

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách

Kateřina Masopustová

Vedoucí práce: doc. Ing., Ph.D. Václav Prajzler
Leden 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Masopustová** Jméno: **Kateřina** Osobní číslo: **459163**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Fotonika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách

Název diplomové práce anglicky:

Measurement of the properties of optical fibers and cables for possible use in harsh environments

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy vedení světla v optických vláknových vlnovodech.
- 2) Seznamte se s konstrukcemi optických kabelů.
- 3) Podílejte se na testování vlastností optických vláken a kabelů vystavených gama záření.
- 4) Změřte optický útlum optických vláken a kabelů přímou metodou.
- 5) Dosažené výsledky shrňte do zprávy v rozsahu do 60 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. L. Boháč, M. Lucky: Optické komunikační systémy, skripta ČVUT 2010.
3. M. Filka, Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno 2009. ISBN: 978-80-86785-14-1.
4. C. DeCusatis, Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking. Burlington: Elsevier, 2008. ISBN: 978-0-12-374216-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.09.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Poděkování

Především bych ráda poděkovala vedoucímu práce, doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky k práci a za čas, který mi věnoval při konzultacích a realizaci praktické části práce. Dále děkuji Ing. Jiřímu Štefloví řediteli společnosti OPTOKON a.s. za technickou podporu, Jiřímu Helánovi vedoucímu technologovi z firmy OPTOKON Kable s.r.o. za výrobu a poskytnutí testovacích optických vláken a kabelů. Dále bych chtěla poděkovat vedoucímu oddělení Radiační chemie a kvalifikace na prostředí Ing. Vítu Plačkovi (ÚJV Řež, a. s.) za umožnění provedení testů pomocí gama ozařování v ozařovnách ROZA, PRAZDROJ a PANOZA. Chtěla bych také poděkovat technickému personálu Ing. Martinu Cabalkovi, Ing. Zuzaně Šaršounové a Ing. Martinu Havránkovi za technickou pomoc při prováděných experimentech na pracovišti ÚJV Řež, a. s.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 4. ledna 2022

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá měřením vlastností optických vláken a kabelů ozářených různými dávkami gama záření. Celkem bylo uskutečněno pět různých experimentů, při nichž byly testovány tři typy optických kabelů a dva typy plastových optických vláken. Prvním typem byl kabel označený jako CTDS, který obsahoval 3 různá mnohavidová vlákna a 5 různých jednovidových vláken. Stejně složení měl i druhý testovací optický kabel CTFS, který byl vyroben za pomoci gelového materiálu. Posledním typem byl optický kabel OPK se 3 různými typy jednovidových vláken a jedním mnohavidovým optickým vláknem. Prvním ozařovaným typem vlákna bylo plastové vlákno s jedním jádrem a průměrem 1 mm, druhý typ plastového vlákna obsahoval 7 jader o průměru 250 μm . Optické kabely CTDS a CTFS byly ozařovány celkovými dávkami gama záření 10,1 kGy a 65,5 kGy v ozařovacích komorách ROZA (vysoká dávka gama záření po kratší čas). Optický kabel OPK byl ozařován dávkou gama záření 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ. Plastová optická vlákna byla ozařována spolu s optickými kabely ve stejných ozařovacích komorách na stejné ozařovací dávky. Dále byla plastová optická vlákna použita v experimentu pomalého ozařování v ozařovací komoře PANOZA. Všechna ozařování a měření optických útlumů vláken a kabelů probíhalo během ozařování (s výjimkou ozařování v komoře PANOZA, během kterého měření neprobíhalo) na pracovišti ÚJV Řež a.s. Po ukončení ozařování měření pokračovalo v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky, Fakulty elektrotechnické, ČVUT v Praze. Optický útlum mnohavidových vláken byl měřen na vlnových délkách 850 nm a 1300 nm, jednovidových vláken na vlnových délkách 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm a plastových vláken na vlnových délkách 535 nm a 650 nm. Dále byly měřeny

spektrální charakteristiky optických vláken a kabelů a tyto charakteristiky byly porovnány před a po ozáření. Cílem práce bylo pozorování změny optických vlastností vláken měnících se v závislosti na délce a dávce gama záření.

Výsledkem práce bylo vyhodnocení naměřených optických útlumů a spektrálních charakteristik, zhodnocení a porovnání výsledků v rámci testovaných optických kabelů a vláken.

Klíčová slova: Optická vlákna, optické kabely, plastová optická vlákna, gama záření, optický útlum, spektrální charakteristiky

Vedoucí práce: doc. Ing., Ph.D. Václav Prajzler
FEL ČVUT,
Technická 2,
116 27 Praha 6,
vaclav.prajzler@fel.cvut.cz

Abstract

The diploma thesis deals with measuring the properties of optical fibers and cables irradiated with different doses of gamma radiation. A total of five different experiments were performed, in which three types of optical cables and two types of plastic optical fibers were tested. The first type was a cable called CTDS, which contained 3 different multimode fibers and 5 different singlemode fibers. The second CTFS test optical cable, which was made with gel material, had the same composition. The last type was an OPK optical cable with 3 different types of single-mode fibers and one multimode optical fiber. The first type of fiber irradiated was a plastic fiber with one core and a diameter of 1 mm, the second type of plastic fiber contained 7 cores with a diameter of 250 μm . CTDS and CTFS optical cables were irradiated with total gamma radiation doses of 10.1 kGy and 65.5 kGy in ROZA irradiation chambers (high gamma radiation dose for a shorter time). The OPK optical cable was irradiated with a dose of gamma radiation of 51.3 kGy in the PRAZDROJ irradiation chamber. The plastic optical fibers were irradiated together with the optical cables in the same irradiation facilities for the same irradiation doses. Furthermore, plastic optical fibers were used in a slow irradiation experiment in the PANOZA irradiation chamber. All irradiation and measurement of optical attenuation of fibers and cables took place during irradiation (with the exception of irradiation in the PANOZA chamber, during which the measurement did not take place) at ÚJV Řež a.s. After the irradiation, the measurements continued in the PLANIO laboratory at the Department of Microelectronics, Faculty of Electrical Engineering, CTU in Prague. Optical attenuation of multimode fibers was measured at 850 nm and 1300 nm, single mode fibers at

1310 nm, 1490 nm, 1550 nm and 1625 nm and plastic fibers at 535 nm and 650 nm. The spectral characteristics of optical fibers and cables were further measured and compared before and after irradiation. The aim of the work was to observe the change in optical properties of fibers changing depending on the length and dose of gamma radiation.

The result of the work was the evaluation of the measured optical attenuations and spectral characteristics, evaluation and comparison of the results within the tested optical cables and fibers.

Keywords: Optical fibers, optical cables, plastic optical fibre, gamma radiation, optical attenuation, spectral characteristics

Title translation: Measurement of the properties of optical fibers and cables for possible use in harsh environments

Obsah

1 Úvod	1
2 Teoretická část	3
2.1 Optická vlákna	3
2.2 Optické kabely	3
2.3 Gama záření a jeho vliv na optická vlákna a kabely	5
2.4 Vlastnosti optických vláken	7
3 Popis optických vláken a kabelů	11
3.1 Plastová optická vlákna	11
3.2 Skleněná optická vlákna	12
3.3 Optický kabel OPK	14
3.4 Optické kabely CTDS a CTFS .	15
4 Experiment	17
4.1 Ozařování gama zářením	17
4.2 Vlastní experimenty	19
5 Měřicí metody	21
5.1 Měření optického útlumu plastových optických vláken	21
5.2 Měření optického útlumu kabelů	22
5.3 Měření spektrálních charakteristik	28
6 Výsledky	31
6.1 Vlastnosti optických plastových vláken	31
6.2 Vlastnosti optického kabelu OPK	45
6.3 Vlastnosti optický kabelů CTDS a CTFS	49
7 Závěr	73
Literatura	77
A Tabulky	81

Obrázky

2.1 Struktury 4 základních typů jader optických kabelů: a) trubičková ochrana vláken (Loose Tube Design), b) volný svazek vláken v jedné trubičce (Loose Fiber Bundle), c) pásková struktura vláken v jedné trubičce (Ribbon Design), d) drážková struktura (Buffer Coating) [4].	5
2.2 Schéma přeměny ^{60}Co [7].	6
3.1 Spektrální charakteristiky optického útlu polymerního optického vlákna - PMMA - SI [13].	11
3.2 Spektrální útlumová charakteristika optického křemenného vlákna [18].	13
3.3 Struktura taktického kabelu OPK.	15
3.4 Schéma optického kabelu CTDS.	16
4.1 Fotografie ozařovacích komor a) vlevo ROZA, vpravo PRAZDROJ, b) pohled do ozařovací komory PRAZDROJ.	17
4.2 Fotografie ozařovací komory PANOZA a) uzavřená ozařovací komora b) pohled na upevněné optické vlákna v ozařovně PANOZA (Panoramatický ozařovač).	18
5.1 Schéma měření vlastností optického útlu vláken POF s průměrem 1 mm a POF se sedmi jádry s průměrem $250\ \mu\text{m}$ pomocí měřicího přístroje OFT-820-POF značky OPTOKON a) nastavení reference (uložení měřeného optického výkonu referenčního vlákna) na vlnových délkách 535 nm nebo 650 nm, b) měření optického výkonu vlákna na vlnové délce 650 nm, c) měření optického útlu vlákna v ozařovacích komorách ROZA a PRAZDROJ a během relaxace na vlnové délce 650 nm, d) měření optického útlu vlákna během relaxace po ozáření v komoře PANOZA na vlnových délkách 535 nm nebo 650 nm.	22
5.2 Schéma zapojení pro měření MM vláken při prvním experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $10,1 \pm 1,2\ \text{kGy}$ za použití měřicího přístroje OPTOKON OFT-820 a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.	23
5.3 Schéma zapojení pro měření SM vláken při prvním experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $10,1 \pm 1,2\ \text{kGy}$ (27.5.2019) za použití měřicího přístroje Insertion & Reflection Loss Meter JCIRL-300 s detektorem Jericore a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.	24
5.4 Schéma zapojení pro měření SM vláken při druhém experimentu - ozařování optického kabelu OPK dávkou $51,3 \pm 1,7\ \text{kGy}$ (9.9.2019) za použití zdroje optického záření OPTOKON LS800, optické rozbočnice 1x4 a detektoru PM4212 a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.	25

5.5 Schéma zapojení pro měření MM vláken při druhém experimentu - ozařování optického kabelu OPK dávkou $51,3 \pm 1,7$ kGy (9.9.2019) za použití měřicího přístroje OPTOKON OFT-820 a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.	25
5.6 Schéma zapojení pro měření MM vláken při třetím experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $65,5 \pm 7,4$ kGy pomocí měřících přístrojů OPTOKON OFT 4212 a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.	26
5.7 Schéma zapojení pro měření SM vláken při třetím experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $65,5 \pm 7,4$ kGy pomocí měřících přístrojů OPTOKON OFT 4212 a) provedení kalibrace, b) vlastní měření žil D,E,F b) měření žil G, H.	27
5.8 Měření spektrálních charakteristik POF vláken pomocí analyzátoru a) USB Ocean Optics 2000, b) Yokogawa AQ6370C.	28
5.9 Měření spektrálních charakteristik optických kabelů pomocí spektrálního analyzátoru Yokogawa AQ6370C a) měření vláken MM, b) měření vláken SM.	29
6.1 Závislost optického útlumu měřeného na vlnové délce 650 nm pro vlákno POF s průměrem jádra 1 mm o délce 5 m a 10 m a) na délce a dávce gama ozáření, b) na délce relaxace po ozáření. (* Měření před začátkem ozáření měřeno na ČVUT, ** První měření na ÚJV Řež a.s. před začátkem ozařování, *** Poslední měření ÚJV Řež a.s. v okamžiku těsně po ozáření)	32
6.2 Výsledek měření optického útlumu měřeného na vlnové délce 650 nm vlákna POF s jádrem o průměru 1 mm o délce 10 m ozářeného dávkou 51,3 kGy a) během ozáření, b) při relaxaci.	32
6.3 Relaxace POF vláken s průměrem 1 mm po ozařování zdrojem gama záření o dávkách 1,24 kGy, 6,40 kGy, 11,20 kGy a 17,60 kGy v ozařovací komoře PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm. . .	33
6.4 Relaxace POF vláken s průměrem 1 mm po ozařování zdrojem gama záření o dávkách 17,7 kGy, 28,6 kGy, 40,4 kGy, 51,4 kGy a 62,9 kGy v ozařovací komoře PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm. . .	35
6.5 Výsledky měření spektrálních charakteristik vláken POF 1 mm měřeno spektrálním analyzátozem USB Ocean Optics 2000, a) měřeno během ozáření dávkou 10,1 kGy v ozařovací komoře ROZA, b) během relaxace po ozáření dávkou 10,1 kGy v ozařovací komoře ROZA, c) během relaxace po ozáření dávkou 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ, d) měřeno spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření v komoře PANOZA. . . .	36

6.6 Výsledky měření spektrálních charakteristik vláken POF 1 mm měřeno spektrálním analyzátozem USB Ocean Optics 2000 během relaxace po ozáření dávkou gama záření 51,4 kGy v komoře PANOZA, a) vlákno o délce 10 m, b) vlákno o délce 20 m.	37
6.7 Porovnání optických útlumů svazkových optických polymerních vláken 7 x 250 μm během ozáření měřeno na vlnové délce 650 nm a) s maximální dávkou ozáření 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ, b) s maximální dávkou ozáření 65,5 kGy v ozařovací komoře ROZA.	38
6.8 Porovnání optických útlumů svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru 250 μm vystavených gama záření v ozařovacích komorách ROZA (51,3 kGy) a PRAZDROJ (65,5 kGy) při relaxaci, měřeno na vlnové délce 650 nm.	39
6.9 Relaxace svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru 250 μm po ozařování dávkou gama záření 1,24 kGy, 6,40 kGy, 11,20 kGy a 17,60 kGy zdrojem záření PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm. . .	40
6.10 Relaxace svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru 250 μm po ozařování zdrojem záření PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm. . .	41
6.11 Výsledky měření spektrálních charakteristik svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru 250 μm a) ozářeno dávkou 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ a měřeno na spektrálním analyzátozu Ocean Optics, b) ozářeno v komoře PANOZA a měřeno na spektrálním analyzátozu Yokogawa.	42
6.12 Výsledky měření spektrálních charakteristik vláken POF se sedmi jádry o průměru 250 μm měřeno spektrálním analyzátozem USB Ocean Optics 2000 během relaxace po ozáření dávkou gama záření 62,9 kGy v komoře PANOZA, a) vlákno o délce 10 m, b) vlákno o délce 20 m. 43	43
6.13 Výsledky měření přenosové rychlosti optických plastových vláken o délce 10 m, a) referenční měření vláken POF s průměrem 1 mm, b) měření vlákna POF s průměrem 1 mm ozářeného dávkou 51,3 kGy v komoře PRAZDROJ, c) referenční měření vláken POF se sedmi jádry o průměru 250 μm , d) měření vlákna POF se sedmi jádry o průměru 250 μm ozářeného dávkou 51,3 kGy v komoře PRAZDROJ.	44
6.14 Závislost optického útlumu optických vláken v kabelu OPK na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 51,3 kGy pro a) optická vlákna SM - žíly A, B, C, měřeno na vlnové délce 1550 nm, b) pro optické vlákno MM - žíla D měřeno na vlnové délce 850 nm. . .	45
6.15 Závislost optického útlumu na čase během relaxace po ozařování dávkou gama záření 51,3 kGy optického kabelu OPK pro jednovidová optická vlákna SM - A, B, C měřeno na vlnové délce 1550 nm.	46

