvolíme-li bod  $H$  na povrchu koule, pak na opačné straně koule se bude nacházet bod  $V$ . Tyto body reprezentují horizontálně lineární polarizaci a vertikálně lineární polarizaci. V případě, že zaznačíme vrcholy náležící kolmo k vrcholům  $H$  a  $V$  od středu, pak tyto body určují plochu, která reprezentuje pouze lineární polarizaci. Jestliže přidáme další dva vektory kolmé k této rovině, na jejich vrcholu se budou nacházet body pro pravotočivou a levotočivou kruhovou polarizaci.

V případě použití Stokesových vektorů ve spojení s Poincarého koulí můžeme pojmenování kartézských souřadnic  $x, y, z$  nahradit za vektory  $Q, U, V$  [8].



Obr. 1.6: Stavy DPS na Poincarého kouli

## 2 OPTICKÁ VLÁKNA

Nejširší využití mají optická vlákna především v telekomunikacích a sensorové technice. Pro jejich výrobu se nejčastěji používá kysličník křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ), ke kterému se přidávají různé směsi.

Dle teorie v optickém vlákně s kruhovým jádrem nedochází k žádnému dvojlomu a stav polarizace se v takovém vlákně během šíření nemění. Ve skutečnosti je však v optickém vlákně vždy přítomno malé množství dvojlomů, a to díky vnějším vlivům (zatížení, ohyb atd.) Nebo výrobní nedokonalostí vlákna. Takový dvojlom je ze své podstaty náhodný, a tak způsobuje náhodné energetické prolnutí mezi dvěma polarizačními režimy v optickém vlákně, tzv. (*polarization crosstalk*). Výstupní polarizační stav se proto stává nepředvídatelným a mění se s časem [10]. V případě, že se těmito vlivům chceme vyvarovat, využijeme vlákna PM, tedy *Polarization maintaining fiber*, viz. 2.3.

### 2.1 Vícevidová vlákna

Vzhledem k většímu průměru jádra se kabelem může poslat více světelných pulzů najednou, což vede k většímu přenosu dat. To má však za následek nárůst možností ztráty signálu, případně jeho omezení nebo rušení.

Tyto vlákna obvykle používají k vytvoření světelného pulzu LED a používají se tak především na kratší vzdálenosti. Z hlediska rozložení indexu lomu se pak vícevidová vlákna používají převážně jako vlákna gradientní. Na rozdíl od starší metody skokové změny indexu lomu dokáží tyto vlákna docílit vyšších vzdáleností přenosu, avšak pro účely této práce nejsou vhodná, neboť přenáší signál nepolarizovaný.

### 2.2 Jednovidová vlákna

Jednovidová vlákna se od vícevidových příliš neliší. Hlavním rozdílem je zde jádro optického vlákna, které bývá konstruováno o průměru 5-10  $\mu\text{m}$ , na čemž závisí mimo jiné vlnová délka, pro kterou je vlákno určeno. To však neznamená, že může vést pouze danou vlnovou délku, nicméně pro danou délku dosahuje nejvhodnějších vlastností. Vzhledem k šířce jádra se tak vláknem šíří pouze jeden paprsek, avšak možná vzdálenost přenosu je u jednovidových vláken podstatně vyšší, než u vícevidových [10]. Tyto vlákna však stejně jako vícevidová přenáší pouze nepolarizované světlo.

## 2.3 Vlákna zachovávající polarizaci

Vlákno udržující polarizaci (PM vlákno) udržuje dvě polarizační roviny tím, že se úmyslně indukují dvojlom rovnoměrně po celé délce vlákna, čímž ruší náhodné energetické spoje mezi těmito dvěma polarizačními rovinami.

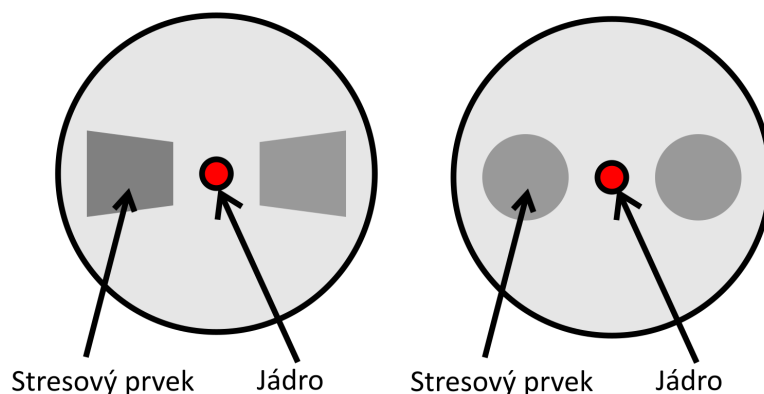
Tyto vlákna se mohou rozdělit do dvou kategorií a to vlákna s nízkým dvojlomem (LB - *low birefringence*) a vysokým dvojlomem (HB - *high birefringence*). Vzhledem k vyššímu vnějšímu vlivu u vláken LB, nejsou tyto vlákna vhodné pro použití v této práci. Vlákna s vysokou hodnotou dvojlomu naopak vykazují vysoké ztráty, a to z důvodu velkého rozdílu indexu lomu jádra a pláště a nedokonalostí rozhraní.

Způsobů, jakým docílíme vysokého dvojlomu v PM vláknech, existuje několik, přičemž hojně využívané bývají:

- Vytvořením eliptické struktury
- Stresovými prvky poblíž jádra

### 2.3.1 Vlákna PM se stresovými prvky

Obvykle používaný způsob zavedení vysoké hodnoty dvojlomu je pomocí zavedením dvou symetricky vložených skleněných tyčí dotovaných borem. Tyto tyče modifikované skleněné kompozice zalité do děr na opačných stranách jádra způsobují určité mechanické napětí (stres vlákna) s dobře definovanou orientací. Čím více se vlákno mechanicky napíná, tím větší je rozdíl rychlostí mezi dvěma rovinami a tím se docílí i vyšší hodnoty dvojlomu.



Obr. 2.1: a) Motýlek b) PANDA

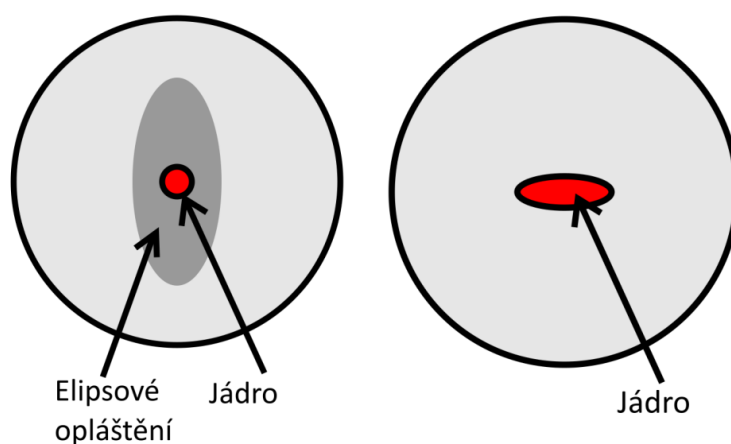
V současné době je nejoblíbenějším PM vláknem v průmyslu kruhové vlákno PANDA. Jednou z výhod tohoto vlákna oproti většině ostatních PM je to, že velikost jádra a numerická apertura jsou kompatibilní s běžnými jednovidovými vlákny. To zajišťuje minimální ztráty u zařízení využívajících oba tyto typy.

### 2.3.2 Vlákna PM s eliptickou strukturou

V eliptických PM vláknech se využívá nesymetričnosti jádra, díky které se docílí vyšší hodnoty dvojlomu. Zkoumány byly dva návrhy vláken:

- Vlákna s eliptickým jádrem
- Vlákna s eliptickým opláštěním

Eliptické opláštění skla dotovaného borem kolem jádra způsobuje asymetrické namáhání jádra, což vede k rozdílu mezi polarizačními rovinami. Typické hodnoty dvojlomu jsou však pro eliptické opláštění nižší než u vlákna s eliptickým jádrem. Výrobou vlákna mající jádro ve tvaru elipsy se sice docílilo vyššího dvojlomu, avšak ztráty dosáhly vyšších hodnot, než v případě prvním.



Obr. 2.2: a) Vlákno s eliptickým jádrem b) Vlákno s eliptickým opláštěním

## 2.4 Polarizační přeslechy v PM vláknech

Polarizační přeslechy v PM vláknech vznikají ze tří hlavních důvodů, které jsou popsány níže.

Nesouosost osy vláken na rozhraních dvou vláken, jako jsou konektory nebo spojky, obvykle způsobují extrémně lokalizovaný přeslech s velkou amplitudou. Amplituda závisí na úhlu vyrovnání obou konců vláken.

Nedokonalosti PM vlákna, jako jsou lokální změny dvojlomu, vnitřní změny tvaru vlákna, nebo změny stresu jádra, což obecně způsobuje přeslech s malou amplitudou, který se na vyskytuje postupně v průběhu určité délky.

Vnější mechanické namáhání na části vlákna, jako je ohýbání vláken, jejich křivění, nebo tlak na vlákno, může způsobit složité přeslechové efekty.

## 2.5 Senzorická vlákna

Vysoce dvojlomná polarizaci zachovávající optická vlákna jsou současně novou generací senzorů, využívajících polarizační modulaci ve vláknech ke snímání vnějších vlivů. V HB vláknech rozdíl mezi fázovými rychlostmi pro dvě ortogonálně polarizované roviny jsou dostatečně vysoké, aby se tím zabránilo přeslechů mezi těmito dvěma rovinami. Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, tyto vlákna mají velký vnitřní dvojlom díky konstrukci jádra, respektive opláštění pro vyvolání stresového prvku po celé délce vlákna.

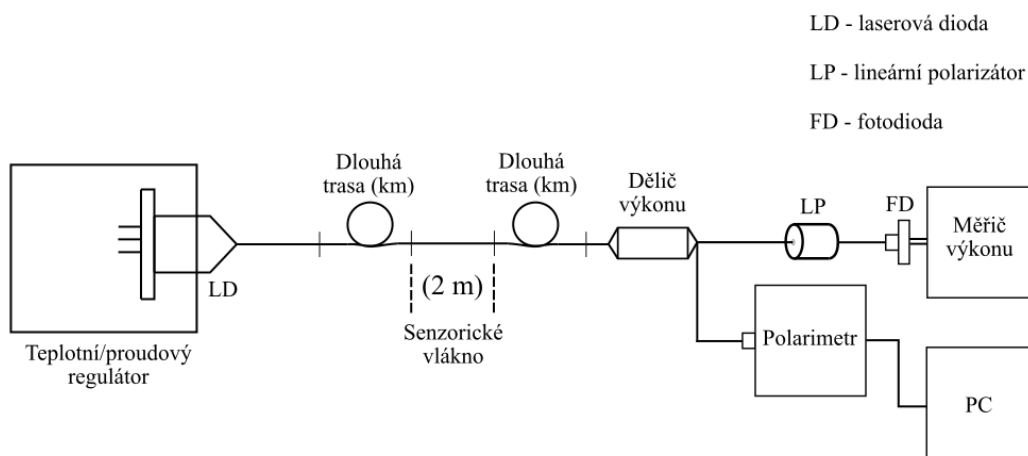
Mnoho fyzikálních veličin může být měřeno senzory založenými na HB vláknech, a to například hydrostatický tlak, vibrace, teplota, akustické vlny, atd. V případě vláknových senzorů se teplotní změna, nebo deformace vlákna projevuje ve formě změny fáze světla šířícího vláknem. Tento posun je pak snadno detekovaný pomocí polarimetru.

Teplotní závislost indexu lomu se velmi liší podle typu skla použitého ve vlákně. Použitím typického skleněného vlákna se může docílit přesnosti i v řádech  $10^{-8}^{\circ}\text{C}$ . Takového rozlišení v praxi ve většině případech není zapotřebí a tak se patřičným výběrem kompozice vlákna a jeho opláštění může docílit nižší citlivosti.

Dielektrické vlastnosti a vysoké teploty těchto senzorů je činí zvláště použitelnými pro kontrolu uvnitř operačních strojů, jako jsou transformátory a generátory, v dutinách motoru, vysokonapěťových zařízeních a nebo v oblastech s vysokým rizikem výbuchu, právě z důvodu jejich nevodivosti.

### 3 NÁVRH MĚŘENÍ

V předchozích kapitolách byly objasněny teoretické předpoklady pro měření teploty za pomoci optického sensorického vlákna citlivého na teplotu. Těchto předpokladů se nadále bude vyžívat v praktické části, pro kterou bylo navrženo schéma zapojení externího pracoviště na Univerzitě obrany v Brně. Toto schéma obsahuje kompletní sestavení pracoviště, ze kterého se odvíjí měření související s daným tématem diplomové práce. V této práci se tak zaměříme převážně na část před sensorickým vláknem, tedy zavedenou dlouhou trasou a případně doplňujícími prvky, které budou dále rozepsány v rámci jednotlivých metod provedených měření.

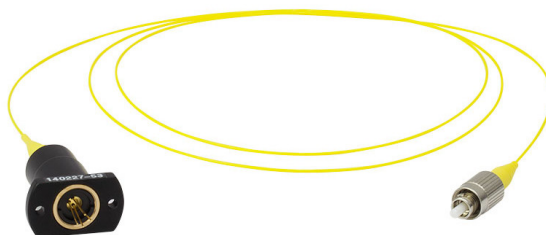


Obr. 3.1: Schéma zapojení pracoviště

Jako zdroj světla se využije laserové diody usazené v teplotním respektive proudovém regulátoru. Z této tzv. pigtail diody vede 1 m dlouhé vlákno, které je dále napojeno na dlouhou trasu. V rámci pracoviště se bude zkoumat mimo jiné i vhodná délka trasy pro praktické účely. Na danou trasu je připojeno sensorické vlákno snímající teplotu, jenž je napojeno na další dlouhou trasu vyvedenou do děliče výkonu. Tento dělič rozděluje výkon v obou osách v poměru 90:10. Měření pak provádí polarimetr na 10 % výkonu, kdežto zbylých 90 % výkonu paprsku prochází přes lineární polarizátor na fotodiodu. Jednotlivé komponenty jsou v následujících kapitolách podrobně popsány.

## 3.1 Zdroj světla

Jako zdroj světla se v rámci laboratorního měření využije přípravku LPS-1550-FC obsahující laserovou diodu s označením ML925B45F. Jedná se o standardní diodu od firmy Thorlabs [14], uchycenou v pouzdru s vyvedeným 1 m dlouhým jednovidovým vláknem opatřeným konektorem FC/PC. Tato dioda vyzařuje světlo o vlnové délce 1550 nm o optickém výkonu 1,5 mW.



Obr. 3.2: Laserová dioda LPS-1550-FC

Daný přípravek je uložen v kompaktním teplotním regulátoru respektive kontroléru napájení diody CLD1010LP. Ten dokáže řídit laserové diody do hodnoty 1,0 A a udržovat vysoce stabilní teplotu pro co nejpřesnější udržení vyzařované vlnové délky.



Obr. 3.3: Teplotní regulátor CLD1010LP

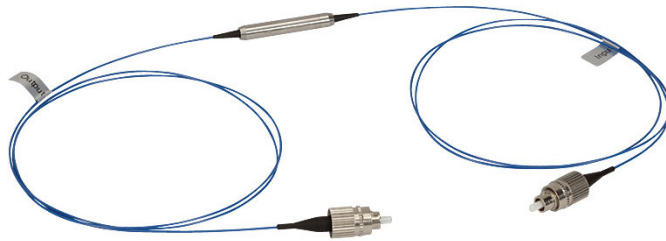
Základem tohoto přípravku je Peltierův článek, který díky procházejícímu proudu docílí řízené výměny tepla mezi dvěma destičkami. To má za následek ochlazení jedné

destičky, kdežto druhá se zahřívá. Při otočení průchodu proudu se otáčí i směr toku tepla, tudíž se destičky ochlazují/ohřívají obráceně.

Výhodou tohoto článku je jeho okamžitý efekty změny teploty a snadná regulace jeho výkonu.

## 3.2 Lineární polarizátor

In-line vláknový polarizátor ILP1550PM-FC je navržen tak, aby lineárně polarizované světlo procházelo, zatímco ortogonální polarizace z nepolarizovaného (nebo náhodně polarizovaného) světelného zdroje byla utlumena. U PM verzí těchto zařízení je výstupní polarizace a klíč konektoru zarovnány s pomalou osou vlákna.



Obr. 3.4: In-line vláknový polarizátor ILP1550PM-FC

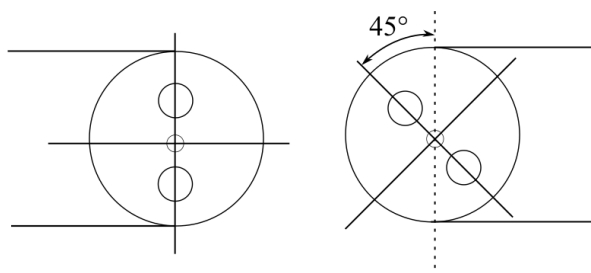
## 3.3 Vlákna a spoje

Z důvodu budoucího praktického využití měření teploty ve střežené oblasti je cílem laboratorního výzkumu otestovat přívod světelného paprsku z laserové diody do sensorického vlákna přes co nejdelší možnou trasu s ohledem na cenovou relaci. Z toho důvodu se v rámci měření využijí vlákna zachovávající polarizaci dle standardu G657A o různých délkách a to v rozsahu 1 až 40 km. Vlákna jsou určena pro pracovní vlnovou délku 1550 nm.

Kabely z optických PM vláken jsou založeny na vysoce přesné technice připojení. Orientace os polarizace je udržována pomocí konektorů s klíčem určujícím polohu, který pasuje do zásuvky s velmi nízkou tolerancí odchylky drážky pro klíč, zajišťující spoj s co nejmenším možným vychýlením. Tím se docílí co nejmenších ztrát výkonu ve spojích.

### 3.4 Optovláknový senzor

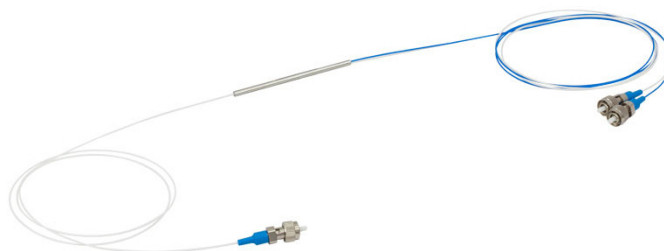
Část vlákna o délce 2 m napojená na dlouhou trasu PM vlákna pracuje jako senzor teploty. Toto vlákno, vyrobené na zakázku firmou SQS Vlákenná optika a.s., není pokryt sekundárním ochranným pláštěm a jeho FC konektory jsou pootočené o  $45^\circ$ , tedy vlákno je v rámci zapojení usazeno mezi pomalou a rychlou osou pod stejným úhlem vůči trase, a to z důvodu potřeby vybudit tyto osy rovnoměrně, viz. obr. 3.4



Obr. 3.5: Usazení vláknového senzoru

### 3.5 Dělič výkonu zachovávající polarizaci

Pro zachování funkčnosti optovláknového senzoru a zároveň měření výkonu pomocí polarimetru či fotodiody, potřebujeme signál rozdělit děličem výkonu. K tomu je využíván dělič výkonu PMC1550-90B-FC, na který je přiveden optický signál, rozdělující se výkonově na 90% pro kompletní pracoviště a 10% pro polarimetr na kontrolu výkonu v určitých částech trasy. Vazební členy jsou vyráběny pomocí PM vlákna typu Panda, které jim umožňuje udržovat vysoký stupeň polarizace.



Obr. 3.6: Dělič výkonu PMC1550-90B-FC

## 3.6 Polarimetr

Koncovým zařízením laboratorní soustavy je polarimetr typu PAX5710VIS-T-TXP. Jedná se o flexibilní a výkonný systém pro analýzu polarizace, který byl navržen pro různé aplikace od klasických polarizačních měření, stanovení extinkčního poměru PM vláken až po komplexní úkony jako vyhodnocení optických komponent za pomoci Jonesových nebo Muellerových výpočtů.



Obr. 3.7: Polarimetr PAX5710VIS-T-TXP

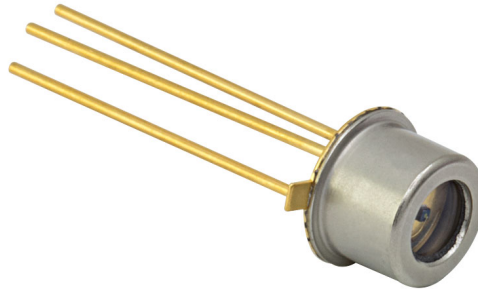
Měřicí sonda obsahuje rotující desku, polarizátor a fotodiodu. Na základě aktuálního úhlu pak transformuje vstupní polarizaci.

Polarimetr je pomocí USB kabelu propojen s počítačem, díky kterému lze v reálném čase zobrazit přijímaný výkon paprsku, Stokesovy parametry, stav polarizace a mnoho dalších parametrů.

## 3.7 Fotodioda

Vzhledem k tomu, abychom byli schopni měřit optický výkon dopadajícího paprsku co nejpřesněji, je pro nás hlavním parametrem rychlost. Pro měřicí účely tak byla vybrána vysoce rychlá fotodioda FGA015 od firmy Thorlabs [14]. Tato dioda pracuje na vlnových délkách 800 - 1700 nm a její rychlost změny se pohybuje při 300 ps při vlnové délce 1550 nm. Vzhledem k využití v rámci měření rychlosti okolo 100 ms, je tato dioda více než kompetentní pro tyto účely měření.

Kompletní specifikace diody můžeme vidět v tabulce 3.1.



Obr. 3.8: Fotodioda FGA015

Rozsah vlnových délek	800 - 1700 nm
Vrcholová vlnová délka	1550 nm
Citlivost (1550 nm)	0.95 A/W
Čas vzestupu/poklesu (5 V)	300 ps / 300 ps
NEP (1550 nm, 5 V)	$1.30 \times 10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
Minimální proud (5 V)	0.5 nA
Vstupní napětí	5 V
Kapacitní odpor (5 V)	1.5 pF
Optický vstupní výkon (1550 nm)	10 mW (Max)

Tab. 3.1: Specifikace fotodiody FGA015

### 3.8 Měřič výkonu laseru

K měření výkonu dopadajícího na fotodiodu využijeme ručního měřicího přístroje Ophir 7Z01560 Vega, který obsahuje mnoho funkcí mimo jiné například laserové ladění, záznam dat, zobrazení grafů, normalizace, škálování útlumu a zobrazení maximálních a minimálních limit. Díky zabudovanému USB konektoru můžeme propojit měřič s počítačem obsahujícím obslužné programy StarLabs a StarCom.



Obr. 3.9: Měřič výkonu laseru Ophir 7Z01560 Vega

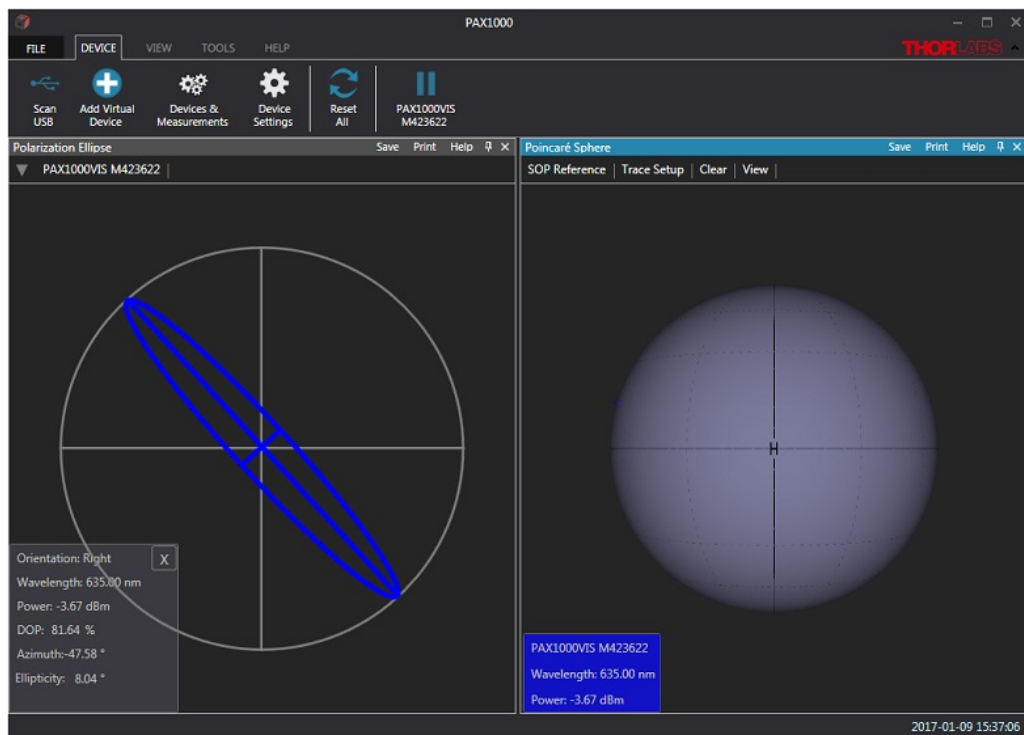
### 3.9 Řídící software

Software pro daný polarimetr obsahuje intuitivní grafické uživatelské rozhraní, které poskytuje více způsobů vizualizace naměřených dat. Během měření zobrazuje software dané parametry formou:

- polarizační elipsy,
- Poincarého koule,
- grafu,
- tabulky.