6.16 Vyhodnocení měření spektrální charakteristiky optického kabelu OPK referenčního a optického kabelu OPK po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy měřeno na spektrálním analyzátoru Yokogawa AQ6370C, a) 2. den po ukončení ozáření, b) 16. den po ukončení ozařování.	48
6.17 Závislost optického útlumu na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 10,1 kGy pro mnohavidová optická vlákna A, B, C a) výsledky pro optický kabel CTFS měřeno na vlnové délce 850 nm, b) výsledky pro optický kabel CTDS měřeno na vlnové délce 1300 nm.	49
6.18 Závislost optického útlumu na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 10,1 kGy pro optické kabely CTDS a CTFS a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm, b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm, c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm, d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm, e) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm, f) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.	51
6.19 Závislost optického útlumu na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy optických kabelů CTDS, CTFS vláken MM - žíly A, B, C a) měřeno na vlnové délce 850 nm, b) měřeno na vlnové délce 1300 nm.	52
6.20 Závislost optického útlumu na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy optických kabelů CTDS a CTFS a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm, b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm, c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm, d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm, e) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm, f) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.	54
6.21 Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy a) vlákno A kabelu CTDS, b) vlákno A kabelu CTFS, c) vlákno C kabelu CTDS, d) vlákno C kabelu CTFS.	58
6.22 Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy a) vlákno D kabelu CTDS, b) vlákno D kabelu CTFS, c) vlákno E kabelu CTDS, d) vlákno E kabelu CTFS, e) vlákno F kabelu CTDS, f) vlákno F kabelu CTFS.	59
6.23 Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy a) vlákno G kabelu CTDS, b) vlákno G kabelu CTFS, c) vlákno H kabelu CTDS, d) vlákno H kabelu CTFS.	60
6.24 Závislost optického útlumu mnohavidových optických vláken na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS vláken MM - žíly A, B, C a) měřeno na vlnové délce 850 nm, b) měřeno na vlnové délce 1300 nm.	61

6.25 Závislost optického útlumu SM optických vláken na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS a) vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm, b) vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm, c) vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1490 nm, d) vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1490 nm.	62	6.29 Závislost optického útlumu jednovidových optických vláken na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm, b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm, c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm, d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.	67
6.26 Závislost optického útlumu SM optických vláken na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS a) vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm, b) vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm, c) vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm, d) vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.	63	6.30 Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C 171. den relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optického kabelu CTDS a) vlákna MM - A, B, C - reference, b) vlákna MM - A, B, C - ozářené, c) vlákna SM - D, E, F, G, H - reference, d) vlákna SM - D, E, F, G, H - ozářené.	71
6.27 Závislost optického útlumu mnohavidových vláken na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS vláken MM - žíly A, B, C a) měřeno na vlnové délce 850 nm, b) měřeno na vlnové délce 1300 nm.	64	6.31 Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C 171. den relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optického kabelu CTFS a) vlákna MM - A, B, C - reference, b) vlákna MM - A, B, C - ozářené, c) vlákna SM - D, E, F, G, H - reference, d) vlákna SM - D, E, F, G, H - ozářené.	72
6.28 Závislost optického útlumu jednovidových optických vláken na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm, b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm, c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1490 nm, d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1490 nm.	66		

Tabulky

3.1 Popis optického kabelu OPK. . .	14
3.2 Popis optických kabelů CTDS a CTFS.	16
4.1 Přehled provedených experimentů na pracovišti ÚJV Řež a.s.	20
6.1 Optické útlumy žil A - D optického kabelu OPK referenčního a optického kabelu OPK ozářeného měřeno 55. den po ukončení ozařování.	47
6.2 Srovnání optických útlumů žil A - C optického kabelu OPK před a po ozáření a po relaxaci pro vlnovou délku 1550 nm.	47
6.3 Referenční měření optického kabelu CTDS před ozářením, měření ozářeného kabelu CTDS 1. den po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTDS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).	55
6.4 Referenční měření optického kabelu CTFS před ozářením, měření ozářeného kabelu CTFS 1. den po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTFS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).	56
6.5 Referenční měření optického kabelu CTDS před ozářením, měření ozářeného kabelu CTDS 1. den po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTDS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).	68
6.6 Referenční měření optického kabelu CTFS před ozářením, měření ozářeného kabelu CTFS 1. den po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTFS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).	69
A.1 Přehled ozařovaných POF vláken.	81
A.2 Přehled ozařovaných optických kabelů.	82
A.3 Termíny prováděných měření optického výkonu vláken POF během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (květen 2019).	82
A.4 Termíny prováděných měření optického výkonu vláken POF během relaxace po ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy (září 2019).	82
A.5 Termíny prováděných měření optického výkonu vláken POF během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy (září 2020).	82
A.6 Termíny prováděných měření optického útlumu optických kabelů CTDS a CTFS během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (květen 2019).	83
A.7 Termíny prováděných měření optického útlumu optického kabelu OPK během relaxace po ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy (září 2019).	83

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
GeO ₂	Oxid germaničitý
GRIN (Gradient Index)	Spojitě proměnný index lomu
ITU (International Telecommunication Union)	Mezinárodní telekomunikační unie
MM (Multimode)	Vícevidové
OM (Optical Multimode)	Optický mnohavidový
OS (Optical Singlemode)	Optický jednovidový
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
PANOZA	Panoramatická ozařovna
PLANIO	Planární optoelektronické a optické integrované struktury
PMMA	Polymethylmethakrylát
POF (Plastic Optical Fibre)	Plastové optické vlákno
SI (Step Index)	Skoková změna indexu lomu
SiO ₂	Oxid křemičitý
SM (Singlemode)	Jednovidové
TPU	Termoplastický polyuretan
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
α	dB/km	Měrný optický útlum
α_A	dB/km	Koeficient absorpce
α_M	dB/km	Koeficient rozptylu na mikroohybech
α_N	dB/km	Koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách
α_0	dB/km	Koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích
α_R	dB/km	Koeficient Rayleigho rozptylu
α_z	dB/km	Koeficient útlumu
λ	nm	Vlnová délka
D	Gy	Dávka záření
E	J	Absorbovaná energie
L	m	Délka optického vlákna
m	kg	Hmotnost
P	dBm	Optický výkon
$T_{1/2}$	rok	Poločas rozpadu
u	dB	Optický útlum
z	m	Souřadnice ve směru osy z

Kapitola 1

Úvod

Moderní optoelektronické komunikační, informační systémy využívají pro přenos informací a dat optická vlákna. Požadavek na stále zvyšující se přenosovou rychlost, vysoké nároky a očekávání vedly k rozvoji v oblasti optických vláknových technologií.

Optická vlákna nachází v dnešní době široké uplatnění v oblasti telekomunikací, kde postupem času nahradila nejprve metalická vedení na dlouhých trasách o stovkách kilometrů až do dnešní doby, kde jsou jimi nahrazovány krátké přenosové trasy jako například v rámci budov nebo datacenter. Optická vlákna disponují velmi nízkými útlumy přenášeného signálu, poskytují vysoké přenosové rychlosti a datové kapacity a v neposlední řadě jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení. Na dlouhé vzdálenosti (až stovky km) jsou využívána skleněná jednořivá optická vlákna, které mají velmi nízký optický útlum (0,2 dB/km). Na krátké vzdálenosti (do 100 m) je možné použít skleněná vlákna mnohářivá nebo plastová vlákna, která mají sice vyšší optický útlum (200 dB/km), ale jsou cenově výhodnější. Plastová optická vlákna mají výhodu ve srovnání se skleněnými optickými v nízké ceně, snadné instalaci a manipulaci [1].

Předložená diplomová práce studuje o možnosti využití optických kabelů a vláken v prostředích s vyšší dávkou gama záření. Příkladem může být kosmický průmysl, využití v medicíně (při sterilizaci chirurgických nástrojů gama zářením) a v jaderných elektrárnách. Na rozdíl od konvenčních vodivých drátů, jsou optická vlákna schopna odolávat vysokým teplotám generovaných v okolí reaktoru. V oblasti záření optické vlákno může fungovat jako senzor detekující gama záření nebo zařízení vysílající telekomunikační informace pod vlivem gama záření.

Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Optická vlákna

Optické vlákno je struktura schopná vést energie optických kmitočtů přivedenou na vstup ve směru osy vlákna na větší vzdálenost [2]. Optické vlákno je jedno z hlavních prvků, který rozhoduje o vlastnostech přenosové komunikační soustavy. Geometrie optických vlnovodů je relativně jednoduchá, avšak analýza šíření signálu vláken je složitější než u metalických kabelů. Samotné šíření signálu v optickém vlnovodu je ovlivňováno mnohem více parametry a vlivy. V optickém vlnovodu se elektromagnetická vlna šíří dielektrickým prostředím. Parametry šíření závisí na vlnové délce a okrajové podmínky na rozhraní dielektrik jsou složitější.

Základními parametry z hlediska komunikační techniky jsou přenosové vlastnosti, které jsou dány optickým útlumem a disperzí. Tyto vlastnosti lze ovlivňovat konstrukčními rozměry vláken, mezi základní patří příčné rozměry a index lomu. Vnitřní oblast vlnovodu, ve které se signál šíří, se nazývá jádro, které je obklopeno jedním nebo několika vrstvami, kterým se říká plášť.

Optický vláknový vlnovod se skokovou změnou indexu lomu je označován jako SI (Step Index) a je tvořen jednou nebo více vrstvami homogenního dielektrika. Jádro i plášť jsou homogenní, ale jádro vlnovodu má vyšší hodnotu indexu lomu než plášťová vrstva. Vlna se v SI vláknech šíří odrazem na rozhraní jádra a pláště. Optické vláknové vlnovody se spojitě proměnným indexem lomu se označují GRIN (Gradient Index) a jádro toho vlnovodu je nehomogenní a elektromagnetická vlna se v GRIN vláknech šíří ohybem.

Vláknové vlnovody rozdělujeme dále na jednovidové (SM - Single Mod) a mnohavidové (MM - Multi Mod). Jednovidová vlákna podporují šíření pouze jednoho vidu, kde vid je definován jako počet možností, jakými se může optický paprsek ve vlákne šířit. V mnohavidových vláknech se předpokládá současné šíření několika set vidů [1], [2].

2.2 Optické kabely

Optický kabel je způsob ochrany jednoho nebo více optických vláken a jeho konstrukce záleží na jeho aplikaci, respektive na prostředí, pro které je optický

kabel určen. Optické kabely nejrůznějších typů musí chránit optické vlákno proti mechanickému poškození a zhoršení přenosových parametrů vnějšími vlivy.

Konstrukce optického kabelu by měla zabránit silovému působení v axiálním i v radiálním směru. K axiálnímu namáhání dochází například při protahování kabelů kabelovými kanály a minimalizuje se silovými prvky, jako kevlarová vlákna nebo speciální dielektrické materiály. Proti namáhání vlákna v radiálním směru musí být kabel i vlákno chráněno dostatečně pevnou konstrukcí vnějšího pláště kabelu. Výhodná je ochrana dvojitým pláštěm s mezivrstvou (tlumící) z poddajného (měkkého) materiálu [1], [2]. Dále by měl být optický kabel chráněn proti přelomení vláken dostatečně tuhým pláštěm tak, aby nemohlo dojít k ohybu s příliš malým poloměrem.

Optický kabel musí být odolný vůči přímému působení chemických látek na vlákno. Přenosové vlastnosti vlákna mohou být zhoršeny i vlhkostí, kdy dochází ke zvýšení koncentrace OH iontů při styku vlákna s vodou. Proto se vlákna při tažení potahují primární ochranou, kterou je plast (epoxiakryláty, etylévinylacetáty, polybutadieny a silikony).

Konstrukce a použité materiály pro optické kabely musí také zajistit odolnost proti vysoké teplotě a ohni [3].

Podle konstrukce lze kabely rozdělit na [2]:

- kabely jednovláknové a vícevláknové,
- s volnou a pevnou ochranou vlákna,
- se středním nebo vnějším silovým prvkem,
- s kruhovou nebo pásovou geometrií.

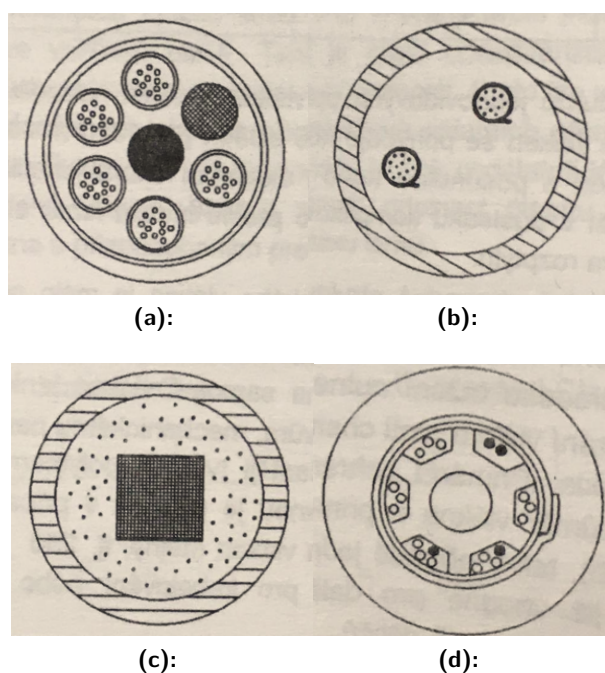
Vlhkostní ochranu většinou zajišťuje pásek ovinutý kolem vnitřní struktury kabelu. Jeho úkolem je zamezit vniknutí vlhkosti dovnitř kabelu. K dalšímu zamezení namáhání vláken slouží ochranné trubičky. K tomu také slouží gel, jehož další funkcí je zamezení lámání vláken. Optická vlákna tvoří vlastní komunikační prostředek, který je potřeba chránit výše popsánymi prostředky (aramidová vlákna (kevlar), pásek ovinutý kolem vnitřní struktury, ochranné trubičky, gel)[4].

Na obrázku 2.1 jsou zobrazeny 4 základní typy jader optických kabelů:

- a) trubičková ochrana vláken (Loose Tube Design),
- b) volný svazek vláken v jedné trubičce (Loose Fiber Bundle),
- c) pásková struktura vláken v jedné trubičce (Ribbon Design),
- d) drážková struktura (Buffer Coating).

V jádře s trubičkovou ochranou vláken jsou optická vlákna volně uložena v trubičkách s vnějším průměrem přibližně od 2 do 4 mm. V každé trubičce může být uloženo až 12 vláken. Trubičky jsou symetricky uspořádány kolem centrálního členu, který plní i funkci tahového členu.

V jádře s volným svazkem vláken jsou všechna vlákna volně uložena v jediné centrální trubičce, jejíž průměr se zpravidla pohybuje kolem 10 mm. Vlákna jsou v trubičce uspořádána do svazků, které jsou drženy pohromadě barevně značenou primární a sekundární ochranou.



Obrázek 2.1: Struktury 4 základních typů jader optických kabelů: a) trubičková ochrana vláken (Loose Tube Design), b) volný svazek vláken v jedné trubičce (Loose Fiber Bundle), c) pásková struktura vláken v jedné trubičce (Ribbon Design), d) drážková struktura (Buffer Coating) [4].

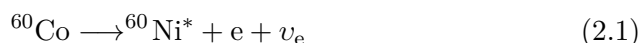
Pásková struktura vláken s jedinou centrální trubičkou je založena na stejném principu jako předchozí struktura. Rozdíl spočívá v tom, že vlákna nejsou uspořádána v centrální trubce do svazků, ale do plochých pásků. Pásky jsou drženy pohromadě UV vytvrzeným polymerem a obsahují až 24 vláken. Uvedená struktura jádra je vhodná zejména pro velké počty vláken. Do kabelu s uvedeným jádrem se vejde až 12 pásků. U této páskové struktury se dá s výhodou využít i tzv. hromadného svařování nebo spojování (Mass Fusion Splicing, Mass Mechanical Splicing) všech vláken pásku [5].

V drážkové struktuře jádra je v jádře umístěn člen s několika drážkami. V každé drážce je opět volně umístěno až 12 vláken.

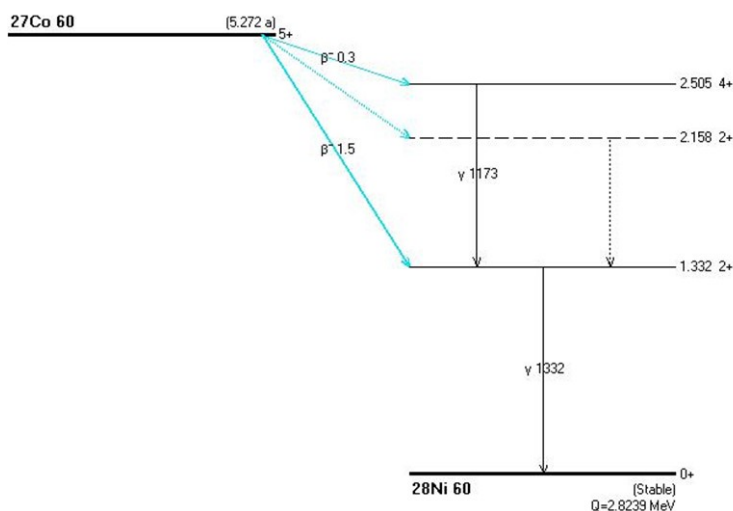
Jádro s vlákny v těsné sekundární ochraně je nejčastěji používána pro vnitřní kabely. Zřídka se objevuje u venkovních. Někdy se této struktury používá u podmořských kabelů [4].

2.3 Gama záření a jeho vliv na optická vlákna a kabely

Radionuklid ^{60}Co , který je v experimentech využíván jako zdroj gama záření, má poločas rozpadu $T_{1/2} = 5,27$ let. Gama záření je emitováno na základě reakcí [6]:



Při rozpadu ${}^{60}\text{Co}$ nejprve dojde k vyzáření beta částice (elektronu) a elektronového neutrina kobaltem a vznikne jádro niklu v excitovaném stavu. Poté excitované jádro vyzáří přebytečnou energii v podobě kvant gama záření. Vyzářená kvanta záření gama mají energii buď 1,17 MeV nebo 1,33 MeV. Průměrná energie gama záření z diskrétního (čárového) spektra ${}^{60}\text{Co}$ je 1,25 MeV, a nemůže tak v žádném případě vyvolat následnou radioaktivitu zkušebních předmětů.



Obrázek 2.2: Schéma přeměny ${}^{60}\text{Co}$ [7].

V případě elektromagnetického záření probíhá interakce mezi zářením a hmotou pomocí energie z nepřímé ionizace, kterou předá gama záření elektronům, které jsou schopny se ionizovat. Zda se při předávání energie uplatní fotoelektrický jev, Comptonův jev nebo tvorba párů závisí na energii záření (tedy na vlnové délce) a prostředí (na výšce hodnoty protonového čísla). Jeden z těchto jevů vždy převládá, ovšem na celkové absorpci záření se podílejí všechny tři mechanismy [7]. Fyzikální veličina, která vyjadřuje absorpci záření v hmotě, je definována jako dávka [6]:

$$D = \frac{E}{m}, \quad (2.3)$$

kde E je množstvím absorbované energie v joulech na jednotku hmoty v kg a jednotkou dávky je $\text{Gy} = \text{J/kg}$.

V místě působení gama záření vzniká větší větší optický útlum přenášeného výkonu. Účinky vysokoenergetického gama záření zahrnují řadu změn v chemických, mechanických a optických vlastnostech [8]. Vyzářované fotony pronikají hluboko do mřížkové struktury, kde způsobují ionizaci elektronů, což způsobuje jejich dočasné nebo trvalé připevnění k mřížkové struktuře.

Vzniká tak defekt v krystalické nebo polymerní struktuře mřížky. Zajaté elektrony v mřížce vytvářejí barevná centra s typickou absorpcí ve viditelném spektru [9]. Přírodním důsledkem je změna absorpčních charakteristik, která vede ke změně barvy vlákna (sklo prochází procesem ztmavnutí) a tím zvyšuje optický útlum. Tento fakt může být tak významný, že může dojít ke „slepotě“ optického vlákna s útlumem v desítkách dB na km jeho délky. Velmi vysoké hodnoty optického útlumu ovlivňují správnou funkci optických vláken a kabelů například v bezpečnostních systémech [10].

2.4 Vlastnosti optických vláken

Mezi vlastnosti optických vláken ovlivňující jejich optický útlum patří především jejich ztráty způsobené absorpcí materiálu, ztráty rozptylem, makroskopické neregularity, mikroohyby a samotné ohyby vlákna.

Ztráty optických vlnovodů

Závislost energie šířící se vlny na podélné souřadnici z můžeme vyjádřit vztahem [2]:

$$P \approx \exp -\alpha_z, \quad (2.4)$$

kde α_z je koeficient útlumu, který zahrnuje všechny druhy ztrát a lze ho vyjádřit vztahem :

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_R + \alpha_N + \alpha_M + \alpha_0. \quad (2.5)$$

α_A je koeficient absorpce, α_R je koeficient Rayleighova rozptylu, α_N je koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách, α_M je koeficient rozptylu na mikroohybech a α_0 je koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích [2].

Ztráty absorpcí

Hlavní příčinou ztrát absorpcí je přítomnost iontů kovů a vody ve skle, například Fe, Cu, Cr, Ni, OH. Ke ztrátám dochází vlivem rezonance uvedených iontů na určitých kmitočtech a je provázána tepelnými ztrátami. Hlavní část ztrát tvoří rezonance OH iontů na frekvenci odpovídající vlnové délce 2,8 μm . U kvalitních skel s optickým útlumem do několika dB/km musí být koncentrace iontů p v mezích $p < 10^{-9}$ pro ionty kovů a $p < 10^{-7}$ pro OH ionty [2].

Ztráty rozptylem

Náhodné rozložení molekul v amorfním materiálu způsobuje mikronehomogenitu indexu lomu materiálu. Rozptylové ztráty na nehomogenitách materiálu menším než je vlnová délka nazýváme Rayleighova rozptyl. Rayleighova rozptyl je všesměrový a jeho závislost na vlnové délce je $\alpha_R \approx \lambda^{-4}$. Nejmenší ztráty způsobené Rayleighova rozptylem jsou v oblasti vlnových délek kolem 10 μm , kde jsou ztráty menší než 0,01 dB/km. Jedná se o teoretickou dolní mez ztrát optických vlnovodů [2].

Makroskopické neregularity

Mezi makroskopické neregularity zahrnujeme především makronečistoty, vzduchové bublinky, trhliny v materiálu, poruchy tvaru a rozměrů hranice mezi jádrem a pláště vlákna, excentricita a eliptičnost vlákna. Těmto neregularitám lze zamezit vhodnými technologickými postupy při výrobě vlákna [2].

Mikroohyby

Mikroohyby jsou poruchy přímočarosti osy vlnovodu. Vyskytují se po celé délce vlákna, typická amplituda mikroohybu je okolo $1 \mu\text{m}$ a opakují se s periodou o délce 1 mm až 1 cm, proto mohou výrazně přispět k celkovému útlumu optického vlákna. Makroohyby vznikají při výrobě nebo působením okolních elementů optického vlákna v optickém kabelu [2].

Ohyby vlákna

Ke zvýšení optického útlumu neboli-li k úniku vyzařované energie vlivem ohybu vlákna dochází při překročení určité meze poloměru křivosti ohybu vlákna. Ohybům vlákna se snažíme vyvarovat především při nerovnostech trasy přenosu a při připojování optického vlákna ke zdroji nebo k detektoru [11].

Definice optického útlumu vláken

Při určování optického útlumu vlákna vycházíme z přímého měření optického výkonu na začátku P_1 a na konci P_2 optického vlákna (optické trasy). Optický útlum vyjadřujeme v dB a je dán vztahem:

$$u = P_1 - P_2 \quad [\text{dB}]. \quad (2.6)$$

Měrný optický útlum je vztažen na jednotku délky

$$\alpha = \frac{u}{L} \quad [\text{dB/km}], \quad (2.7)$$

kde L je délka měřeného optického vlákna v km. Optický výkon navázaný do vlákna P_1 nelze přímo zjistit, protože není dán pouze výkonem zdroje, ale důležitou roli hrají prakticky nezměřitelné vazební ztráty. Jednou z metod, jak tento problém vyřešit je použitím metody vložených ztrát [2].

Metoda vložených ztrát

Metoda vložených ztrát spočívá ve dvojím měření optického výkonu. Nejprve je zdroj s detektorem spojen kratším vláknem a je změřen výkon P_1 . Poté je za kratší vlákno připojeno měřené vlákno a je určen výstupní výkon P_2 . Optický útlum je určen podle vztahu 2.6. U současných měřících přístrojů lze krátké vlákno použít jako kalibrační, uložit naměřený výkon P_1 v dBm a po připojení měřeného vlákna odečítat na displeji měřícího přístroje přímo hodnotu optického útlumu měřeného vlákna v dB [2].

Porovnání přímé a nepřímé metody měření

Přímá měření optického útlumu jsou založená na přímé aplikaci jeho definice [12]. Mezi přímé metody se řadí se již výše zmíněná metoda vložených ztrát nebo metoda dvou délek. Metoda dvou délek je na rozdíl od metody vložených ztrát destruktivní, avšak jejich princip je velmi podobný. Při použití metody dvou délek je zavedeno optické záření do měřeného vlákna o délce l a je změřena úroveň optického výkonu P_2 na jeho výstupu. Při zachování konstantních podmínek vazby se vlákno ve vzdálenosti přibližně 2 metry od výstupního čela zlomí a po úpravě konce vlákna se změří stejným měřicím přístrojem úroveň výkonu P_1 na jeho výstupu. Optický útlum je pak vypočten podle vztahu 2.6.

Nepřímá metoda měření optického útlumu vlákna se nazývá OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) a zakládá se na zpětném Rayleighově rozptylu v optických vláknech, případně Fresnelova odrazu na koncích vlákna [12]. Rayleighův zpětný rozptyl se skládá z rozptylů způsobených vzájemným působením rozptylů na mikroskopických neregularitách podél celého vlákna. Při měření se část rozptýleného signálu vrátí zpět do zařízení, kde se vyhodnocují výsledky. Zpětně rozptýlený signál indikuje úroveň útlumu vlákna. Snižující se úroveň signálu je dokládána klesající úrovní rozptýleného světla, protože jak poslaný, tak rozptýlený paprsek jsou tlumeny se vzdáleností. Úroveň Rayleighova zpětného rozptylu je úměrná šířce pulsu a vlnové délce (čím je šířka a výška pulsu větší, tím je větší i zpětný rozptyl signálu). Úroveň Rayleighova zpětného rozptylu trasy je vyšší na vlnové délce 1310 nm než na vlnové délce 1550 nm. S vyšší vlnovou délkou (nad 1550 nm) Rayleighův zpětný rozptyl stále klesá. Tento jev se nazývá infračervené zředění (absorpce), které se zvyšuje a způsobí celkově větší úroveň útlumu.

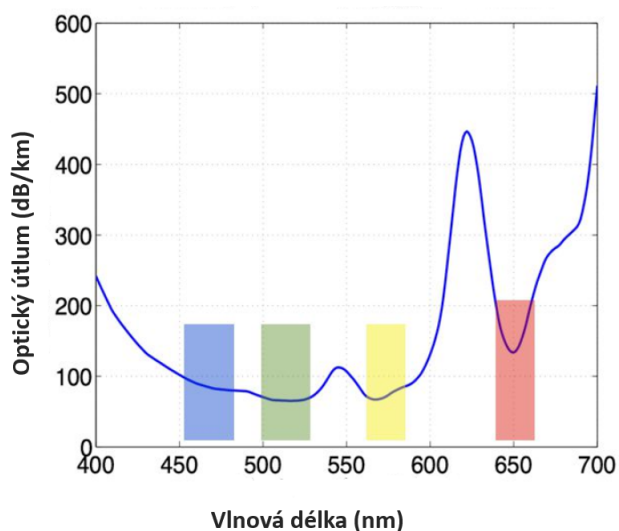
Na druhé straně Fresnelovy odrazy jsou jednotlivé odrazy způsobeny jednotlivými složkami ve vlákne a náhlými změnami indexu lomu (např. porucha, nehomogenita ve vlákne a vzduchová mezera). V tomto případě je velké množství světla oproti zpětnému rozptylu odráženo zpět na začátek. Díky tomuto jevu můžeme při měření OTDR metodou vyhodnocovat informace o tom v jaké vzdálenosti se nalézá optická spojka, konec vlákna nebo zlom optického vlákna [12].