Uživatelské rozhraní také obsahuje snadno použitelný vyrovnávací nástroj, který pomáhá uživateli optimálně vyrovnat paprsek vstupující do polarimetru, což je rozhodující pro zajištění přesných měření.

Současně lze zobrazit měření až z pěti různých zdrojů, mezi které patří fyzické polarimetry, virtuální zařízení a uložená data načtená ze souborů, toho však v rámci práce není možno využít. Software poskytuje kontrolu nad vzorkovací frekvencí a preferencemi průměrování dat. Podporována jsou také dlouhodobá měření, které jsou pro naše účely důležité. Tato měření se ukládají do souboru s časově označenými hodnotami podle nastavení zadaných před počátkem měření.



Obr. 3.10: Uživatelské prostředí ovládacího softwaru polarimetru [16]

## 4 REALIZACE MĚŘENÍ

Zaměření této kapitoly spočívá v samotné realizaci několika průběhu několika měření, souvisejících se zapojením 3.1. Všechna tato měření byla prováděna na vlnové délce 1550 nm a zaměřují se zpočátku na samotné ověření funkčnosti použitých prvků. V další části usilujeme o ověření vhodných metod pro využití daného teplotního senzoru na dlouhé trase. Naším cílem je tak výběr nejvhodnějšího vstupního signálu na teplotní senzor.

Pro všechna měření je využito záznamu hodnot do programu Excel. Díky těmto hodnotám jsme schopni vygenerovat grafy pro několik různých parametrů, které pro nás mohou být relevantní:

- Normalizované Stokesovy vektory
- Stupeň polarizace
- Elipticita
- Fázový rozdíl pomalé a rychlé osy
- Výkon polarizované a nepolarizované části

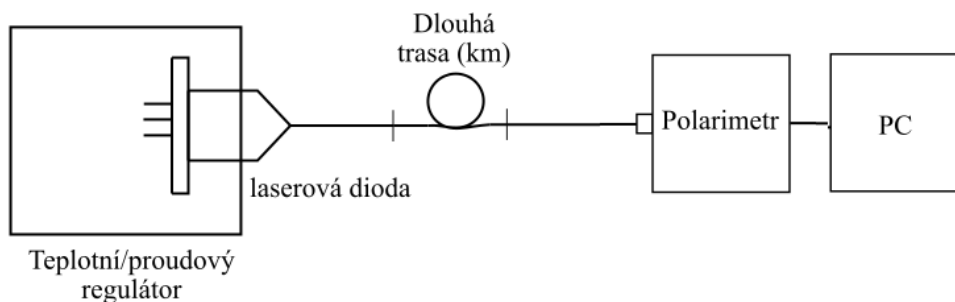
### 4.1 Měření přímé trasy

Pro testování vhodné délky trasy jsou vybrány tři různé délky, a to konkrétně 1 km, 10 km a 40 km. Tyto trasy jsou napojeny dle zapojení 4.1.

Toto zapojení slouží k ověření několika faktů. Očekává se, že laserová dioda bude teplotně stabilní, díky jejímu usazení v teplotním respektive proudovém regulátoru. S tím souvisí také stabilita vyzařovaného paprsku na vlnové délce 1550nm, která by měla být ideálně co nejvyšší.

Zároveň je ověřen výstupní výkon těchto tras, které budou dále napojeny na samotný teplotní senzor, nebo jiný prvek zařazený do trasy, za účelem úpravy signálu pro co nejvhodnější použití jako vstup pro daný teplotní senzor. Tento výkon by měl být ideálně neměnný, avšak pouze pokud hovoříme o výkonu celkovém. Tedy počítáme jak s polarizovanou částí světelného paprsku, tak s nepolarizovanou.

V rámci zapojení využíváme přípravku LPS-1550-FC obsahující laserovou diodu s označením ML925B45F od firmy Thorlabs. Z něj vede navařené 1 m dlouhé PM optické vlákno (tzv. pigtail), které je dále napojeno na dlouhou trasu SM vlákna pomocí FC konektorů. Tato trasa je dále napojena přes 1 m dlouhé optické vlákno na polarimetr. Tento polarimetr je propojen přes komunikační rozhraní USB do počítače, díky kterému můžeme sledovat naměřené hodnoty v reálném čase, případně vytvořit záznam naměřených hodnot do tabulky.



Obr. 4.1: Zapojení zkušebního měření tras

### 4.1.1 Popis měření přímé trasy

Měření bylo provedeno při pokojové teplotě přibližně 22 °C, která se však v průběhu dne mírně měnila. Vzhledem k tomu, že našim cílem není měření absolutních hodnot, ale zachycení rychlých změn, informace o přesné teplotě není příliš relevantní.

Podobně se díváme také na relativní hodnotu času, která pro nás není taktéž příliš relevantní. Z toho důvodu jsou grafy zobrazeny v reálném čase, v jakou denní dobu bylo dané měření provedeno. Nikoli v relativních hodnotách odpočítávaných od počátku měření.

Celková doba prvotních měření byla stanovena na 2 hodiny, a to pro trasy 1 km a 10 km. Při měření o délce 2 hodin bylo nastaveno zaznamenávání hodnot v intervalu 500 ms.

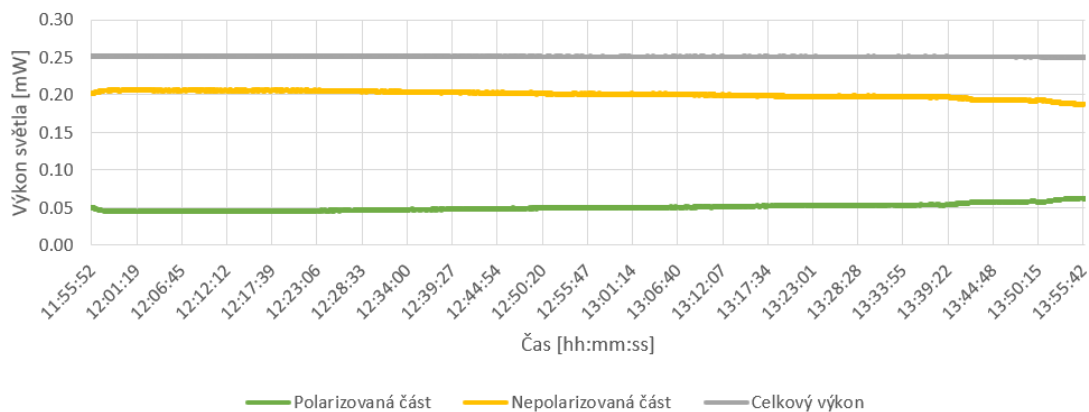
Dané trasy však nebylo možné měřit současně, tedy nebylo docíleno pokrytí stejného časového úseku. Z toho důvodu se v následujících měření využilo delšího úseku v délce 24 hodin s intervalem záznamu po 1 minutě. Díky tomu jsme schopni z výsledků lépe určit, zda bylo měření ovlivněno vlivy, jako například pohybem osob v místnosti, slunečními paprsky pronikajícími do místnosti, nebo postupnou změnou teploty na základě denních cyklů vytápění.

### 4.1.2 Výsledky měření přímé trasy

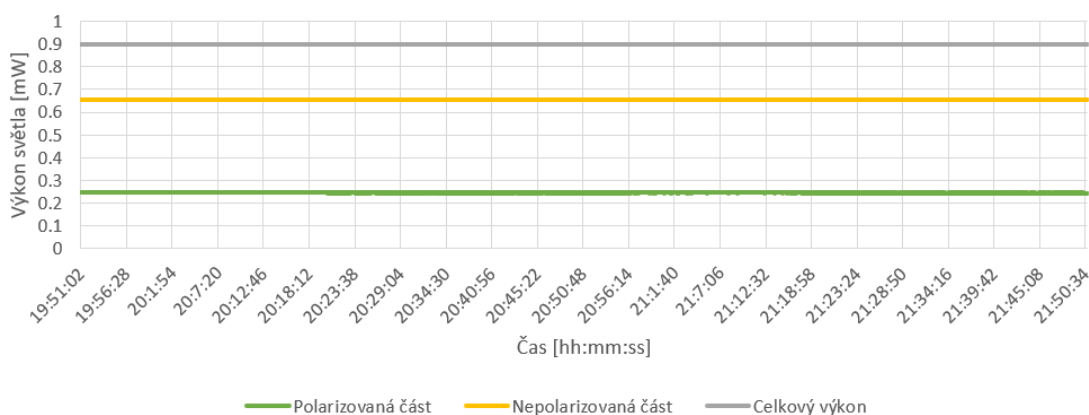
Pro ověření stability při každém měření byl ověřen jeho celkový výkon, který by měl být konstantní. To je patrné z výsledků průběhu výkonu 4.2 a 4.3.

Tyto grafy zobrazují nejen celkový výkon, ale také jejich polarizovanou a nepolarizovanou část. Z jejich průběhu si pak můžeme všimnout zrcadlení těchto částí. Výrazně viditelné to je poté při měření prudkých změn Stokesových vektorů.

V grafu 4.4 vidíme zaznamenané Stokesovy vektory pro zapojení 1 km trasy s dobou měření 2 hodin. Reálně se pohybujeme v čase mezi 11:55 a 13:55 a již při prvních 5 minut měření můžeme pozorovat prudký pokles vektoru  $S_3$  a také mírnou



Obr. 4.2: Průběh výkonu na přímé trase 1 km 2 hod

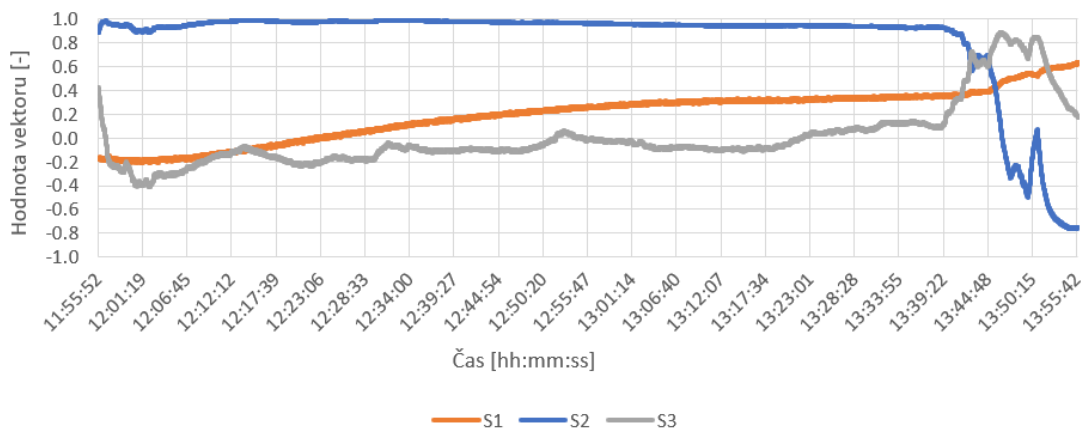


Obr. 4.3: Průběh výkonu na přímé trase 10 km 2 hod

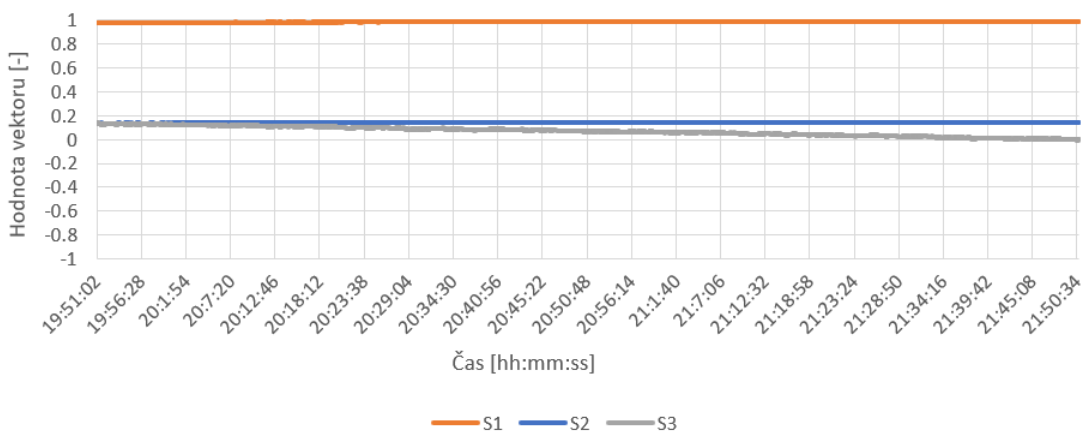
změnu vektoru  $S_2$ . I přes to, že na tuto trasu není napojený optický teplotní senzor, je patrné, že i samotné SM vlákno této dlouhé trasy je citlivé na větší změny teploty. Tyto změny jsou projevem pohybu osob v místnosti pobíhajícího měření.