Kapitola 3

Popis optických vláken a kabelů

3.1 Plastová optická vlákna

Plastové optické vlákno (Plastic Optical Fibre - POF) je tvořeno jádrem z polymethylmethakrylátové pryskyřice a plášťové vrstvy z fluorovaného polymeru. POF vlákna se nejčastěji používají v provedení se skokovou změnou indexu lomu (SI - Step Index), které je tvořeno homogenním jádrem, které je obklopeno pláštěm s indexem lomu o několik procent nižším než je index lomu jádra. Světlo je v jádru je vedeno úplným vnitřním odrazem na rozhraní jádra a pláště. Nejnižší optické ztráty jsou na vlnových délkách 520 nm (zelená), 560 nm (žlutá) a 650 nm (červená), viz obrázek 3.1 a tato optická vlákna se používají na maximální vzdálenosti do 100 m.



Obrázek 3.1: Spektrální charakteristika optického útlumu polymerního optického vlákna - PMMA - SI [13].

Běžná plastová vlákna mají průměr jádra $980 \mu\text{m}$, dále jsou často používána vlákna s průměrem jádra $730 \mu\text{m}$. Tato vlákna jsou vícevidová, světelný paprsek se v jádře šíří více způsoby s rozdílnou dobou přenosu. Tím vzniká rozšíření světelného pulsu. Rozdíly v propagačních časech rostou se zvyšujícím

se rozdílem indexu lomu mezi jádrem a pláštěm. Standardní plastové optické vlákno má rozdíl v indexu lomu téměř 5%.

Rozdíly v době přenosu paprsků lze odstranit pomocí profilu parabolického indexu lomu jádra. Použitím parabolického indexového profilu jsou rozdíly v časech přenosu téměř eliminovány. Použití fluorovaného polymeru (CYTOP® od Asahi Glass Company) pro polymerní vlákna v Lucina™-POF poskytuje útlum nižší než 20 dB/km na vlnových délkách 850 nm a 1300 nm a umožňují rychlost přenosu dat až 40 Gbit/s na 100 m POF (předvedeno např. od TU Eindhoven, University Kiel, Georgia Institute of Technology v Atlantě, NEC, University of Southern California a Keio University) [14].

Pomocí indexového profilu ve tvaru W lze realizovat poloměry ohybu pouze několik milimetrů. Na rozdíl od PMMA-POF jsou průměry jádra těchto vláken mezi 50 μm a 120 μm . Jsou určeny k přenosu na vlnových délkách 520 nm, 560 nm a 650 nm.

K experimentům uvedeným v této práci byly použity dva druhy plastových optických vláken. První použité plastové optické vlákno je mnohavidové tvořené jedním jádrem z polymethylmethakrylátové pryskyřice o průměru 980 μm a opláštění z fluorovaného polymeru o průměru 1000 μm . Index lomu jádra je 1,49 s numerickou aperturou 0,5. Vlákno je chráněno polyetylenovým pláštěm o šířce 2,20 mm (primární ochrana). Udávaná hodnota optického útlumu výrobcem na vlnové délce 660 nm je 190 dB/km [15]. Pro experimenty byla použita vlákna o délce 1,5 m, 10 m, 15 m a 20 m.

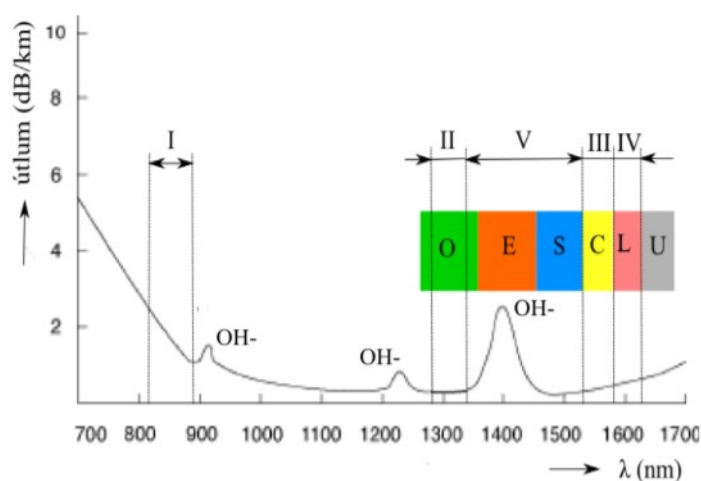
Druhý typ polymerních vláken, které jsem v diplomové práci testovala, je mnohavidové vlákno se sedmi jádry z polymethylmethakrylátové pryskyřice o průměru 250 μm (svazek polymerních optických vláken 7 x 250 μm) a opláštění z fluorovaného polymeru o průměru 250 μm . Index lomu jádra je 1,49 s numerickou aperturou 0,5. Vlákno je chráněno polyetylenovým pláštěm o šířce 2,20 mm. Udávaná hodnota optického útlumu výrobcem na vlnové délce 660 nm je 350 dB/km [16]. Pro experimenty byla použita vlákna o délce 5 m, 10 m, 15 m a 20 m.

3.2 Skleněná optická vlákna

Křemenná optická vlákna jsou vyrobena z vysoce čistého (nad 99 %) taveného křemene SiO_2 . Jádro optického vlákna je vyrobeno z čistého křemene, plášť vlákna je vyroben ze směsi křemenného a germaniového skla GeO_2 , která má vyšší index lomu než čistý křemen (index lomu kolem 1,544) a téměř nezměněný optický útlum. Je tedy splněna podmínka fungování optického vlákna, index lomu jádra je vyšší (cca o 1%) než index lomu pláště [17].

Spektrální útlumová charakteristika optického křemenného vlákna je zobrazena na obrázku 3.2. Optický útlum SiO_2 téměř kopíruje křivku Rayleighova rozptylu až do vlnové délky 1600 nm, na vlnových délkách vyšších kopíruje křivku infračervené absorpce. V oblasti s nízkým útlumem je ovšem na křivce několik oblastí se zvýšeným optickým útlumem způsobených hlavně OH ionty, tedy disociovanou vodou nacházející se uvnitř materiálu vlákna (například útlumové maximum na vlnové délce 1397 nm). Minimální útlum má SiO_2

přibližně kolem vlnové délky 1550 nm. Křemenné sklo má v infračervené oblasti spektra několik oblastí s velmi nízkým útlumem, která se nazývají telekomunikační okna. Telekomunikační neboli přenosová okna pro optický signál jsou frekvenční pásma, na kterých jsou nejlepší parametry pro přenos optického signálu. Na obrázku 3.2 jsou značena jako okno I (840 nm – 940 nm), okno II (1280 nm - 1335 nm), okno III (1530 nm - 1565 nm), okno IV (i 1565 nm - 1625 nm), okno V (1335 nm - 1530 nm). Celé spektrum však může být označováno písmennými zkratkami: pásmo O (Original, 1260 nm - 1360 nm), pásmo E (extended, 1360 nm - 1460 nm), pásmo S (short, 1460 nm - 1530 nm), pásmo C (convetional, 1530 nm - 1565 nm), pásmo L (long, 565 nm - 1625 nm), pásmo U (ultra long, 1625 nm a 1675 nm) [18].



Obrázek 3.2: Spektrální útlumová charakteristika optického křemenného vlákna [18].

Parametry optických vláken vycházejí z mezinárodně uznávaných standardů. Každé vlákno se dělí na typy, jakými jsou vlákna fyzicky uzpůsobena k přenosu signálu. Používá se označení optických vláken OM (Optical Multimode - optický multividový) pro mnohavidová optická vlákna a OS (Optical Singlemode - optický jednovidový) pro jednovidová optická vlákna, kde základní rozdíl spočívá v různém průměru jádra popřípadě pláště vláknových vlnodů. Odlišné jsou také parametry optického útlumu [19].

Standardy OM mají průměr jádra vlákna 50 μm a 62,5 μm a jsou určena pro vlnové délky 850 nm a 1300 nm. Průměr jádra 62,5 μm optického mnohavidového vlákna je definován jen pro standard OM1. Standardy OM2, OM3, OM4 a OM5 definují optická vlákna s průměrem jádra 50 μm . Ovšem jednotlivé standardy díky postupnému technologickému vývoji a potlačování optických útlumů vlivem OH, dokázaly snížit optický útlum a tedy zvýšit i šířku pásma přenosu na vlnové délce 850 nm a tím i zvýšit datový přenosový objem. Standard OM1 má šířku tohoto pásma 200 MHz · km, OM2 zvyšuje tento parametr na 500 MHz · km, OM3 má šířku pásma 1500 MHz · km. Nejvyšší parametr šířky pásma má OM4 a OM5 s 3500 MHz · km [19].

U jednovidového standardu OS je průměr jádra v řádech jednotek mikro-

metrů, nejčastěji se vyskytuje průměr jádra 8 - 9 μm . Průměr pláště je u všech telekomunikačních optických vláken stejný a činí 125 μm . Rozdíl mezi standardy OS1 a OS2 jsou v útlumech vláken. Tyto útlumy jsou většinou definovány pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Standard OS1 má na obou těchto vlnových délkách útlum okolo 1 dB/km. Optická vlákna standardu OS2 mají nižší optický útlum, který se pohybuje okolo 0,4 dB/km [19], [20].

Standardy, které určují geometrické, mechanické a přenosové požadavky na jednotlivá optická vlákna v optické komunikaci definuje Mezinárodní telekomunikační unie ITU (International Telecommunication Union). Tyto standardy jsou celosvětově respektovány jako záruka nejhorších možných podmínek pro práci optických rozhraní. Optickými vlákny se zabývájí doporučení skupiny G, přesněji G.650 – G.659. U každého typu vlákna jsou stanovena přenosová okna, pro které je vlákno přednostně určeno. Hlavním rozlišovacím znakem jednotlivých typů vláken je průběh chromatické disperze.

Optická vlákna typu G.652 jsou standardní jednojádřová optická vlákna s rozměry 9/125 μm . Tato vlákna byla původně určena pro přenos ve druhém přenosovém okně. Vyznačují se přirozeným průběhem chromatické disperze, tj. hodnotu blízkou nule při 1310 nm [21].

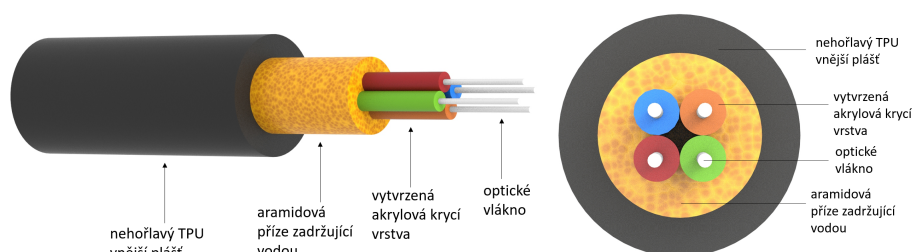
V případě optických vláken typu G.657 se jedná o nový typ vláken, která mají složitější profil indexu lomu a díky tomu mají výborné vlastnosti z hlediska citlivosti vláken na ohyby. Používají se tam, kde se předpokládá občasná manipulace a následné prudké ohyby (propojovací kabely mezi jednotlivými komponenty) [22].

3.3 Optický kabel OPK

Optický taktický kabel OPK (OPK-U-DSTTAC-4(4x0,9)A9AAU) je experimentální kabel vyrobený firmou OPTOKON Kable s.r.o. a je tvořen nehořlavým TPU (termoplastický polyuretan) vnějším pláštěm, aramidovými vlákny zadržující vodu a čtyřmi různými typy vláken chráněnými vytvrzenou akrylovou krycí vrstvou [23]. Průřez optickým kabelem OPK je uveden na obrázku 3.3. Optický kabel byl vyroben v délce 400 m a po té byl rozdělen na 4 kabely o délce 100 m. Optická mnohajádřová vlákna jsou zakončena konektory typu ST/PC, jednojádřová vlákna konektory typu FC/APC. První 100 m kabel byl určen jako referenční, další kabely byly určeny pro testování změn vlastností kabelu vlivem gama záření. Označení vláken a jejich vlastnosti jsou stručně shrnuty v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Popis optického kabelu OPK.

Označení žil	Geometrické rozměry vlákna [μm]	Typ	MM/SM	Měřeno na vlnové délce [nm]	Typ konektoru	Datasheet
A	09/125/250	G.657.B3	SM	1550	FC/APC	[24]
B	09/125/250	G.657.A1	SM	1550	FC/APC	[25]
C	09/125/250	G.652.D	SM	1550	FC/APC	[26]
D	50/125/250	OM2	MM	850	ST/PC	[27]



Obrázek 3.3: Struktura taktického kabelu OPK.

Optický kabel OPK obsahuje tři SM vlákna (označeno jako vlákna A, B, C) a jedno vlákno MM (označeno jako vlákno D). Jednovidová optická vlákna mají průměr jádra $9\ \mu\text{m}$, průměr pláště $125\ \mu\text{m}$ a průměr primární ochrany $250\ \mu\text{m}$. Optická vlákna A, B a C mají vlastnosti standardu ITU-T G.657.A1 a ITU-T G.652 A, B, C a D. Měření optických vlastností probíhalo na vlnové délce $1550\ \text{nm}$.

Mnohavidové optické vlákno označené jako D má průměr jádra $50\ \mu\text{m}$, průměr pláště $125\ \mu\text{m}$ a průměr primární ochrany $250\ \mu\text{m}$. Vlastnosti a rozměry vlákna D jsou v souladu se standardy OM2. Měření optických vláken probíhalo na vlnové délce $850\ \text{nm}$. Přesný popis měření je uveden v kapitole 5.2.

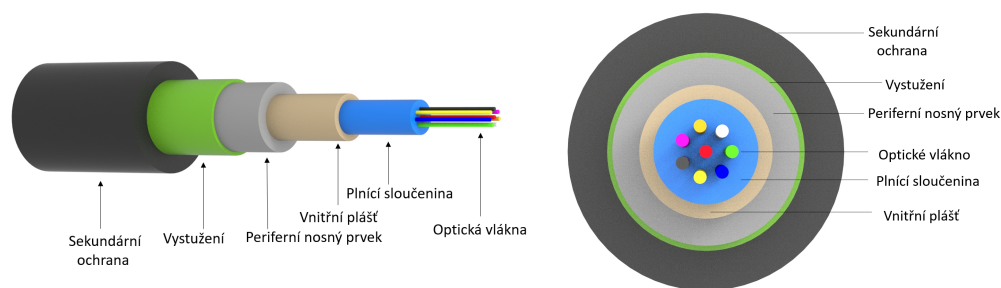
3.4 Optické kabely CTDS a CTFS

Optické kabely CTDS (OPK-O-CTDS-8(1x3,0)LTGXP-SPC-BK) a CTFS (OPK-O-CTFS-8(1x3,0)LTGXP-SPC-BK) jsou experimentální kabely vyrobené firmou OPTOKON Kable s.r.o. a jsou tvořeny osmi různými druhy optických vláken chráněnými několika ochrannými vrstvami, výztuží a výplní [28]. Na obrázku 3.4 je uveden průřez optickým kabelem CTDS. Optický kabel CTFS obsahuje stejné druhy optických vláken i vrstvy ochrany jako kabel CTDS, navíc má pouze vrstvu ochranného gelu. Kabely byly vyrobeny v délce $300\ \text{m}$ a po té byly rozděleny na 3 kabely o délce $100\ \text{m}$. Optická mnohavidová vlákna jsou zakončena konektory typu ST/PC, jednovidová vlákna konektory typu FC/APC. První kabel byl určen jako referenční, další kabely byly určeny pro testování změn vlastností kabelu vlivem gama záření. Označení vláken a jejich vlastnosti jsou stručně shrnuty v tabulce 3.2.