Po opuštění měřícího pracoviště se teplota v místnosti začala ustalovat, což je patrné z postupných mírných změn vektorů až do času 13:39, kdy je také vidět prudká změna hodnot zmíněných vektorů. Což je také následek vstupu osob do místnosti za účelem kontroly měření. Tento značný výkyv teplot při pohybu osob byl velmi razantní i bez samotného teplotního senzoru, avšak daná trasa je v těchto laboratorních podmínkách namotaná na cívce, tedy změna tepla působí na celou trasu souměrně. V případě využití reálné trasy by tyto výkyvy nebyly tak patrné, neboť trasa by byla dostatečně rozprostřena.

Pro druhé měření na vlákne o délce 10 km po dobu 2 hodin byl začátek naplánován večer, přičemž jeho zapnutí bylo řízeno vzdáleně, aby nedošlo k ovlivnění teploty v místnosti přítomnou osobou. Díky tomu je z grafu 4.5 patrné, že hodnoty všech vektorů se příliš neměnily, tedy nedošlo ke změnám teploty.



Obr. 4.4: Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 1 km 2 hod

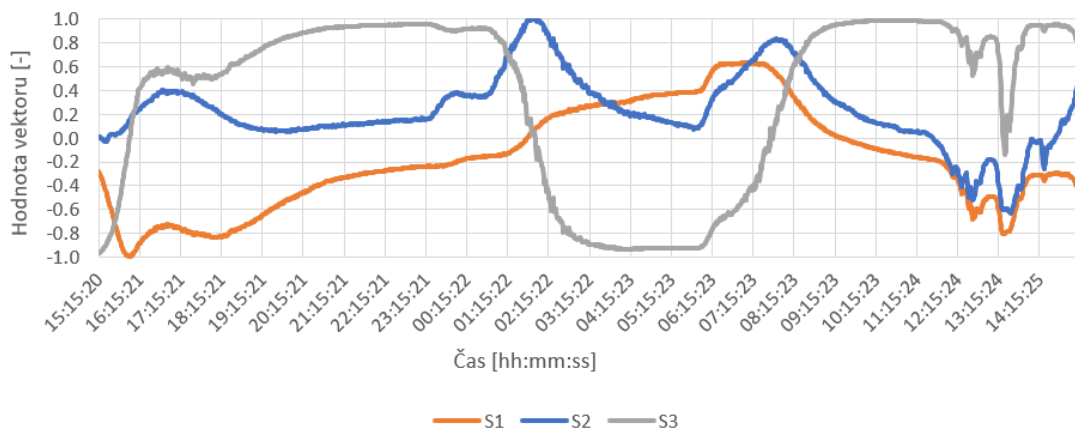


Obr. 4.5: Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 10 km 2 hod

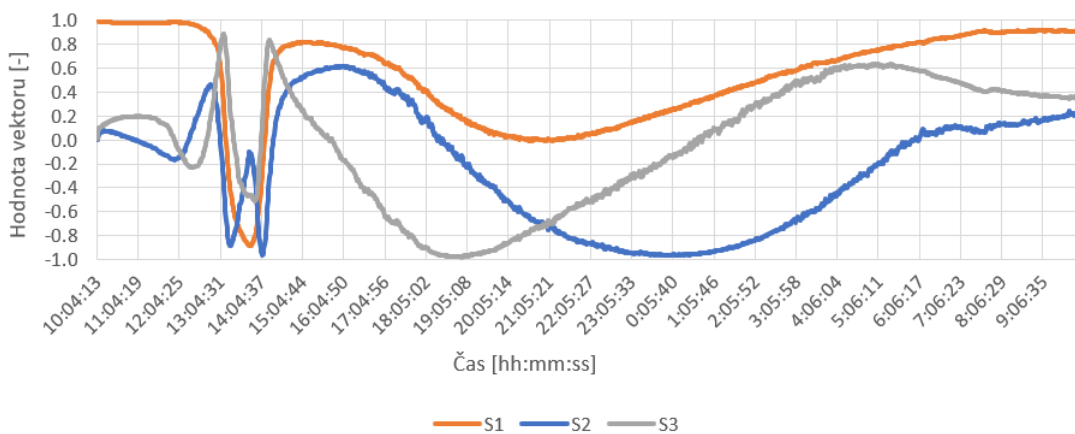
Dále můžeme z grafu vyčíst polarizaci vstupního signálu na základě hodnot jednotlivých vektorů. Jelikož hodnota vektoru  $S_1 \approx 1$  a hodnota  $S_2 \approx S_3 \approx 0$ , můžeme dle tabulky 1.5 říci, že se vstupní signál blíží lineárně horizontálně polarizovanému světlu. Což odpovídá nastavené hodnotě na polarizátoru předřazenému optické trase.

Jak bylo popsáno v předešlé kapitole 4.1.1, další měření probíhalo pro časový horizont 24 hodin s intervaly záznamu po 1 minutě, což je patrné v závislostech 4.6 a 4.7. Jedinou výjimkou je zde měření přímé trasy o délce 10 km, které bylo předčasně přerušeno přibližně po 18 hodinách záznamu, viz. 4.8.

Nejvíce zřetelné jsou zde opakující se výkyvy okolo 13. hodiny odpolední, což je patrné ze dvou grafů 4.6 a 4.7. Měření probíhaly v průběhu pracovního dne, tudíž se zde mohla v tuto dobu pohybovat osoba. Pracoviště však bylo umístěno poblíž okna. Proto je také pravděpodobné, že v tuto dobu zde začal pronikat sluneční svit a tak ohřívat cívku s namotanou trasou.



Obr. 4.6: Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 1 km 24 hod

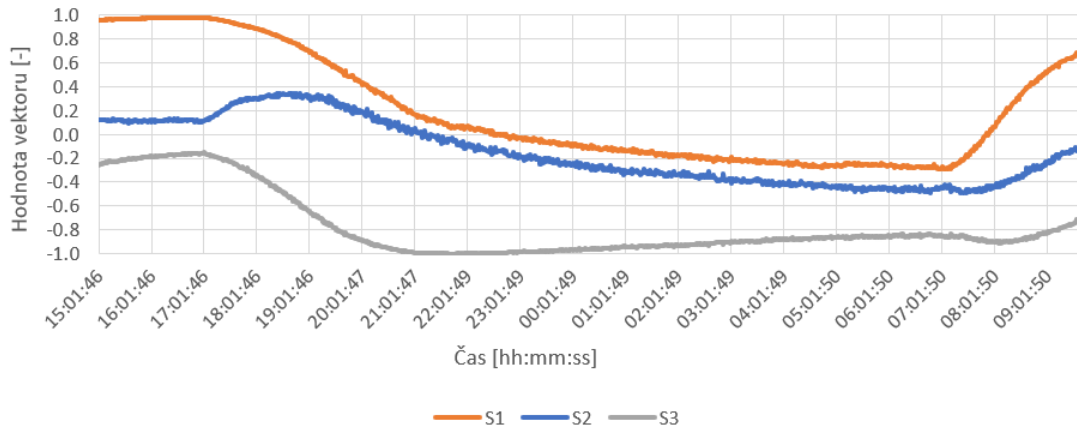


Obr. 4.7: Průběh Stokesových vektorů na přímé trase 40 km 24 hod

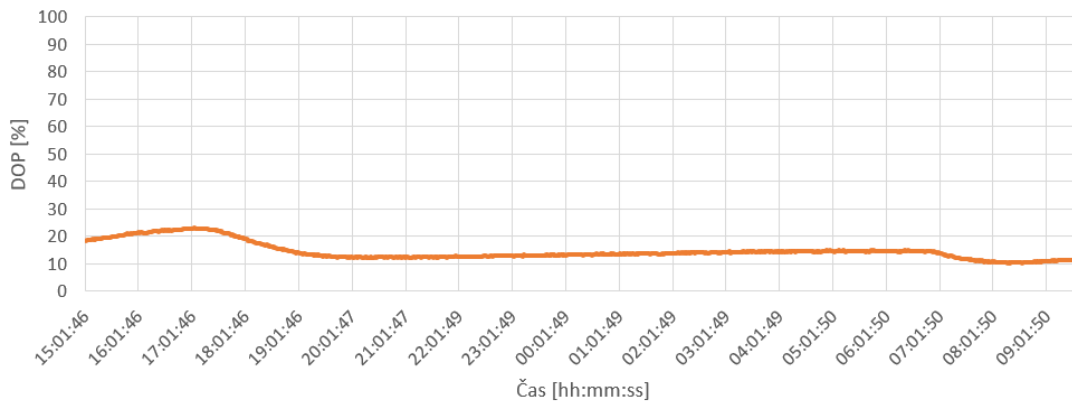
Tyto grafy vykazují u všech třech délkách velmi vysokou citlivost nejen na pohyb osob, ale také na změny teplot v nočních hodinách, kdy pokojová teplota mírně klesala z důvodu nastavené nižší teploty na termostatu topení. Můžeme tedy říci, že všechny trasy, ačkoliv není tento jev příliš žádoucí, jsou také velmi citlivé na změny teploty.

Nedílnou součástí měření bylo však zjištění, zda toto přímé napojení trasy na teplotní sensor bude vhodné, respektive zda bude výstupní signál dostatečně nepolarizovaný, i když laserová dioda vysílá velmi směrové monochromatické koherentní paprsky. Polarizaci signálu tak můžeme pozorovat z grafu 4.9.

V rámci tohoto měření je patrné, že stupeň polarizace se pohybuje v rozmezí 10 až 25%. Mohli bychom tedy říci, že toto přímé zapojení by mohlo být vhodné pro připojení sensorického vlákna. Vzhledem k definici DOP za pomoci Stokesových



Obr. 4.8: Průběh stokesových vektorů na přímé trase 10 km 18 hod



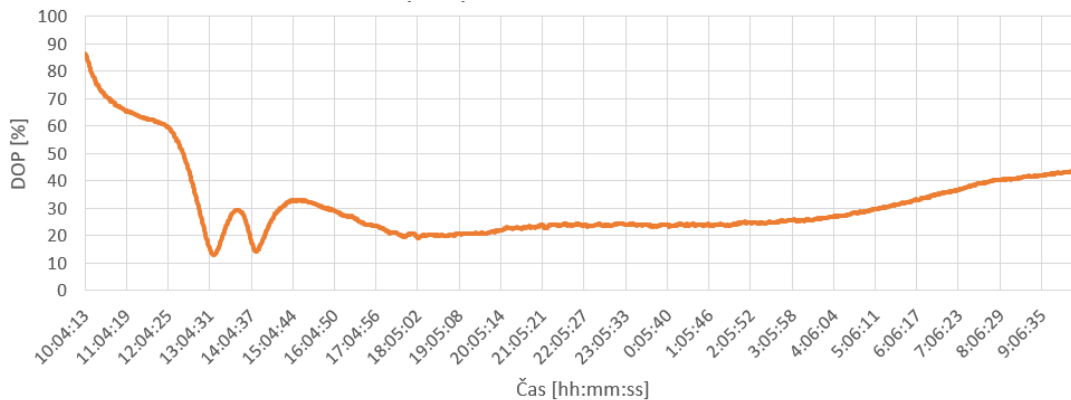
Obr. 4.9: Průběh stupně polarizace na přímé trase 10 km 18 hod

vektorů (viz. kapitola 1.5) je však viditelný podobný trend křivek DOP a Stokesových vektorů. Patrnější je to z grafu 4.10, kdy křivka v čase mezi 13:00 a 15:00 značně kolísá. Tuto oscilaci můžeme vidět také v grafu 4.7.

Naměřené hodnoty stupně polarizace pro trasu 40 km dosahují v průměru vyšších hodnot a nemůžeme je považovat za stálé, tedy vhodnost zapojení přímé trasy na senzorické vlákno není příliš vhodná, avšak stále použitelná.

## 4.2 Měření s lineárním depolarizátorem

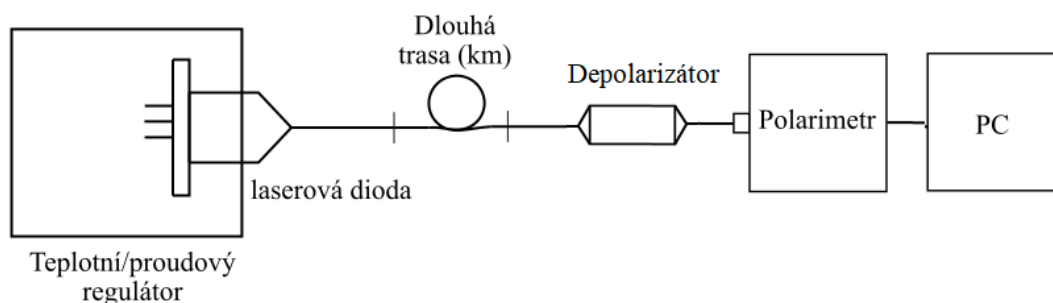
Abychom docílili co nejnižší možné polarizaci světla na vstupu senzorického vlákna, nabízí se zde varianta využití depolarizátoru laserového paprsku, který by byl předřazen tomuto vláknu.



Obr. 4.10: Průběh stupně polarizace na přímé trase 40 km 24 hod

### 4.2.1 Popis měření s optickým depolarizátorem

Pro dané měření bylo využito in-line optického depolarizátoru s modelovým označením OEOFD-100. Jedná se o pasivní součástku, která přeměňuje vstupní polarizované, nebo částečně polarizované světlo na nepolarizované. Provozní vlnová délka tohoto depolarizátoru se pohybuje v rozsahu 300 - 2000 nm, což pro zvolenou vlnovou délku 1550 nm vyhovuje, [15].



Obr. 4.11: Schéma zapojení měření s depolarizátorem

Schéma zapojení 4.11 je obdobné jako v kapitole 4.1. Využívá se stejných prvků - přípravku LPS-1550-FC, obsahující diodu ML925B45F, dále dlouhou trasu jedno-vidového optického vlákna o délce 40 km a k jejich propojení využíváme konektorů FC. Vzhledem k výsledkům předchozího měření na třech různých délkách můžeme říci, že tyto délky nemají příliš velký vliv na výsledné charakteristiky. Z toho důvodu bylo zapojení měřeno na délce 40 km.

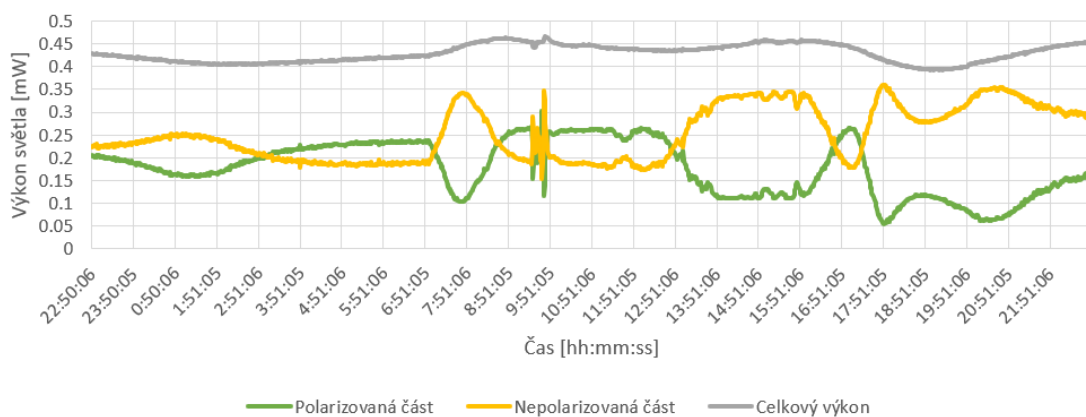
Časový úsek měření byl nastaven na 24 hodin a hodnoty byly zaznamenávány

po 1 minutě. Měření bylo prováděno za pokojové teploty. Pro měření bylo využito vstupního signálu kruhového pravotočivě polarizovaného.

#### 4.2.2 Výsledky měření s optickým depolarizátorem

Výsledky daného měření byly opět uloženy do tabulky v programu excel. Tyto hodnoty byly dále využity pro vygenerování několika grafických průběhů. Tyto průběhy přinášejí nové poznatky především z hlediska výkonu. Po přidání depolarizátoru OEOFD-100 je z grafu 4.12 patrné ovlivnění výkonu, které v průběhu času mírně kolísá.

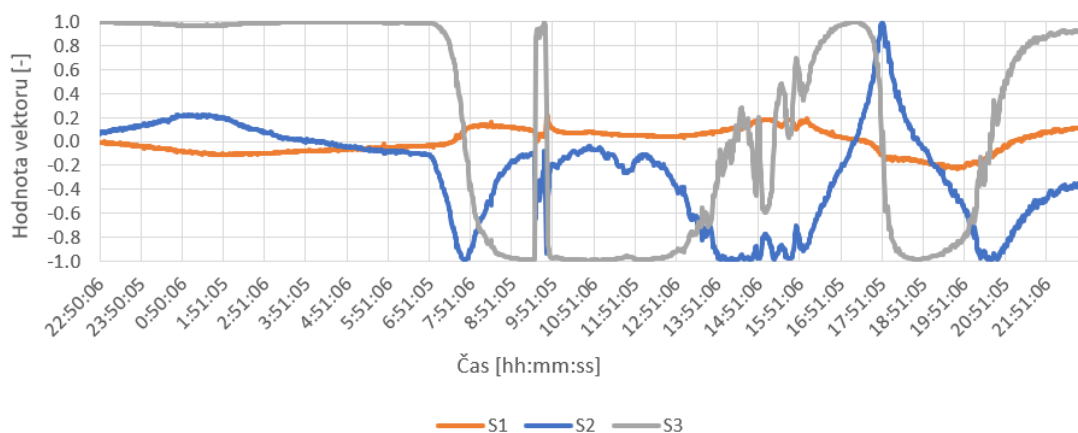
Jedním z důvodů, proč nastává změna celkového výkonu paprsku, může být ten, že nemusí nedocházet k totálnímu odrazu mezi pláštěm a jádrem a některé vidy se tak mohou ztrácet. Není jisté, zda daná nestabilita výkonu je způsobena právě díky tomu, nebo je to dáno vybraným depolarizátorem, případně vybraným typem polarizace vstupního signálu, nicméně je patrné, že polarizovaná a nepolarizovaná část již není přesně zrcadlena, nýbrž jejich posun vůči sobě se v průběhu času mění. To má za následek ovlivnění výstupního celkového výkonu.



Obr. 4.12: Průběh výkonu na trase 40 km s depolarizátorem 24 hod

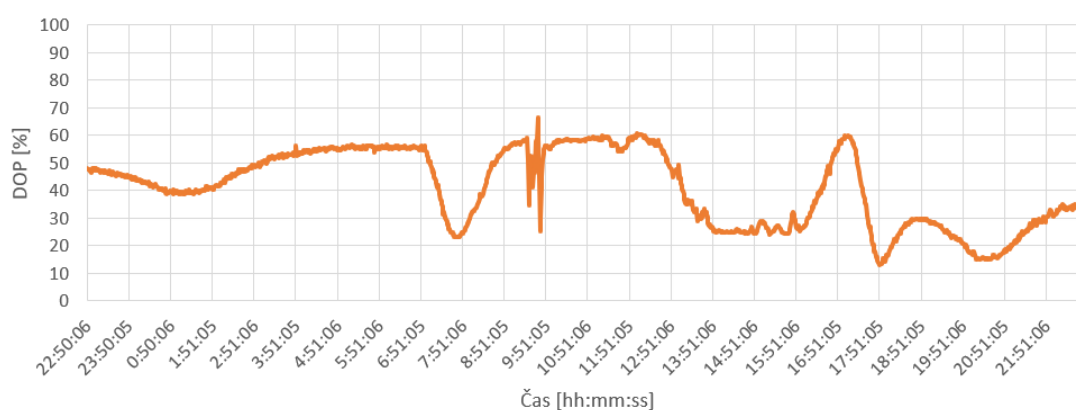
Také v případě průběhu Stokesových vektorů, zobrazených v grafu 4.13 vidíme od 8:00 hodin prudké výkyvy. Tyto změny mohou být způsobeny jako u předchozích měření pohybem osoby v místnosti, avšak tyto změny se zdají příliš prudké. Velmi patrný je zde skokový nárůst vektoru  $S_3$  v čase přibližně 9:50.

Podobná situace je patrná také v čase 17:50, kdy vektory  $S_2$  a  $S_3$  začnou prudce klesat. Otázkou zůstává, zda se jednalo o fyzickou manipulaci s vláknem, prudkou změnou teploty, nebo o samovolnou reakci změny stavu polarizace díky přidání depolarizátoru.



Obr. 4.13: Průběh stokesových vektorů na trase 40 km s depolarizátorem 24 hod

Prudké změny jsou také viditelné na průběhu stupně polarizace, která je dle vzorce 1.15 závislá na daných vektorech. Z toho důvodu vidíme v grafu 4.14 ve výše zmíněných časech tyto oscilace taktéž.



Obr. 4.14: Průběh stupně polarizace na trase 40 km s depolarizátorem 24 hod

Důležitější informaci z daného grafu nám však dává úroveň dané polarizace, která není nižší oproti předchozím měření, jak bylo původně předpokládáno. Při porovnání s výsledným průběhem stupně polarizace na trase bez přidaného depolarizátoru (4.10) je viditelné, že průměrná hodnota DOP s depolarizátorem je o 10% vyšší, než bez depolarizátoru. Na základě tohoto faktu byl důkladně prozkoumán princip, jakým způsobem tento prvek depolarizuje světlo.

Depolarizátor OEOFD-100 pracuje na Lyotovu principu. Tento princip funguje na základě dvou vlnových desek jejichž poměr tloušťky je 2:1. Jsou umístěny tak, aby jejich optické osy byly orientovány  $45^\circ$  od sebe a vytvářely tak různé stupně

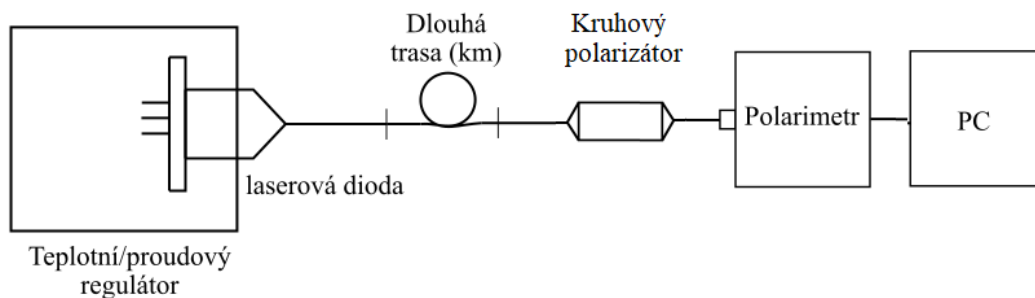
elipticky a lineárně polarizovaného světla. Tím se docílí eliminace polarizovaného vstupního paprsku. Lyotův depolarizátor pracuje nejefektivněji v silně rozbíhavých svazcích a v případě monochromatického koherentního světla tento depolarizátor není schopen paprsek depolarizovat. Vzhledem k využití laserové diody, která vysílá velmi koherentní monochromatické světlo je tak daný typ depolarizátoru nepoužitelný.

## 4.3 Měření s kruhovým polarizátorem

Další vhodnou metodou, která se nabízela jako potenciální, bylo využití kruhově polarizovaného světla jako vstupní signál na teplotní senzor. Tato metoda vychází z předchozí kapitoly 4.2, kdy do depolarizátoru byl přiveden kruhově polarizovaný světelný paprsek, který měl být dále depolarizován.

### 4.3.1 Popis měření s kruhovým polarizátorem

Průběh měření odpovídá předchozím předchozím kapitolám, tedy veškeré prvky pracoviště jsou uzpůsobeny pro práci na vlnových délkách 1550 nm. Zapojení vychází taktéž z předchozích měření, tedy ze zdroje světla LPS-1550-FC je vyvedené optické vlákno napojené pomocí FC konektorů na polarizátor, který je dále propojen s optickou trasou o délce 1 km. Tato trasa je dále připojena na kruhový polarizátor, měnící lineární polarizaci na kruhovou.