Optický kabel obsahuje tři MM vlákna (označeno jako žíla A, B, C) a pět vláken SM (označených jako žíla D, E, F, G, H).

Vícevidové optické vlákno označené jako A má průměr jádra $50\ \mu\text{m}$, průměr pláště $125\ \mu\text{m}$ a průměr primární ochrany $250\ \mu\text{m}$. Vícevidové optické vlákno označené jako B má průměr jádra $200\ \mu\text{m}$, průměr pláště $220\ \mu\text{m}$ a průměr primární ochrany $400\ \mu\text{m}$. Vícevidové optické vlákno označené jako C má průměr jádra $62,5\ \mu\text{m}$, průměr pláště $125\ \mu\text{m}$ a průměr primární ochrany $250\ \mu\text{m}$. MM vlákna byla měřena na vlnových délkách $850\ \text{nm}$ a $1300\ \text{nm}$.

3. Popis optických vláken a kabelů



Obrázek 3.4: Schéma optického kabelu CTDS.

Tabulka 3.2: Popis optických kabelů CTDS a CTFS.

Označení žil	Geometrické rozměry [μm]	Typ vlákna	MM/SM	Měřeno na vlnové délce [nm]	Typ konektoru	Datasheet
A	50/125/250	BW200/200	MM	850, 1300	ST/PC	[29]
B	200/220/400	Low-OH	MM	850, 1300	ST/PC	[30]
C	62,5/125/250	OMIC	MM	850, 1300	ST/PC	[31]
D	09/125/250	Radiation Hard	SM	1310, 1490, 1550, 1625	FC/APC	[32]
E*	09/125/250	2015/169-B	SM	1310, 1490, 1550, 1625	FC/APC	[33]
F	09/125/250	G.657.A1	SM	1310, 1490, 1550, 1625	FC/APC	[25]
G	09/125/250	G.652.D/G.657.A1	SM	1310, 1490, 1550, 1625	FC/APC	[34]
H	09/125/250	G.652.D	SM	1310, 1490, 1550, 1625	FC/APC	[26]

* Experimentální optické vlákno poskytnuté pracovištěm ÚJV ŘEŽ a.s.

Jednovidová optická vlákna označená D, E, F, G a H mají průměr jádra 9 μm , průměr pláště 125 μm a průměr primární ochrany 250 μm . Vlastnosti optických jednovidových vláken a jejich rozměry jsou v souladu se standardy ITU-T G.657.A1 a ITU-T G.652 A, B, C a D. Měření optického útlumu probíhalo na vlnových délkách 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm. Přesný popis měření je uveden v kapitole 5.2. Vlákno označené jako E je experimentální optické vlákno poskytnuté pracovištěm ÚJV ŘEŽ a.s.

Kapitola 4

Experiment

4.1 Ozařování gama zářením

Ozařování optických vláken a kabelů probíhalo na pracovišti Ústavu jaderného výzkumu Řež a.s. Optická vlákna a optické kabely byly navinuty na cívku o průměru 80 cm a vloženy do ozařovací komory. Jako zdroj gama záření byly použity zdroje s radioaktivním izotopem ^{60}Co a během tří let (2019-2021) jsem se účastnila celkem pěti experimentů s různou délkou a dávkou gama záření. Vzhledem k rozdílnosti experimentů v závislosti na ozařované dávce za hodinu, byly pro experimenty využity tři ozařovací komory ROZA, PRAZDROJ a PANOZA.

V ozařovacích komorách ROZA a PRAZDROJ probíhalo ozařování optických vláken a kabelů co největší možnou dávkou gama záření v co nejkratším celkovém čase ozařování. Fotografie ozařovacích komor ROZA (vlevo) a PRAZDROJ (vpravo) je uvedena na obrázku 4.1 a) a na obrázku 4.1 b) je detailní pohled do ozařovací komory PRAZDROJ.



(a):



(b):

Obrázek 4.1: Fotografie ozařovacích komor a) vlevo ROZA, vpravo PRAZDROJ, b) pohled do ozařovací komory PRAZDROJ.

Kobaltový ozařovač ROZA obsahuje jeden tyčový zdroj ^{60}Co v kovovém stavu o aktivitě cca 500 TBq ke dni přebití, kobaltový ozařovač PRAZDROJ obsahuje dva tyčové zdroje o aktivitě cca 600 TBq ke dni přebití (přebitím je

myšleno jejich sestavení a zavaření do obalového souboru) [7].

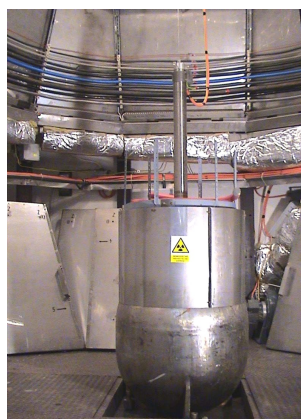
Kobaltové zdroje ozařovačů ROZA a PRAZDROJ jsou uchovávány ve vlastním stínícím kontejneru tvaru kvádra o rozměrech cca 120 x 120 x 50 cm. Zdroj je uložen v nerezové ocelové trubce upevněné na posuvné tyči s pohonem, který umožňuje pohyb zářiče dolů a nahoru.

Ozařovače ROZA a PRAZDROJ jsou tzv. ozařovače studnového typu. Kontejner ovládaný elektromotorem zajíždí z tzv. parkovací polohy (kdy je ozařovací šachta zcela otevřena a přístupná k založení vzorků) po kolejnicích do tzv. ozařovací polohy nad ozařovací šachtu (studnu) a v této poloze je možné spustit zdroj do ozařovací šachty ke vzorkům.

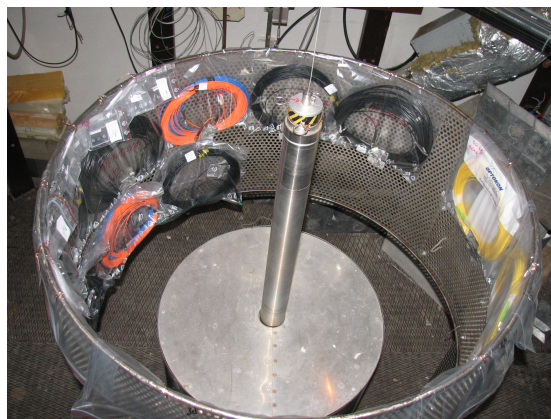
Zdroje jsou tedy při ozařování umístěny ve svislé šachtě tvaru válce o průměru 1000 mm a hloubce 3000 mm. Šachta se nachází pod úrovní podlahy. Tato hluboká „studna“ slouží jednak k ozařování různě velkých vzorků, jednak k výměně kobaltových zářičů pod vodní hladinou, která zajišťuje dostatečné stínění vůči ionizujícímu záření. Pro běžná ozařování se využívá pouze horní část šachty.

Zdroje záření gama radioizotopu ^{60}Co (zdroje ionizujícího záření ROZA a PRAZDROJ) slouží k ozařování komponent, materiálů a vzorků při normálních a zvýšených teplotách; umožňují radiačně modifikovat vlastnosti nekovových materiálů a studovat vliv záření gama na různé systémy, provádět sterilizaci zdravotnických výrobků a pomůcek, dekontaminovat různé látky, ošetřovat předměty od dřevokazného hmyzu, barvení skla apod.

A v ozařovací komoře PANOZA (Panoramatická ozařovna) probíhalo pomalé dlouhodobé ozařování. Fotografie ozařovací komory PANOZA je uveden na obrázku 4.2 a) a na obrázku 4.2 b) je detailní pohled do ozařovací komory PANOZA.



(a):



(b):

Obrázek 4.2: Fotografie ozařovací komory PANOZA a) uzavřená ozařovací komora b) pohled na upevněná optická vlákna v ozařovně PANOZA (Panoramatický ozařovač).

Ozařovací komora PANOZA umožňuje ozařování v plné geometrii. Vlastní ozařovna má půdorys 3 x 3 m, je stíněna betonem a skálou. Zdroj je umístěn

uprostřed v upraveném stínícím kontejneru a je vysouván pomocí ručně pomoci lanka ovládaného převodovým mechanismem. V zasunutém stavu (v kontejneru) je možné do ozařovny vstupovat a vkládat vzorky [7].

Kobaltový ozařovač PANOZA obsahuje jeden tyčový zdroj ^{60}Co v kovovém stavu o aktivitě cca 100 TBq ke dni přebití. Zdroj je uložen v kontejneru z nerez oceli o průměru cca 980 mm, výšce cca 1230 mm a hmotnosti přibližně 2,6 t.

Po vyndání optických vláken a kabelů z ozařovací komory následoval jejich převoz do laboratoře PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedru mikroelektroniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Následovalo měření jejich vlastností během relaxace. Jedná se o časový úsek následující po ukončení ozařování optického vlákna, při kterém dochází ke změně vlastností vlákna. Cílem měření je zachycení trendu změny vlastností optického útlumu a zjištění, zda se optický útlumu ozařovaných vláken přiblíží hodnotám před ozáření a jak dlouhá doba k tomu je potřeba.

4.2 Vlastní experimenty

Vlastnosti optického útlumu optických vláken a kabelů byly nejdříve měřeny v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky na ČVUT v Praze. Až po té byly odvezeny na pracoviště ÚJV Řež a.s., kdy jejich instalace do ozařoven trvala jeden pracovní den a byla provedena technikou z ÚJV Řež a.s. Vlastního experimentu jsem se pak účastnila osobně a prováděla průběžná měření.

První experiment probíhal 27.5.2019 v ozařovací komoře ROZA a trval 9 hodin. Ozařující dávka byla 1,122 kGy/h, a tedy celková dosažená dávka ozáření byla $10,1 \pm 1,2$ kGy. Při tomto experimentu byly ozařovány optické kabely CTDS, CTFS a dvě optická plastová vlákna POF s průměrem 1 mm o délce 1,5 m a 15 m.

Druhý experiment proběhl v ozařovací komoře PRAZDROJ a byl zahájen 9.9.2019 v 10:14, ukončen 11.9.2019 ve 14:13, tedy celkový čas ozařování byl 51 hodin 59 minut. Ozařující dávka byla 1 kGy/h, celková dosažená dávka ozáření byla $51,3 \pm 1,7$ kGy. V průběhu ozařování 10.9.2019 od 8:42 do 8:50 bylo ozařování zastaveno a proběhla kontrola dozimetrů pro odečtení a výpočet ozařované dávky. Při tomto experimentu byl ozařován optický kabel OPK a dvě optická plastová vlákna POF o délce 10 m, první vlákno mělo jedno jádro a průměr 1 mm, druhé vlákno mělo sedm jader s průměrem 250 μm . Experimentu jsem se pak účastnila osobně. Po nainstalování optických kabelů a vláken do ozařovací místnosti jsem je připojovala k měřícím přístrojům v řídicí místnosti a byla u spouštění celého experimentu. Po ukončení ozařování jsem prováděla průběžná měření optického útlumu a spektrálních vlastností vláken a kabelů.

Třetí experiment proběhl v komoře ROZA a byl zahájen 14.9.2020 v 11:15, ukončen 17.9.2020 ve 9:40, tedy celkový čas ozařování byl 70 hodin 25 minut. Ozařující dávka byla 0,93 kGy/h, celková dosažená dávka ozáření byla $65,5 \pm 7,4$ kGy. V průběhu ozařování 15.9.2019 od 14:05 do 14:10 bylo

ozařování zastaveno a proběhla kontrola dozimetřů pro odečtení a výpočet ozařované dávky. Při tomto experimentu byly ozařovány optické kabely CTDS, CTFS a dvě optická plastová vlákna POF se sedmi jádry s průměrem 250 μm o délce 5 m a 10 m.

Čtvrtý experiment byl zahájen 11.1.2021 v 10:00. Jeho ukončení je pro jednotlivá ozařovaná vlákna a kabely různá v závislosti na zvolené ozařované dávce. Jedná se o dlouhodobé ozařování s malou ozařovací dávkou $66,6 \pm 6,3 \text{ Gy/h}$ pro optická vlákna a $5,6 \text{ Gy/h}$ pro optické kabely. Při tomto experimentu byly ozařovány optické kabely CTDS, CTFS, optická plastová vlákna POF s průměrem 1 mm o délce 10 m a 20 m, optická plastová vlákna POF se sedmi jádry s průměrem 250 μm o délce 10 m a 20 m. Optické kabely CTDS a CTFS byly ozářeny dávkou gama záření $166 \pm 16 \text{ kGy}$, měření jejich vlastností v době odevzdání práce stále pokračuje, a proto zde nejsou výsledky měření uvedeny. Plastová optická vlákna byla z ozařovací komory PANOZA vydávána při dosažení dávky $1,24 \pm 0,20 \text{ kGy}$ (12.1.2021, délka ozáření 1 den), $6,40 \pm 0,65 \text{ kGy}$ (15.1.2021, délka ozáření 4 dny), $11,2 \pm 1,1 \text{ kGy}$ (18.1.2021, délka ozáření 7 dnů), $17,6 \pm 1,7 \text{ kGy}$ (22.1.2021, délka ozáření 11 dnů).

Pátý experiment byl zahájen 24.9.2021. Jednotlivá ozařovaná vlákna byla vkládána a vydávána z ozařovací komory PANOZA v závislosti na volných pozicích v komoře a na zvolené ozařované dávce. Jedná se o dlouhodobé ozařování optických vláken s malou ozařovací dávkou $66,6 \pm 6,3 \text{ Gy/h}$. Při tomto experimentu byla ozařována optická plastová vlákna POF s průměrem 1 mm o délce 10 m a 20 m, optická plastová vlákna POF se sedmi jádry s průměrem 250 μm o délce 10 m a 20 m. Předpokládané dávky gama záření byly $11,7 \pm 1,7 \text{ kGy}$ (vyndáno 9.11.2021, délka ozáření 13 dnů), $28,6 \pm 2,7 \text{ kGy}$ (vyndáno 9.11.2021, délka ozáření 20 dnů), $40,4 \pm 4,0 \text{ kGy}$ (vyndáno 20.10.2021, délka ozáření 26 dnů), $51,4 \pm 4,8 \text{ kGy}$ (vyndáno 27.10.2021, délka ozáření 33 dnů), $62,9 \pm 5,9 \text{ kGy}$ (vyndáno 5.11.2021, délka ozáření 42 dnů).

Přehled provedených experimentů je shrnut v Tabulce 4.1. Přehled ozářených plastových optických vláken je uveden v příloze v tabulce A.1 a přehled ozářených optických kabelů je uveden v příloze v tabulce A.2.

Tabulka 4.1: Přehled provedených experimentů na pracovišti ÚJV Řež a.s.

Exp.	Typ kabelu/vlákna	Dávka ozáření	Délka ozáření	Komora
1	CTDS, CTFS, POF	$10,1 \pm 1,2 \text{ kGy}$	9 hod	ROZA
2	OPK, POF	$51,3 \pm 1,7 \text{ kGy}$	51 hod 59 min	PRAZDROJ
3	CTDS, CTFS, POF	$65,5 \pm 7,4 \text{ kGy}$	70 hod 25 m	ROZA
4	CTDS, CTFS POF	$166 \pm 16 \text{ kGy}$		PANOZA
		$1,24 \pm 0,20 \text{ kGy}$, $6,40 \pm 0,65 \text{ kGy}$	1 den, 4 dny	PANOZA
		$11,2 \pm 1,1 \text{ kGy}$, $17,6 \pm 1,7 \text{ kGy}$	7 dní, 11 dní	PANOZA
5	POF	$11,7 \pm 1,7 \text{ kGy}$, $28,6 \pm 2,7 \text{ kGy}$	31 dní, 20 dní	PANOZA
		$40,4 \pm 4,0 \text{ kGy}$, $51,4 \pm 4,8 \text{ kGy}$	26 dní, 33 dní	PANOZA
		$62,9 \pm 5,9 \text{ kGy}$	42 dní	PANOZA

Kapitola 5

Měřicí metody

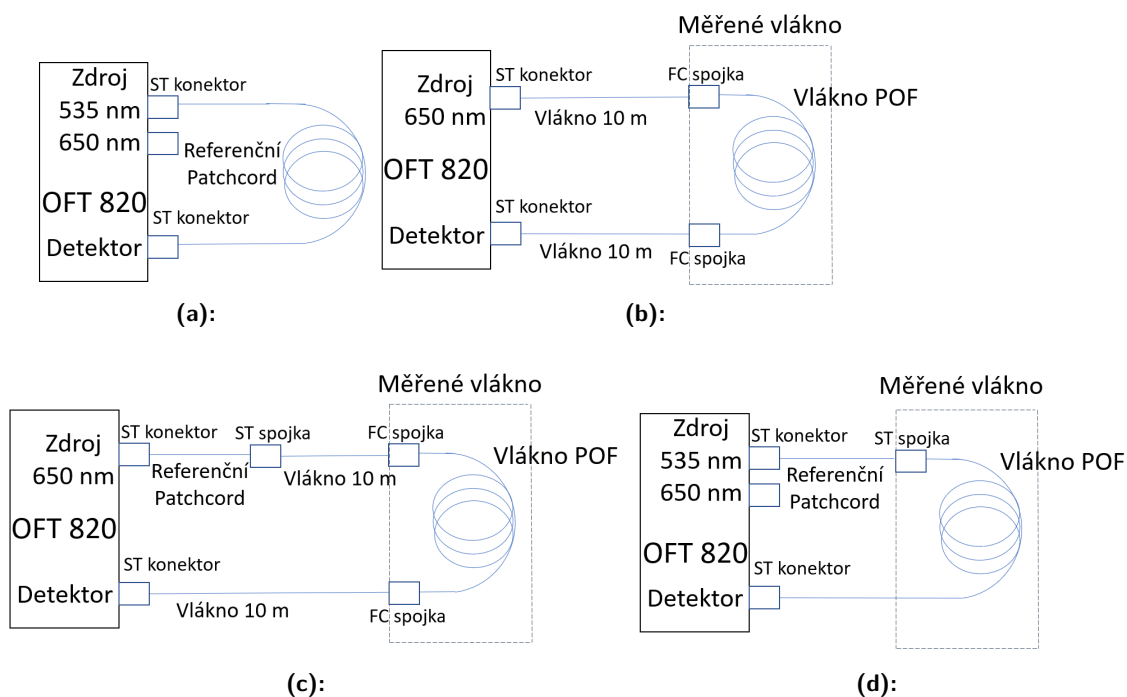
5.1 Měření optického útlumu plastových optických vláken

K měření optického výkonu a útlumu podle schémat na obrázku 5.1 byl využit měřicí přístroj OPTOKON z řady OFT-820-POF [35], který je určen pro měření telekomunikačních sítí, která využívají plastová vlákna. Tato zařízení kombinuje optický zdroj a měřič výkonu v jednom přístroji. Zdroj vysílá optické světlo do výstupního rozhraní, které je k dispozici v pracovních vlnových délkách 535 nm a 650 nm s výstupními výkony 0 dBm. Dynamický rozsah fotodetektoru je od -65 dBm do +10 dBm. Optický měřič výkonu je určen k měření absolutního nebo relativního optického výkonu v sítích POF. Kapacita paměti umožňuje uložení a odeslání až 3000 měření včetně pozice paměti nebo počtu vláken, vlnové délky, absolutní hodnoty nebo relativní hodnoty a ztráty vložení. Vyhodnocovací software SmartProtocol umožňuje připojení k řídicímu PC a data ukládat ve zvolených časových intervalech do textových dokumentů, které lze následně otevřít například pomocí aplikace Excel a naměřené výsledky dále zpracovat.

Schéma na obrázku 5.1 a) představuje provedení kalibrace přístroje, změření referenčního vlákna a uložení této hodnoty optického výkonu do paměti přístroje.

Pro měření optického výkonu plastových vláken bylo použito zapojení uvedeno na obrázku 5.1 b). Měřicí přístroj OFT 820 s LD zdrojem záření na vlnové délce 650 nm je umístěn během ozařování v řídicí místnosti bezpečně odstíněné od zdroje gama záření. Zdroj i detektor jsou připojeny k ozařovanému vláknu v ozařovací místnosti pomocí dvou 10 m dlouhých propojovacích vláken. Stejně zapojení byla použita i k měření při relaxaci prováděném v laboratoři PLANIO.

Optický útlum plastových vláken byl měřen podle schématu na obrázku 5.1 c). Nejprve byla provedena kalibrace, viz obrázek 5.1 a) a poté k němu bylo připojeno 10 m dlouhé přípojné vlákno, které jej propojovalo s ozařovaným vláknem v ozařující místnosti. Druhý konec ozařovaného vlákna byl také připojen k detektoru měřicího přístroje pomocí 10 m dlouhého propojovacího vlákna. Měřicí přístroj OFT 820 s LD zdrojem záření na vlnové délce 650 nm je



Obrázek 5.1: Schéma měření vlastností optického útlumu vláken POF s průměrem 1 mm a POF se sedmi jádry s průměrem $250 \mu\text{m}$ pomocí měřicího přístroje OFT-820-POF značky OPTOKON a) nastavení referenční (uložení měřeného optického výkonu referenčního vlákna) na vlnových délkách 535 nm nebo 650 nm, b) měření optického výkonu vlákna na vlnové délce 650 nm, c) měření optického útlumu vlákna v ozařovacích komorách ROZA a PRAZDROJ a během relaxace na vlnové délce 650 nm, d) měření optického útlumu vlákna během relaxace po ozáření v komoře PANOZA na vlnových délkách 535 nm nebo 650 nm.

umístěn během ozařování v řídicí místnosti bezpečně odstíněné od zdroje gama záření. Stejně zapojení byla použita i k měření při relaxaci prováděném v laboratoři PLANIO.

Při experimentu ozařování optických vláken v komoře PANOZA měření neprobíhalo během ozařování, a proto nebylo potřeba ozařované vlákno umístit v ozařovací komoře propojovat s měřicím přístrojem v řídicí místnosti 10 m dlouhým vláknem, 5.1 d). Díky tomu bylo také možné provést měření na dvou vlnových délkách 535 nm a 650 nm. Jinak se měřicí sestava nelišila od sestav použitých při předchozích měření.

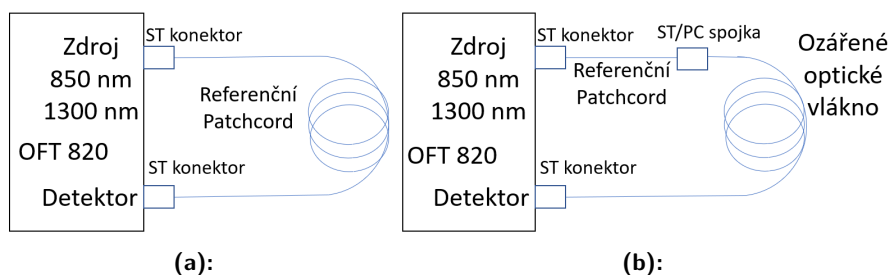
5.2 Měření optického útlumu kabelů

Pro měření optického útlumu vláken optických kabelů byly použity měřicí sestavy, jejichž kalibrace a měření jsou uvedeny na obrázcích 5.2 - 5.7. Pro přímé měření optického útlumu je nejprve potřeba provést měření optického výkonu referenčního vlákna. Tato hodnota je v měřicím přístroji uložena jako reference. Měřicí přístroj je umístěn během ozařování v řídicí místnosti

bezpečně odstíněné o zdroje gama záření. Po následném připojení ozařovaných optických vláken, jejichž konce jsou vyvedeny z ozařovací místnosti, se na displeji měřicího přístroje zobrazí jejich celková hodnota optického útlumu. Přístroje byly připojeny k řídicím PC a data byla automaticky ukládána. Stejně postupy měření byly využity i při měření relaxace, které proběhlo po ozáření v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky na ČVUT v Praze.

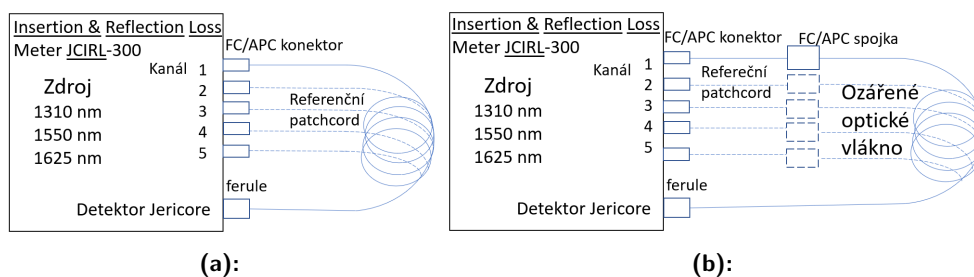
Měření optického útlumu kabelů CTDS, CTFS ozářených dávkou gama záření 10,1 kGy

Při prvním experimentu ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $10,1 \pm 1,2$ kGy (27.5.2019) byl pro měření optického útlumu na vlnových délkách 850 nm a 1300 nm MM vláken kabelu CTDS využit měřicí přístroj značky OPTOKON OFT-820 (oft-820-P2-SC-LO850/CD31) a pro měření MM vláken kabelu CTFS byl využit měřicí přístroj značky OPTOKOM OFT-820 (oft-820-P2-SC-LED850-30/LD31-35) [36]. Schéma měření a kalibrace je zobrazeno na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Schéma zapojení pro měření MM vláken při prvním experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $10,1 \pm 1,2$ kGy za použití měřicího přístroje OPTOKON OFT-820
 a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.

Optický útlum SM vláken kabelů CTDS a CTFS byl měřen na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm a 1625 nm měřicím přístrojem Insertion & Reflection Loss Meter JCIRL-300 s detektorem Jericore zapůjčený firmou OPTOKON a.s., obrázek 5.3. Měřicí přístroj disponoval pěti kanály, ke kterým byly nejprve připojeny referenční patchcordy a uloženy jejich hodnoty optických výkonů pro jednotlivé kanály do paměti přístroje, viz obrázek 5.3 a). K referenčním patchcordům byla poté připojena jednotlivá vlákna ozařovaného optického kabelu. Druhé konce měřených vláken byly postupně připojovány k detektoru a na jednotlivých kanálech měřicího přístroje odečítány hodnoty optických útlumů, viz obrázek 5.3 b).

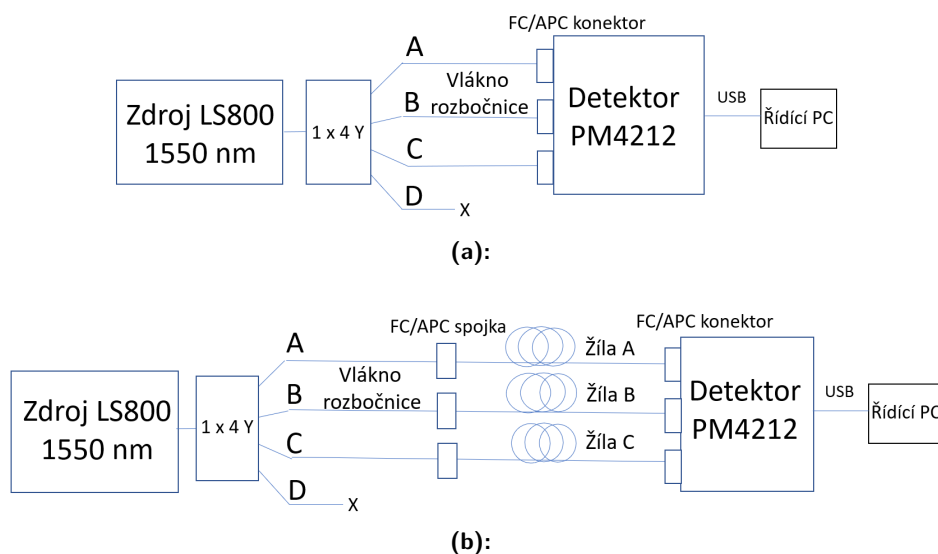


Obrázek 5.3: Schéma zapojení pro měření SM vláken při prvním experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $10,1 \pm 1,2$ kGy (27.5.2019) za použití měřicího přístroje Insertion & Reflection Loss Meter JCIRL-300 s detektorem Jericore
a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.