Obr. 4.15: Schéma zapojení měření s kruhovým polarizátorem

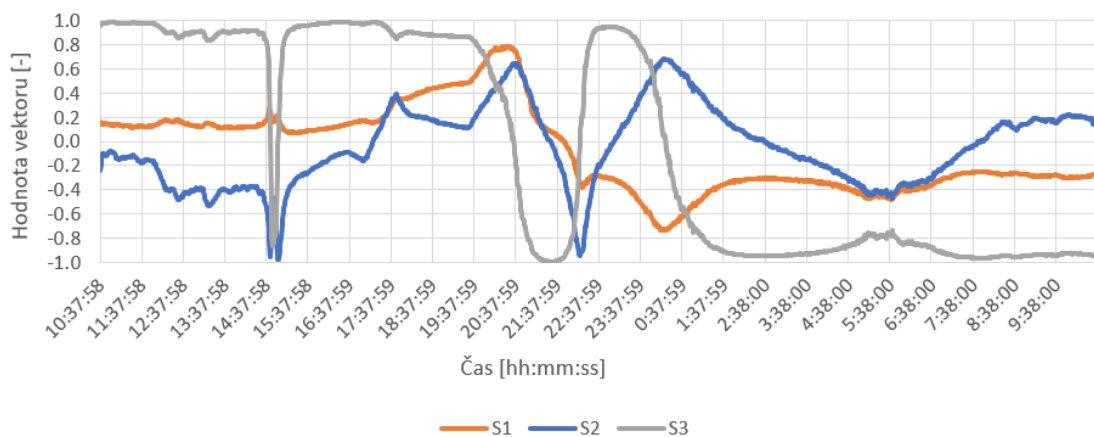
Důvod takového zapojení namísto využití kruhové polarizace již na vstupu optické trasy je její nestabilita. Jednovidové SM vlákno tuto polarizaci nedokáže zachovat, čímž se stává nedokonalou. Proto se po dané trase šíří lineárně polarizované světlo. To se z naměřených výsledků měření přímé trasy zdá být stabilnější, to znamená, že nedochází k tak významné depolarizaci na trase vlákna, jako u kruhové.

Teprve před samotným senzorickým vláknem je daný signál přeměněn na kruhově polarizován. Tím docílíme co nejpřesnější kruhové polarizace vstupující do senzorického vlákna.

Měření probíhá v obdobných teplotních podmínkách, tedy okolo 22 °C a délka měření je nastavena na 24 hodin s intervalem záznamu po 1 minutě.

### 4.3.2 Výsledky měření s kruhovým polarizátorem

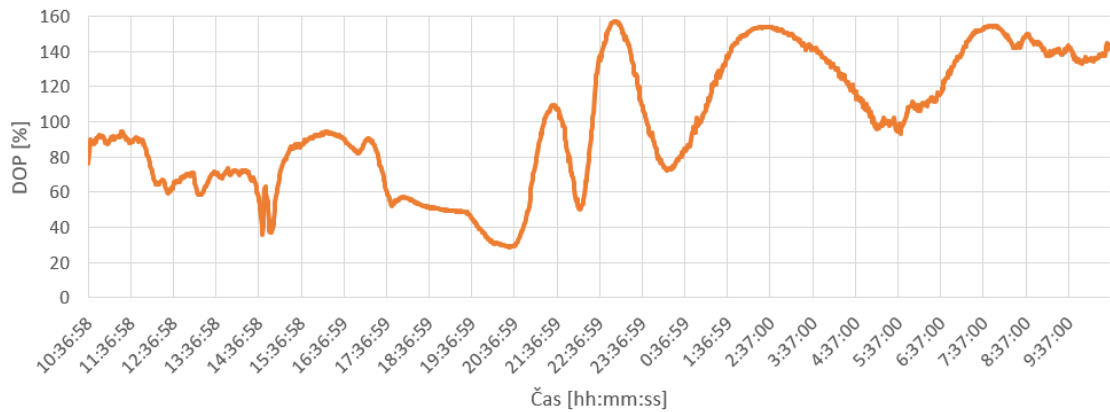
V případě měření za kruhovým polarizátorem vykazuje průběh Stokesových vektorů (4.16) zpočátku pravotočivě kruhovou polarizaci, což dokazuje hodnota vektoru  $S_3$  blížící se jedné, zatímco zbylé vektory se blíží nule.



Obr. 4.16: Průběh Stokesových vektorů na trase 1 km s kruhovým polarizátorem 24 hod

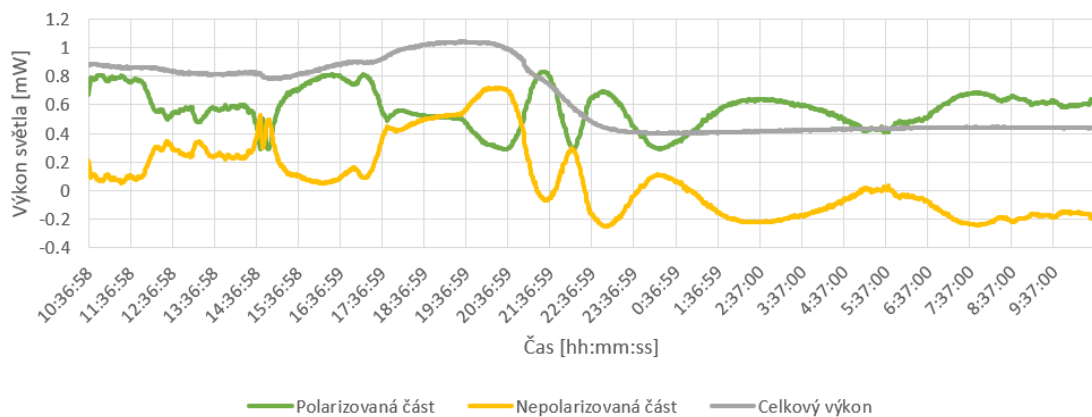
V čase přibližně 14:40 dochází k výraznému stresu vlákna, tedy prudké změně teploty nebo jinému kontaktu s vláknem, avšak tento jev rychle ustává. Tedy je možné, že trasa je s touto metodou více odolná vůči teplotním změnám. Patrnější jsou však změny při večerních hodinách, kdy se v čase přibližně 22:00 hodnoty vektoru  $S_2$  blíží  $-1$  a dochází k zrcadlení průběhu tohoto vektoru. Od tohoto bodu můžeme také vidět postupné ustalování hodnot vektorů do levotočivé kruhové polarizace, což naznačuje hodnota vektoru  $S_3$ , která se ustaluje na záporných hodnotách blížících se  $-1$ , zatímco zbylé dva vektory  $S_1$  a  $S_2$  se blíží nulovým hodnotám.

Při měření s kruhovým polarizátorem došlo k nepřesnému odečtu hodnot. Daný polarimetr byl totiž špatně nakalibrovaný a měření provedl pro vlnovou délku 900 nm. Nemůžeme se tedy dívat na absolutní hodnoty parametrů jako na přesné, nicméně jejich průběhy jsou stále relevantní, protože sledujeme převážně změny těchto hodnot.



Obr. 4.17: Průběh stupně polarizace na trase 1 km s kruhovým polarizátorem 24 hod

Nejvíce patrné je to u závislosti DOP na čase, kdy naměřené hodnoty dosahovaly přes 100 %, což v praxi není možné. Nemůžeme tedy tvrdit, zda tato metoda docílila lepších výsledků, či nikoliv, oproti hodnotám prvního měření. Stupeň polarizace by se měl však pohybovat ve vyšších hodnotách, a to z důvodu, že dané světlo naopak polarizujeme, nikoli depolarizujeme. Při této metodě však cílíme na vytvoření kruhové polarizace, která simuluje, že se polarizace daného světla mění v čase. Je však jasně patrné, že jsou naměřené hodnoty velmi nestabilní a příliš citlivé na změny prostředí. Z toho důvodu můžeme tuto metodu označit za nevhodnou.



Obr. 4.18: Průběh výkonu na trase 1 km s kruhovým polarizátorem 24 hod

Patrný je i z grafu 4.18 pokles výkonu nepolarizované části, kdy hodnoty v čase 21:30 klesly do záporných hodnot. Stále je však patrné zrcadlení hodnot polarizované a nepolarizované části.

## 4.4 Zhodnocení vhodné přívodní trasy

V praktické části byly první metodou, kdy daná trasa neobsahovala žádné přidavné prvky, otestovány jednotlivé délky 1 km, 10 km a 40 km. V první řadě jsme chtěli ověřit, zda daná SM vlákna budou natolik citlivá vůči změně teploty prostředí, aby ovlivnily samotné měření na teplotním senzoru. Toto tvrzení se potvrdilo jako pravdivé, avšak rozdíl mezi jednotlivými délkami se zdál nepatrný. Všechny tyto délky však byly měřeny v laboratorních podmínkách, kdy dané vlákno bylo namotáno na cívce, díky tomu tak vlákno reagovalo na změnu teploty na pracovišti po celé jeho délce.

Jednotlivá měření přímých tras ukázala, že při využití vhodného vlákna, např. dle standardu G.657A [17], kdy útlum takového vlákna při vlnové délce 1550 nm odpovídá 0,30 dB/km, příliš nezávisí v rozsahu 1 až 40 km na jejich délce. Délka vlákna také příliš neovlivnila stupeň polarizace. Z toho důvodu můžeme při dostatečném výkonu laserové diody využít tyto délky bez značných obtíží dle potřeby.

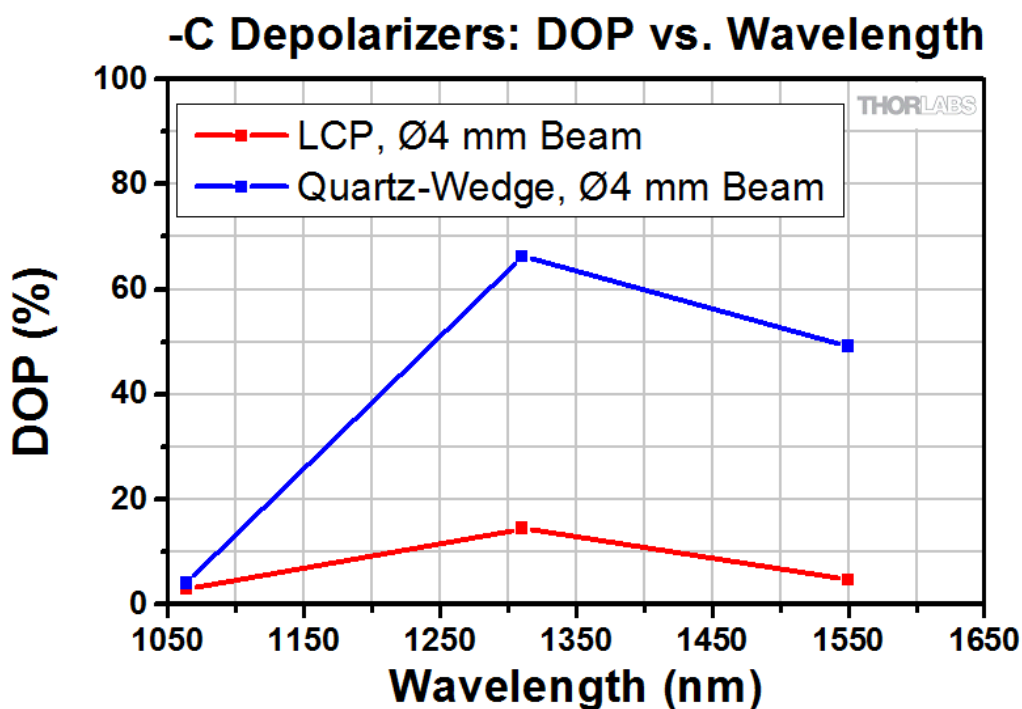
V případě měření přímé trasy jsme docílili v ustáleném stavu poměrně nízkých hodnot stupně polarizace (okolo 20 %), tedy napojení této trasy přímo na optické vlákno se zdá být nejlevnější variantou, která bude bez značných problémů fungovat.

Otestována byla také metoda s depolarizátorem předřazeným teplotně senzorickému vláknu, a to z důvodu ověření, zda nedocílíme lepšího výsledku stupně polarizace, respektive zda toto světlo bude natolik nepolarizované a navíc stabilní, abychom ho využili jako vstupní signál pro daný senzor.

Při využití depolarizátoru se zjistilo, že použitý depolarizátor nebyl vhodný pro depolarizaci signálu vysílaného laserovou diodou a to z důvodu, že tento typ pracuje na Lyotovu principu, který byl popsán na konci kapitoly 4.2.2. Tento typ depolarizátoru tak nebyl schopen depolarizovat monochromatické světlo vyzařované laserovou diodou. Z toho důvodu při použití této metody by bylo zapotřebí využít jiného způsobu depolarizace, respektive vhodnějšího typu depolarizátoru.

Příkladem takového depolarizátoru je typ LCP využívající tekutý krystal, nebo tzv. quartz-wedge depolarizátor. Tyto typy depolarizátorů jsou taktéž porovnávány na webových stránkách firmy Thorlabs, kde LCP dosahuje velmi nízkých hodnot depolarizace při hodnotách vlnové délky 1550 nm, což je patrné z grafu 4.19. Díky depolarizátoru LCP by se tak mohlo docílit nízkého DOP a tím pádem vhodnějšího vstupního signálu pro senzorické vlákno. Důležitým aspektem zde však hraje i cena výsledného systému, tedy při využití depolarizátoru dosáhneme pravděpodobně přesnějšího měření na úkor vyšší pořizovací ceny.