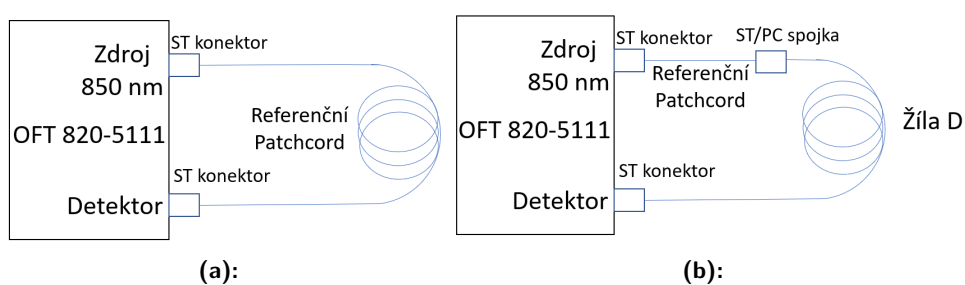
Měření optického útlumu kabelu OPK ozářeného dávkou gama záření 53,1 kGy

Při druhém experimentu ozařování optického kabelu OPK dávkou $51,3 \pm 1,7$ kGy (9.9.2019) byl pro měření SM vláken použit měřicí přístroj OPTOKON LS800 se zdrojem záření o vlnové délce 1550 nm a detektorem PM4212 zapůjčený firmou OPTOKON a.s. [37]. Zdroj záření byl připojen na optickou rozbočnici 1x4, jejíž tři výstupní vlákna byla připojena k měřicímu přístroji pro nastavení reference, viz obrázek 5.4 a). Čtvrtý výstup zůstal nezapojený, protože detektor disponoval pouze třemi vstupy. K vláknům rozbočnice byla zapojena měřená ozařovaná vlákna kabelu OPK a na detektoru byl odečítán jejich optický útlum, viz obrázek 5.4 b). Měření probíhalo automaticky a výsledky byly ukládány do řídicího PC. Stejná měřicí sestava byla použita i k měření při relaxaci po ukončení ozařování pomocí gama záření.

Stejný princip provedení kalibrace (uložení reference) byl využit i pro měření optického útlumu MM vlákna D. Optický útlum vlákna byl měřen pomocí přístroje OPTOKON OFT 820-5111 se zdrojem záření na vlnové délce 850 nm. Schéma kalibrace a měření jsou uvedena na obrázcích 5.5.



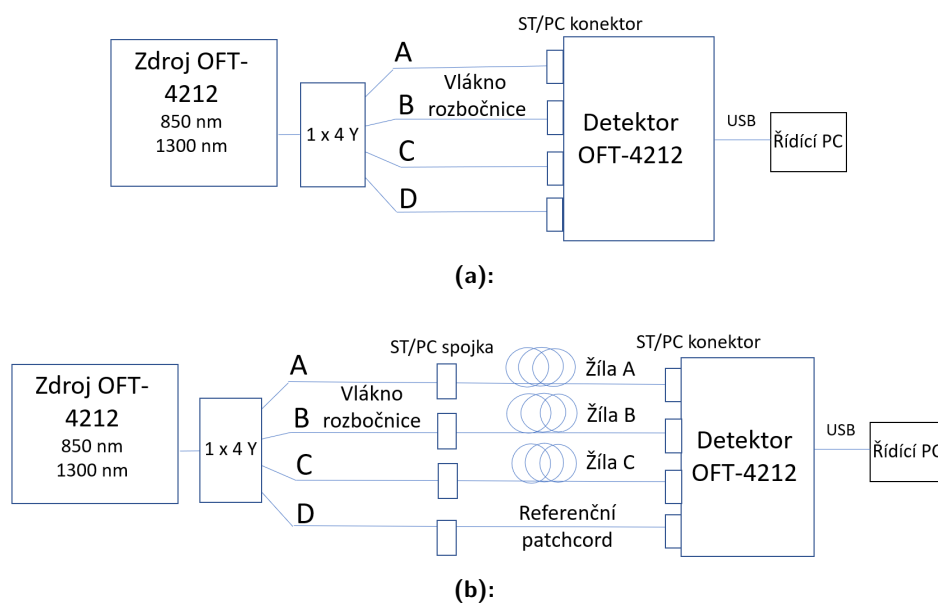
Obrázek 5.4: Schéma zapojení pro měření SM vláken při druhém experimentu - ozařování optického kabelu OPK dávkou $51,3 \pm 1,7$ kGy (9.9.2019) za použití zdroje optického záření OPTOKON LS800, optické rozbočnice 1x4 a detektoru PM4212
a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.



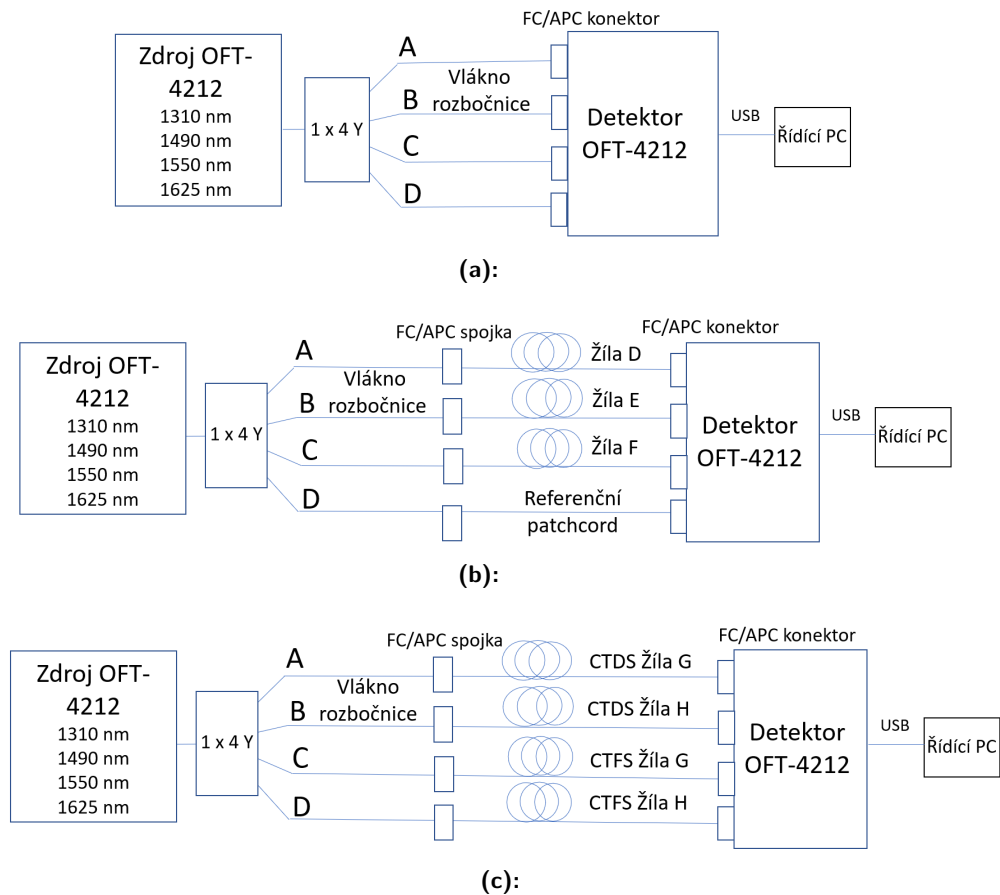
Obrázek 5.5: Schéma zapojení pro měření MM vláken při druhém experimentu - ozařování optického kabelu OPK dávkou $51,3 \pm 1,7$ kGy (9.9.2019) za použití měřícího přístroje OPTOKON OFT-820
a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.

Měření optického útlumu kabelů CTDS, CTFS ozářených dávkou gama záření 65,5 kGy

Při třetím experimentu ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $65,5 \pm 7,4$ kGy byly využity pro měření optického útlumu 4 kanálové měřící přístroje OPTOKON OFT 4212 zapůjčené firmou OPTOKON a.s. Pro měření MM vláken byly poskytnuty měřící přístroje se zdroji záření na vlnových délkách 850 nm a 1300 nm. Pro SM vlákna byly použity měřící přístroje se zdroji na vlnových délkách 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm. Stejně jako při druhém experimentu byla ke zdroji záření připojena rozbočnice 1x4, jejíž výstupní vlákna byla připojena k měřicímu přístroji a uložena referenční hodnota optického výkonu (provedena kalibrace), viz obrázek 5.6 a) a obrázek 5.7 a). K výstupním vláknům rozbočnice byla připojena ozařovaná vlákna kabelů CTDS a CTFS a na detektoru byl odečítán jejich optický útlum, viz obrázek 5.6 b) a obrázek 5.7 b), c). Stejná měřící sestava byla pak použita i k měření při relaxaci.



Obrázek 5.6: Schéma zapojení pro měření MM vláken při třetím experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $65,5 \pm 7,4$ kGy pomocí měřících přístrojů OPTOKON OFT 4212
a) provedení kalibrace, b) vlastní měření.



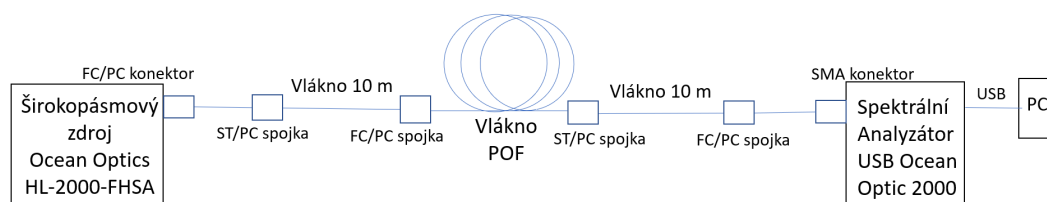
Obrázek 5.7: Schéma zapojení pro měření SM vláken při třetím experimentu - ozařování optických kabelů CTDS, CTFS dávkou $65,5 \pm 7,4$ kGy pomocí měřících přístrojů OPTOKON OFT 4212

a) provedení kalibrace, b) vlastní měření žil D,E,F b) měření žil G, H.

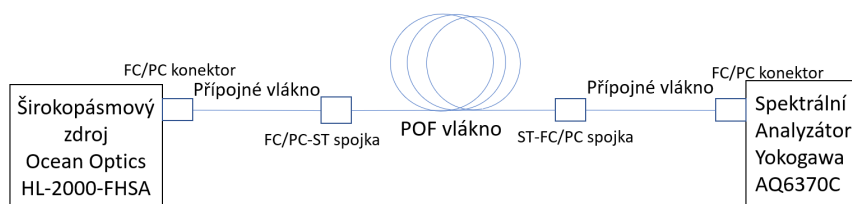
5.3 Měření spektrálních charakteristik

Měření spektrálních charakteristik plastových optických vláken

K měření spektrálních charakteristik plastových vláken byly využity dvě sestavy s dvěma různými spektrálními analyzátory. Schéma první měřicí sestavy je zobrazeno na obrázku 5.8 a). Pro měření spektrálních charakteristik plastových vláken, která byla vystavena dávkám gama záření 10,1 kGy, 51,3 kGy a 65,5 kGy, byl použit optický analyzátor USB Ocean Optics 2000 s měřicím rozsahem vlnových délek 300 až 750 nm, s rozlišením 0,1 nm a konektorem typu SMA [39], který byl přes USB kabel připojen do počítače, kde bylo možné pozorovat průběh intenzity v závislosti na vlnové délce. Jako zdroj záření byl použit širokopásmový zdroj Ocean Optics HL-2000-FHSA s rozsahem vlnových délek 360 nm - 2400 nm [40], k němuž bylo připojeno přípojné vlákno, které svými konektory FC/PC a ST/PC vyhovovalo k propojení zdroje s vláknem o délce 10 m připojenému k ozařovanému vláknu. Desetimetrová vlákna připojená z obou stran k ozařovanému vláknou, byla připojena i v tomto měření, protože byla použita při měření během ozařování. Tato vlákna propojovala ozařované vlákno v ozařovací komoře se zdrojem záření a detektorem umístěných v řídicí místnosti bezpečně odstíněné od ozařování. Ozařované vlákno bylo i z druhého konce propojeno s vláknem o délce 10 m, k jehož připojení ke spektrálnímu analyzátoru bylo zapotřebí ještě druhé přípojné vlákno vyhovující svými konektory FC/PC a SMA.



(a):



(b):

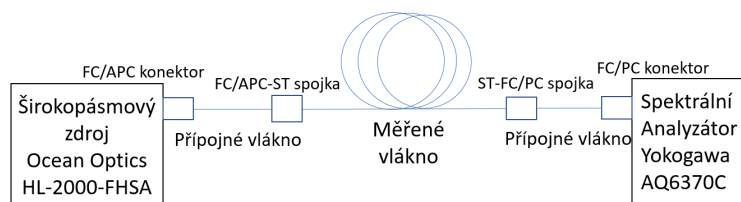
Obrázek 5.8: Měření spektrálních charakteristik POF vláken pomocí analyzátoru a) USB Ocean Optics 2000, b) Yokogawa AQ6370C.

Při experimentu pro měření spektrálních charakteristik po ozáření optických vláken v komoře PANOZA byl použit spektrální analyzátor Yokogawa AQ6370C s rozsahem vlnových délek 300 až 1200 nm a rozlišením 1 nm a dynamickým rozsahem 78 dB [41], viz obrázek 5.8 b). Opět byl použit

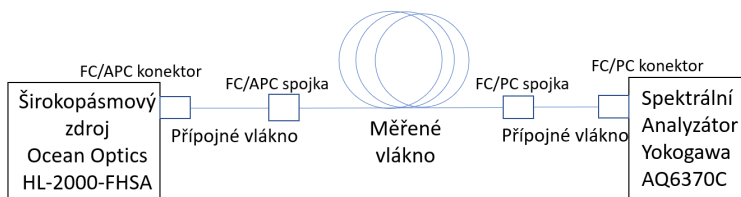
širokopásmový zdroj záření Ocean Optics HL-2000-FHSA, ke kterému bylo připojeno přípojné vlákno, které svými konektory FC/PC a ST/PC vyhovovalo k propojení zdroje s ozařovaným vláknem. Ze stejného důvodu bylo toto vlákno připojeno i k druhému konci ozařovaného vlákna a připojeno ke spektrálnímu analyzátoru Yokogawa AQ6370C. Závislost optického výkonu na vlnové délce byla pozorovatelná přímo na displeji spektrálního analyzátoru a výsledky byly uloženy ve formátu acii k dalšímu vyhodnocení.

Měření spektrálních charakteristik optických kabelů

Spektrální charakteristiky optických kabelů OPK, CTDS a CTFS byly měřeny měřicími soustavami, jejichž schémata jsou zobrazena na obrázcích 5.9. Použit byl spektrální analyzátor Yokogawa AQ6370C [41]. Zdrojem optického záření byl opět širokopásmový zdroj záření Ocean Optics HL-2000-FHSA [40], ke kterému bylo připojeno vlákno pomocí konektorů FC/PC a FC/APC, které propojovalo zdroj záření a měřené ozařované vlákno. Stejné propojovací vlákno bylo připojeno mezi ozářené vlákno a spektrální analyzátor Yokogawa. V případě mnohavidových vláken byla přípojná vlákna k vláknům ozářenému připojena pomocí spojek FC/APC-ST a FC/PC-ST, viz obrázek 5.9 a). V případě jednovidových vláken byly použity spojky FC/PC-ST, viz obrázek 5.9 b). Závislost optického výkonu na vlnové délce byla pozorovatelná přímo na displeji spektrálního analyzátoru a výsledky byly uloženy ve formátu acii k dalšímu vyhodnocení.