Poslední metoda, popsaná v kapitole 4.3.1, která cílila naopak na využití kruhového polarizátoru jakožto měniče lineárně polarizovaného světla na kruhově polarizované. Na výstupu tohoto polarizátoru, respektive na vstupu senzorického vlákna



Obr. 4.19: Porovnání typů depolarizátoru LCP a Quartz-Wedge [18]

procházely v různém čase paprsky s různou velikostí a směrem vektoru, tedy na vstupu sensorického vlákna bylo docíleno pseudo-náhodného signálu. Tato metoda se však neprokázala jako příliš použitelná z důvodu nestability stupně polarizace. To mohlo být způsobeno právě měnící se lineární polarizací na trase před vstupem do polarizátoru. Možné řešení by bylo využití kruhového polarizátoru již před dlouhou trasou, a to z důvodu větší stability kruhové polarizace oproti lineární.

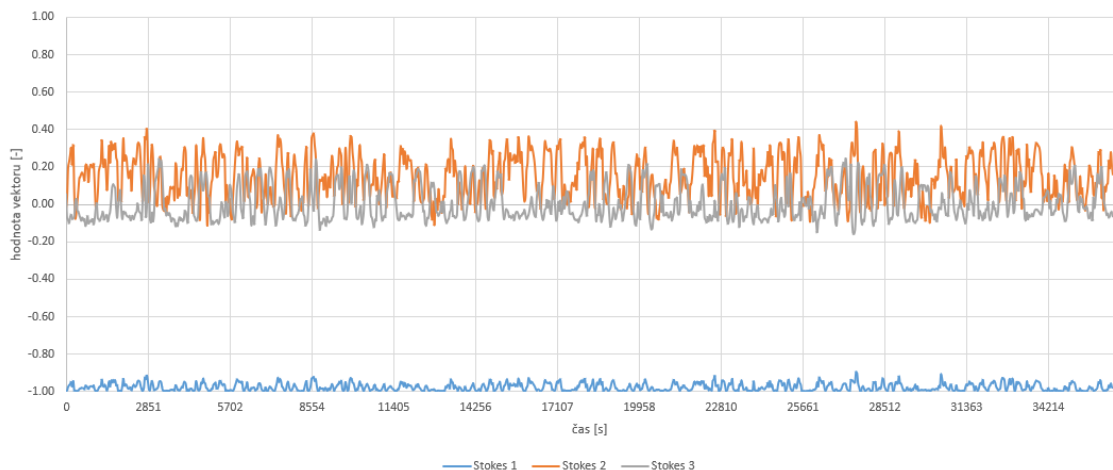
Výsledkem daných měření tedy zůstává, že vstupní signál pro sensorické vlákno můžeme zanechat v podobě, ve které byl vyzářen laserovou diodou. Zaznamenávání teploty sensorickým vláknem bude dostatečně přesné, i přes možné ovlivnění trasou předřazenou tomuto vláknem. Jedná se tedy o nejvhodnější variantu pro mnohá použití jak z důvodu ekonomického, tak praktického.

## 5 PRŮZKUM VÝSLEDKŮ Z REÁLNÝCH TRAS

Tato kapitola se věnuje rozboru výsledků měření reálných optických tras zapojených na území města Brna. Tyto trasy jsou podrobněji popsány níže. Naměřené výsledky byly poskytnuty docentem Martinem Kyselákem, který se podílí na výzkumu senzorických vláken a jejich využití. V rámci této práce tak bylo možné zhodnotit, zda se výsledky výrazně liší oproti laboratorním podmínkám.

### 5.1 Zhodnocení výsledků měřených úseků

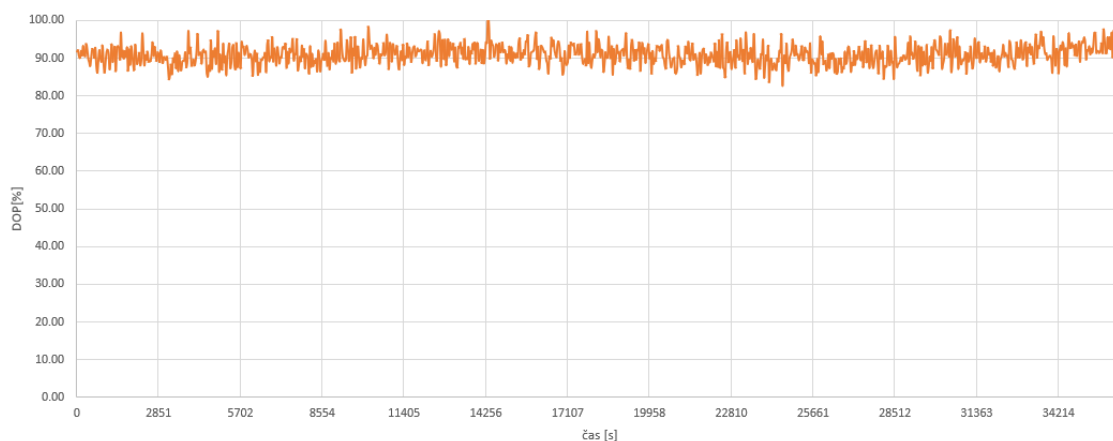
Optický kabel, který je položen mezi budovami Masarykovy univerzity v ulicích Botanická a Lipová, dosahuje délky 6 km. Tato trasa byla využita pro měření úseku oběma směry, tedy výsledné měření bylo provedeno na délce 12 km. Záznam měření byl spuštěn v poledne 11. října 2019 a jeho délka dosahuje necelých 10 hodin. Naměřené hodnoty tedy pokrývají časový horizont nejvyšších denních teplot, dopravní špičku a také večerní hodiny, kdy teplota mírně klesá.



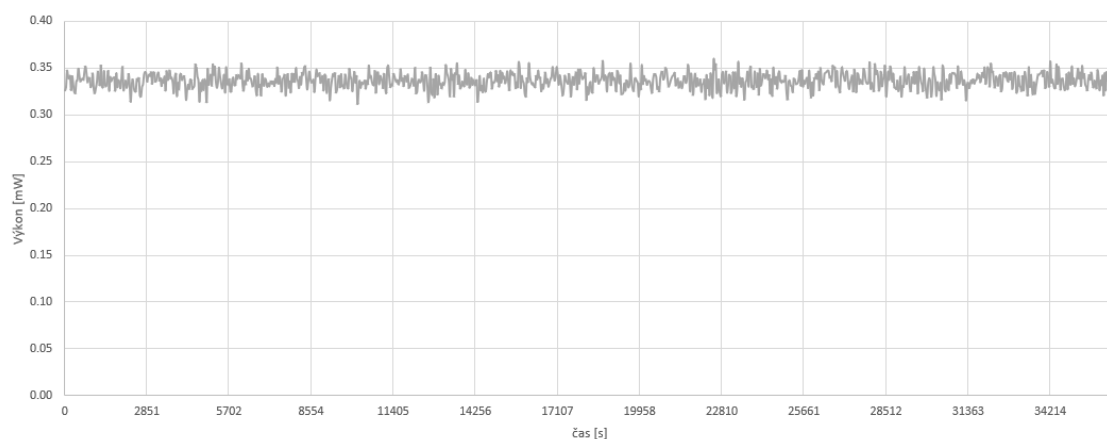
Obr. 5.1: Průběh stokesových vektorů na trase Botanická - Lipová

Naměřené hodnoty Stokesových vektorů udávají, že signál je lineárně vertikálně polarizovaný a tato polarizace se v průběhu času příliš nemění. Za mírné oscilace signálu může mimo jiné pravděpodobně stabilita zdroje, otřesy půdy, do které je vlákno zapuštěno, apod. Je tak patrné, že daný signál není příliš ovlivněn svým okolím a tedy potvrzuje teorii, že se reálná trasa natažená pod zemí může využít pro účely teplotního senzoru.

Stabilitu polarizace také potvrzuje i průběh stupně polarizace 5.2, kdy se daný stupeň polarizace pohybuje v průměrných hodnotách 90%. Přičemž výkon na dané trase je také velmi stabilní, viz 5.3.



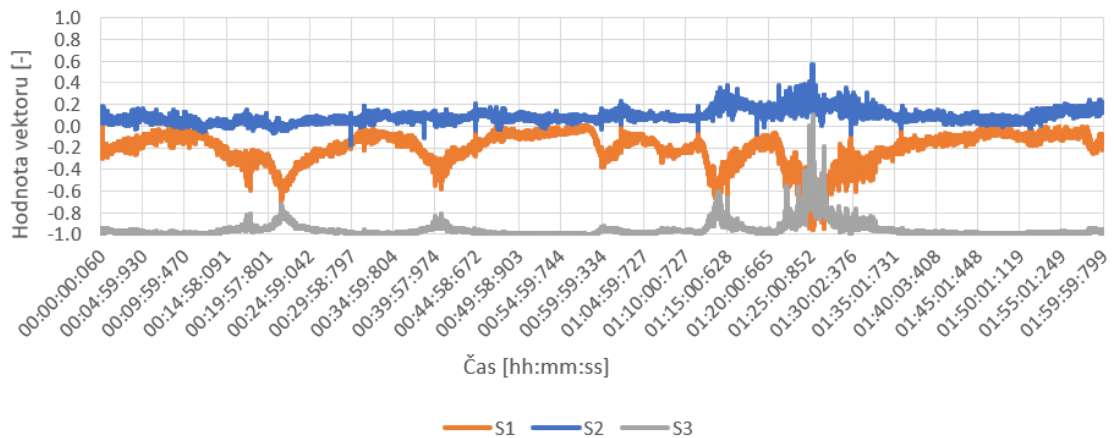
Obr. 5.2: Průběh DOP na trase Botanická - Lipová



Obr. 5.3: Průběh celkového výkonu na trase Botanická - Lipová

V případě využití optického vlákna, na které budou více působit extrémní změny prostředí, respektive daný kabel bude umístěn nad zemí, budou patrné výkyvy Stokesových vektorů, respektive polarizace světelného signálu. Pro ověření, jak moc jsou tyto změny patrné v případě využití reálné trasy, byla zacílena trasa, propojující uzly na ulici Botanická, Lékařskou fakultu MU a Komeční banka na Náměstí Svobody. Tato trasa vede částečně podzemním kabelem v úseku Botanická - Lékařská fakulta MU a dále závěsným optickým kabelem do pobočky KB, tudíž vliv počasí (například povětrnostní podmínky, přímý svit slunce na kabel, změna tlaku, apod.) může mít za následek změnu polarizace světelného paprsku procházejícího optickou trasou.

Záznam měření započal 28. 2. 2020 v 10:17 a doba trvání byla nastavena na 2 hodiny s intervalem záznamu po 50 ms. V daném průběhu 5.4 jsou viditelné opakované mírné výkyvy Stokesových vektorů každých 20 minut. To může být způsobeno nějakou opakovanou aktivitou v okolí vlákna, například průjezd dopravního prostředku. Časové intervaly se však zdají příliš dlouhé a při tak dlouhé trase proto není jisté, o



Obr. 5.4: Průběh vektorů na trase závěsného optického kabelu

jaký externí vliv se může jednat.

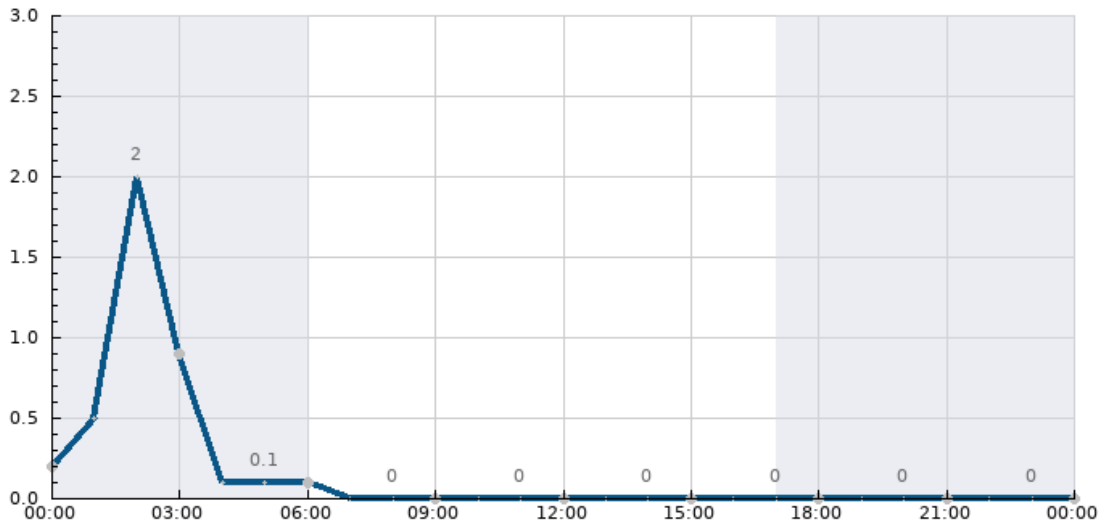
Nejvíce patrná je však prudká změna vektoru  $S_2$  a  $S_3$  po uplynulém čase 1 a půl hodiny od počátku měření. V tomto časovém úseku je patrný značný vliv externích faktorů na dané vlákno.

Pro zjištění, zda dané výkyvy mohla způsobit náhlá změna počasí, byly dohledány údaje z hydrometeorologické stanice umístěné v Brně-Tuřany provozované ČHMÚ. Na základě těchto údajů jsme alespoň schopni odhadnout, zda tento jev způsobily například povětrnostní podmínky, respektive změna ohybu vlákna ve větru, nebo se případně jednalo o prudké dešťové přeháňky či jiné externí vlivy.

Vzhledem ke krátké délce měření 2 hodin byly vyloučeny některé vlivy, jako například změna teploty a tlaku vzduchu, a to z důvodu jejich pomalého růstu, respektive poklesu, tudíž by tento rozdíl nebyl příliš patrný v grafech. Mezi průběhy, které nám však poskytují určitou informaci, můžeme zařadit průběh dešťových přeháněk 5.5. Z daného průběhu je patrné, že v daný den nebyly žádné dešťové přeháňky, tedy tento jev nemohl ovlivnit prudké změny na trase.

Z druhého grafu 5.6 je následně vidět vývin rychlosti větru, kde spojnicový graf udává hodnotu průměrnou rychlost větru změřenou za 10 minut v km/h, zatímco sloupcový graf zobrazuje nárazy větru (zobrazeny jen pokud přesáhnou 40 km/h).

Vzhledem k faktu, že se rychlost větru v průběhu měření začala prudce zvedat, je pravděpodobné, že nám tyto hodnoty dávají informaci o vlivu Stokesových vektorů v průběhu měření. Je tedy patrné, že daný závěsný optický kabel není příliš vhodnou variantou jako přírodní trasa optického signálu k senzorickému vláknu.



Obr. 5.5: Průběh srážek dne 28. 2. 2020 [19]

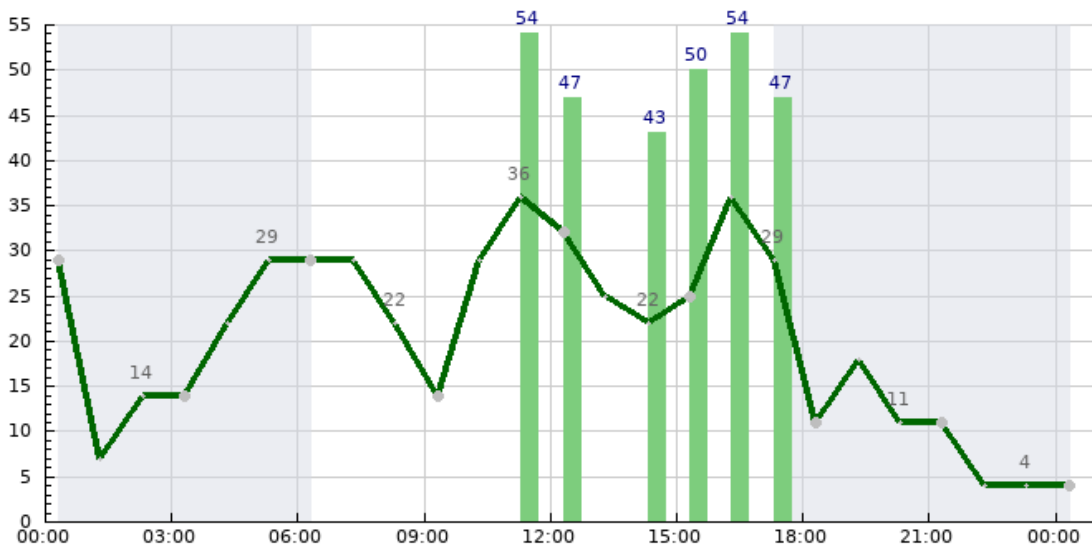
## 5.2 Porovnání výsledků laboratorních měření s reálnou trasou

V rámci laboratorních podmínek bylo dokázáno, že využití dlouhé trasy pro přívod k senzorickému vláknu je použitelný. Nicméně využití reálné trasy nese určitá úskalí, na která jsme narazili i v rámci laboratoře. V kapitole 4.1.2 byly zaznamenané hodnoty při měření přímé trasy ovlivněny pohybující se osobou v okolí vlákna, a zároveň také pravděpodobně ovlivněny slunečním svitem, pronikajícím do místnosti. Tyto výkyvy pak byly umocněny faktem, že měřená trasa je namotaná na kotouči u pracovního stolu.

Pro ověření, zda se tento jev eliminuje, byla zvolena reálná trasa, která se nachází pod zemí, díky čemuž byly eliminovány možné faktory externích vlivů počasí, či zásahu osob. Na základě porovnávaných grafů Stokesových vektorů z kapitol 4.1.2 a 5.1 jsme schopni říct, že v případě využití tras v izolovaných prostorech (ve stěně, případně pod zemí), nebo využití dostatečně silné izolace kabelu tak, aby nedocházelo k ovlivnění dané trasy, můžeme je využít pro měření teploty, případně jiných jevů.

## 5.3 Možnosti aplikace vlákna

Díky objasnění několika možných scénářů, je patrné, že přívod k teplotnímu senzoru musí být ideálně v krytých prostorech. Na základě tohoto faktu se tak nabízí různé aplikace takového senzoru v krytých halách. Příkladem může být nebezpečná zóna, kde dochází s využitím metalických obvodů k riziku jiskření a případnému vznícení



Obr. 5.6: Průběh průměrné rychlosti větru a nárazů větru dne 28. 2. 2020 [20]

hořlavých látek. Konkrétní využití takového senzoru je pak vhodné v muničních skladech, či skladech s hořlavinami. Dále je viditelné potenciální využití ve výrobnách (např. technických plynů), kde se však pravděpodobně nedosáhne tak velkých vzdáleností.

Vzhledem k vlastnostem optického signálu, kdy daný optický signál nemůže být ovlivněn elektrickým signálem, je možné využít vlákno taktéž u silnoproudých obvodů. Příkladem může být kontrola teploty výkonových transformátorů rozveden, kam se běžně pracovník příliš nedostane. Tím docílíme pohodlné a bezpečné kontroly z řídicí místnosti.

## 6 ZÁVĚR

V první části práce jsou popsány teoretické poznatky, potřebné pro pochopení základů šíření světla, vzniku polarizované vlny, zobrazení polarizačních stavů na Poincarého kouli a jejich zápis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů. S tím také souvisí šíření světelného paprsku ve vláknech, které je vysvětleno v navazující kapitole. Velký důraz je kladen především na vysvětlení vlastností vláken zachovávajících polarizaci.

V praktické části je nadále popsáno navržené zapojení laboratorního pracoviště využití pro měření změny polarizace na základě změny teploty. Toto pracoviště je na základě výběru patřičných komponent zakresleno do schématu, přičemž tyto komponenty jsou dále podrobně popsány. V rámci práce se však měření zaměřují na část předřazenou sensorickému vláknu, tedy na přívod vhodného vstupního signálu na dané sensorické vlákno. Vhodnost daných komponent se tak zjistilo v následujících měření, která byla provedena při různých délkách přívodního vlákna k senzoru.

V rámci laboratorních měření se sledovaly průběhy nelineárních parametrů SM vláken o délkách 1 km, 10 km a 40 km. Výhodou daného zapojení bylo připojení daného měření na počítač, do kterého byly zapisovány hodnoty dlouhých měření, trvajících ve většině 24 hodin. Díky tomu jsme byli schopni zaznamenat změny polarizace pomocí polarimetru do tabulek, na základě kterých byly vygenerovány průběhy jednotlivých parametrů. Tyto parametry byly dále porovnány mezi zvolenými metodami, na základě kterých byla vybrána nejvhodnější přívodní trasa k sensorickému vláknu. Tou se osvědčila metoda přímého napojení laserové diody přes dlouhou trasu, až do ověřené délky do 40 km, do sensorického vlákna. Vhodnost této trasy reflektují především dostatečné podmínky pro funkčnost sensorického vlákna společně s cenovou relací.

V práci je dále obsaženo vyhodnocení dostupných měření z reálných optických tras, probíhajících v období na přelomu let 2019 a 2020 na území města Brna. Tato část se tak zaměřuje na porovnání parametrů reálných tras s výsledky z vlastních laboratorních měření.

## LITERATURA

- [1] Radiation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [2001] [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation>
- [2] Wave–particle duality. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wave%E2%80%93particle\\_duality](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave%E2%80%93particle_duality)
- [3] *Odraz světla* [online]. c2019 [cit. 2019-09-23]. Dostupný z WWW: <[https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Odraz\\_sv%C4%9Btla&oldid=421857](https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Odraz_sv%C4%9Btla&oldid=421857)>
- [4] Polarizace odrazem a lomem. *Encyklopedie fyziky* [online]. Reichl, ©2006-2019 [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/463-polarizace-odrazem-a-lodem>
- [5] Polarizace světla. *ELUC* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1700>
- [6] GOLDSTEIN, Dennis H. *Polarized light*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. ISBN 978-1439830406.
- [7] The polarization ellipse. *Natural Resources Canada* [online]. 2016 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9575>
- [8] COLLETT, Edward. *Polarized light in fiber optics*. Lincroft, N.J.: PolaWave Group, c2003. ISBN 0-9677167-1-3.
- [9] COLLETT, Edward. *Field guide to polarization*. 2nd ed. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2005. SPIE field guides, FG05. ISBN 0-8194-5868-6.
- [10] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [11] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Fundamentals of photonics*. New York: Wiley, c1991. ISBN 0-471-83965-5.
- [12] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 6th ed. New York: Pergamon Press, c1980. ISBN 0-08-026482-4.

- [13] CHEN, Chin-Lin. *Foundations for guided-wave optics*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007. ISBN 978-0-471-75687-3.
- [14] *Thorlabs* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com>
- [15] O/E Land Inc., *Optical Fiber Depolarizer* [online]. [cit. 2020-4-16]. Dostupné z: <http://www.o-eland.com/passive/other/Depolarizer.pdf>
- [16] PAX1000x\_GUI. In: *Thorlabs: Polarimeter Systems with High Dynamic Range* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/images/tabImages/PAX1000x\\_GUI\\_MainScreen\\_A1-780.jpg](https://www.thorlabs.com/images/tabImages/PAX1000x_GUI_MainScreen_A1-780.jpg)
- [17] ITU-T G.657. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*. 4th ed. Geneva, 2016.
- [18] Depolarizers: DOP vs. Wavelength. In: *Thorlabs: Liquid Crystal Polymer Depolarizers* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/images/tabimages/DPP25-C\\_DOP\\_vs\\_Wavelength\\_780.gif](https://www.thorlabs.com/images/tabimages/DPP25-C_DOP_vs_Wavelength_780.gif)
- [19] In-počasí. *In-počasí* [online]. InMeteo, c2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: [https://www.in-pocasi.cz/archiv/brno/?detailed\\_typ=srazky&historie=2020-02-28&detailed\\_usek=24#daily\\_graph](https://www.in-pocasi.cz/archiv/brno/?detailed_typ=srazky&historie=2020-02-28&detailed_usek=24#daily_graph)
- [20] In-počasí. *In-počasí* [online]. InMeteo, c2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: [https://www.in-pocasi.cz/archiv/brno/?detailed\\_typ=vitr\\_naraz&historie=2020-02-28&detailed\\_usek=24#daily\\_graph](https://www.in-pocasi.cz/archiv/brno/?detailed_typ=vitr_naraz&historie=2020-02-28&detailed_usek=24#daily_graph)

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DOP	Degree of Polarization
CERN	European Organization for Nuclear Research
PM	Polarization-Maintaining
DPS	Degenerované polarizační stavy
LHP	Lineárně horizontálně polarizované
LVP	Lineárně vertikálně polarizované
LCP	Levotočivě kruhově polarizované
RCP	Pravotočivě kruhově polarizované
HB	High birefringence
$S_0$	První Stokesův parametr
$S_1$	Druhý Stokesův parametr
$S_2$	Třetí Stokesův parametr
$S_3$	Čtvrtý Stokesův parametr
MU	Masarykova univerzita
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
KB	Komerční banka