(a):



(b):

Obrázek 5.9: Měření spektrálních charakteristik optických kabelů pomocí spektrálního analyzátoru Yokogawa AQ6370C a) měření vláken MM, b) měření vláken SM.

Kapitola 6

Výsledky

6.1 Vlastnosti optických plastových vláken

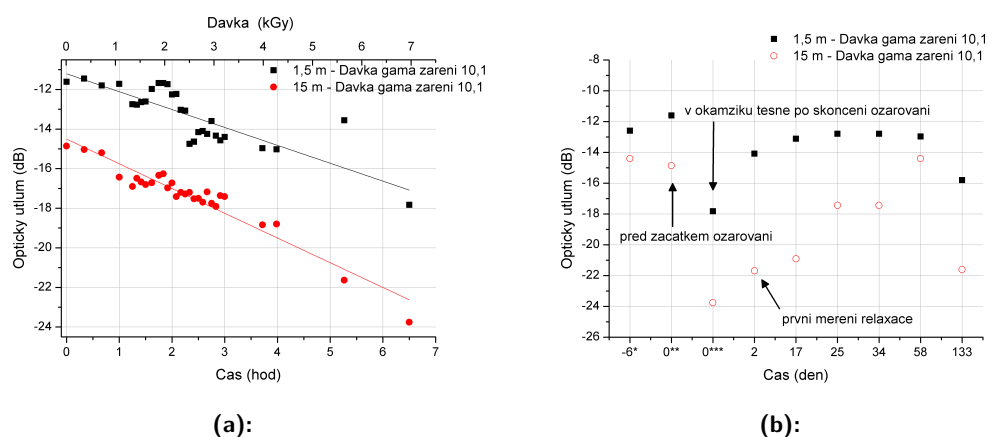
Plastové optické vlákno s průměrem 1 mm

Jak bylo výše popsáno v kapitole 4 byla plastová optická vlákna vystavená rychlému ozařování s celkovými dávkami gama záření 10,1 kGy, 51,3 kGy a 65,5 kGy v ozařovacích místnostech PRAZDROJ a ROZA. Dále probíhala pomalá ozařování optických plastových vláken v ozařovací komoře PANOZA, kde byla vlákna ozařovaná celkovými dávkami 1,24 kGy, 6,4 kGy, 11,2 kGy, 17,6 kGy, 17,7 kGy, 28,6 kGy, 40,4 kGy, 51,4 kGy a 62,9 kGy.

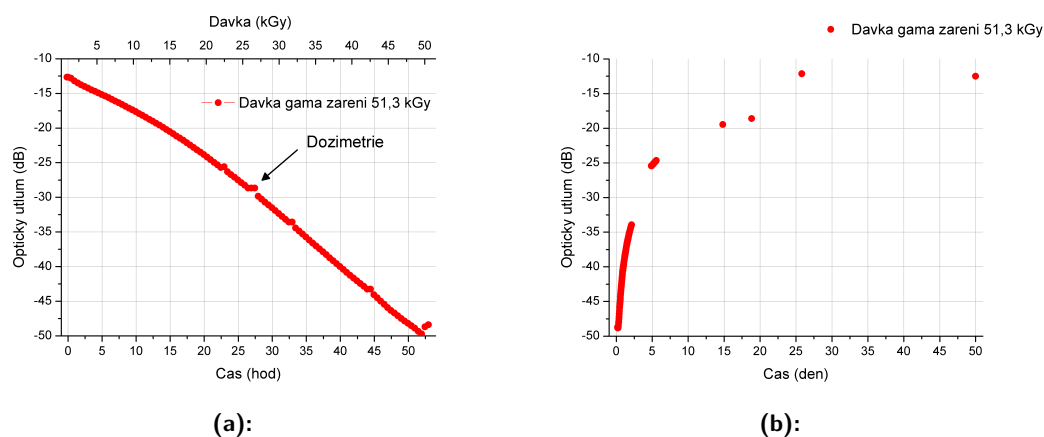
Během ozařování optických plastových vláken 1 mm celkovou ozařující dávkou 10,1 kGy byl měřen optický útlum vláken v závislosti na době ozařování a dávce gama záření. Na obrázku 6.1 a) je uveden výsledek toho měření a je patrné, že s ozařovanou dávkou optický útlum roste. Naměřené hodnoty byly proloženy lineární křivkou. Optický útlum POF vlákna o délce 1,5 m vzrostl během ozařování o 7 dB, optický útlum POF vlákna o délce 15 m téměř o 10 dB na vlnové délce 650 nm.

Na obrázku 6.1 b) jsou uvedeny výsledky měření relaxace vlastností POF vláken během relaxace po ozáření dávkou 10,1 kGy. Optický útlum má rostoucí tendenci, nejvýrazněji roste v prvních 17. dnech po ukončení ozařování. Dále se optický útlum spíše stabilizuje. Po opakování měření po 133 dnech optický útlum opět roste. Z grafu je patrné, že se při některých měření výrazněji projeví chyby měření (optický útlum na makroohybech, optický útlum způsobený překonektorováním během měření). V příloze v tabulce A.3 jsou uvedena data a dny, kdy byla měření provedena.

Průběh optického útlumu během ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy vlákna POF s průměrem jádra 1 mm je zobrazen na obrázku 6.2 a). Z průběhu křivky je patrné, že toto měření bylo výrazně přesnější než ta předchozí, díky novějšímu softwaru měřícího přístroje a automatickému odečtu optického útlumu vlákna. Měřící sestava použitá v tomto případě umožňovala automatické měření, které nevyžadovalo překonektorování, a proto výsledky měření nebyly ovlivněny. Z grafu je zřejmý téměř lineární průběh naměřených hodnot.



Obrázek 6.1: Závislost optického útlumu měřeného na vlnové délce 650 nm pro vlákno POF s průměrem jádra 1 mm o délce 5 m a 10 m a) na délce a dávce gama ozáření, b) na délce relaxace po ozáření. (* Měření před začátkem ozáření měřeno na ČVUT, ** První měření na ÚJV Řež a.s. před začátkem ozařování, *** Poslední měření ÚJV Řež a.s. v okamžiku těsně po ozáření)

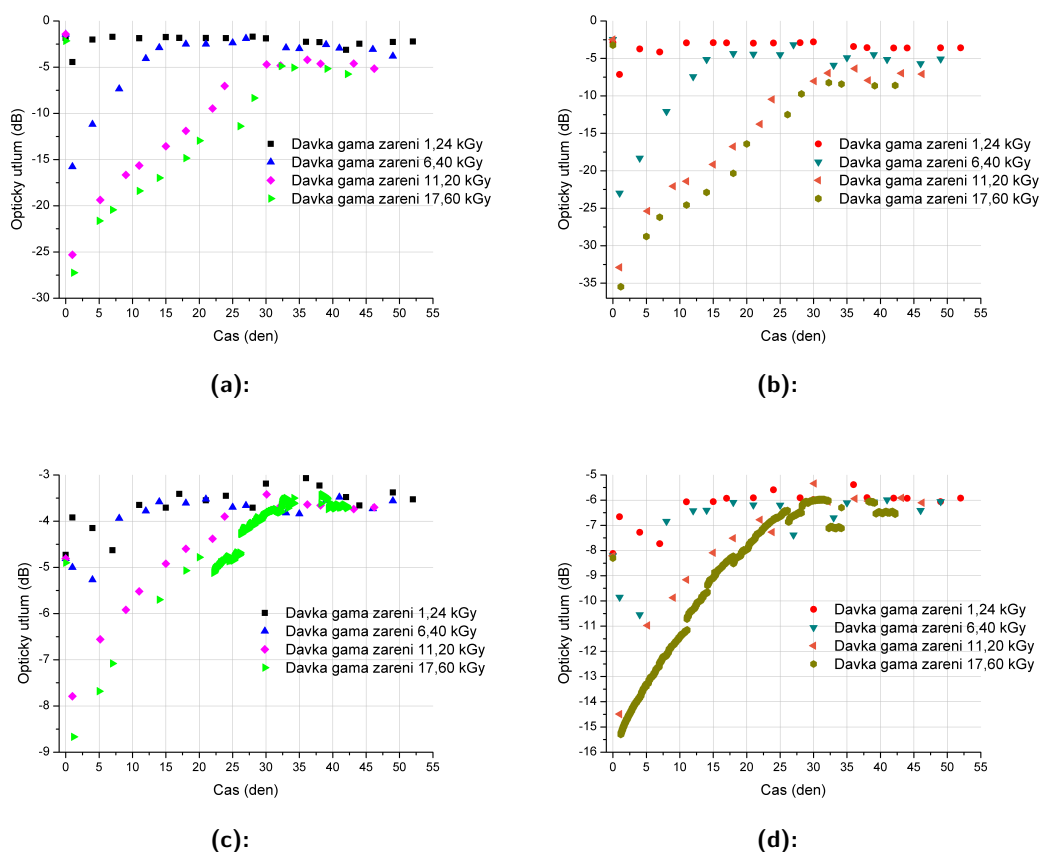


Obrázek 6.2: Výsledek měření optického útlumu měřeného na vlnové délce 650 nm vlákna POF s jádrem o průměru 1 mm o délce 10 m ozářeného dávkou 51,3 kGy a) během ozáření, b) při relaxaci.

Relaxace ozářeného vlákna POF dávkou gama záření 51,3 kGy je zobrazena na obrázku 6.2 b). Optický útlum vlákna ihned po ukončení ozáření začal klesat a klesá až do 26 dne, kdy se jeho rychlost poklesu výrazně zpomalí. Pokles útlumu z -12,66 dB před ozáření na -12,5 dB na vlnové délce 650 nm po relaxaci je dán vratnou změnou optických vlastností. Měření bylo zopakováno po 516 dnech po ukončení ozařování a naměřený optický útlum vlákna od posledního měření mírně klesl na hodnotu -9,52 dB. V příloze v tabulce A.4 jsou uvedena data a dny, kdy byla provedena měření ozařovaného vlákna celkovou dávkou 51,3 kGy.

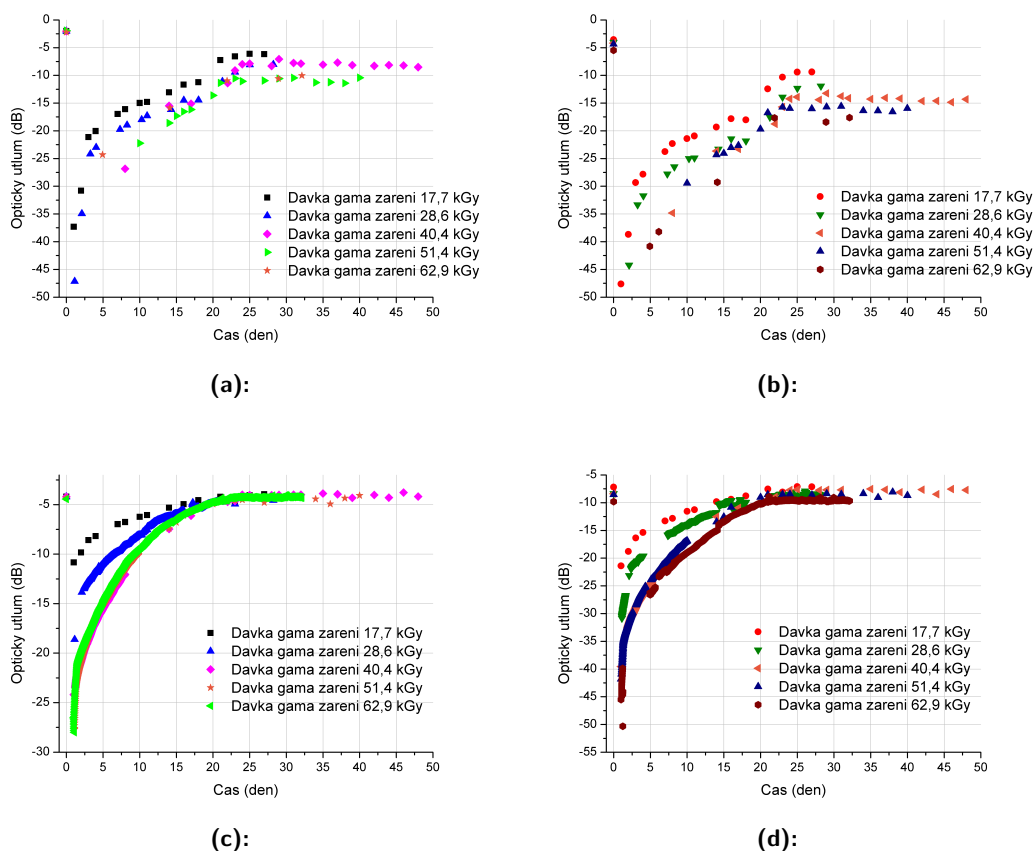
Při experimentu umístění optických vláken do ozařovací komory PANOZA

bylo použito celkem 8 POF vláken s průměrem jádra 1 mm, která byla vyndávána z ozařovací komory postupně podle dosažené ozařované dávky 1,24 kGy, 6,40 kGy, 11,20 kGy a 17,60 kGy. Z toho důvodu nebylo možné vlákna měřit online během ozařování, ale až po jejich vyndání z ozařovací komory při relaxaci. Měření probíhalo během 52 dnů po vyndání prvních vzorků. Útlumy optických vláken byly měřeny na vlnových délkách 535 nm a 650 nm a výsledky jsou zobrazeny na obrázku 6.3. Hodnota naměřená v 0. den, je hodnota optického útlumu vlákna před začátkem ozařování.



Obrázek 6.3: Relaxace POF vláken s průměrem 1 mm po ozařování zdrojem gama záření o dávkách 1,24 kGy, 6,40 kGy, 11,20 kGy a 17,60 kGy v ozařovací komoře PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm.

Z naměřených výsledků uvedených na obrázcích 6.3 je patrné, že mezi hodnotou před ozáření (0. den) a po ozáření (1. den relaxace) je viditelné zvýšení optického útlumu v závislosti na ozářené dávce a délce vlákna. Při ozáření vlákna dávkou 1,24 kGy je patrný minimální vzrůst optického útlumu, při ozáření vlákna dávkou 17,6 kGy vzroste optický útlum až o 30 dB. Výrazně větší zvýšení optické útlumu bylo naměřeno na vlnové délce 535 nm, viz obrázek 6.3 a), b). Na této vlnové délce byl zaznamenán také pomalejší

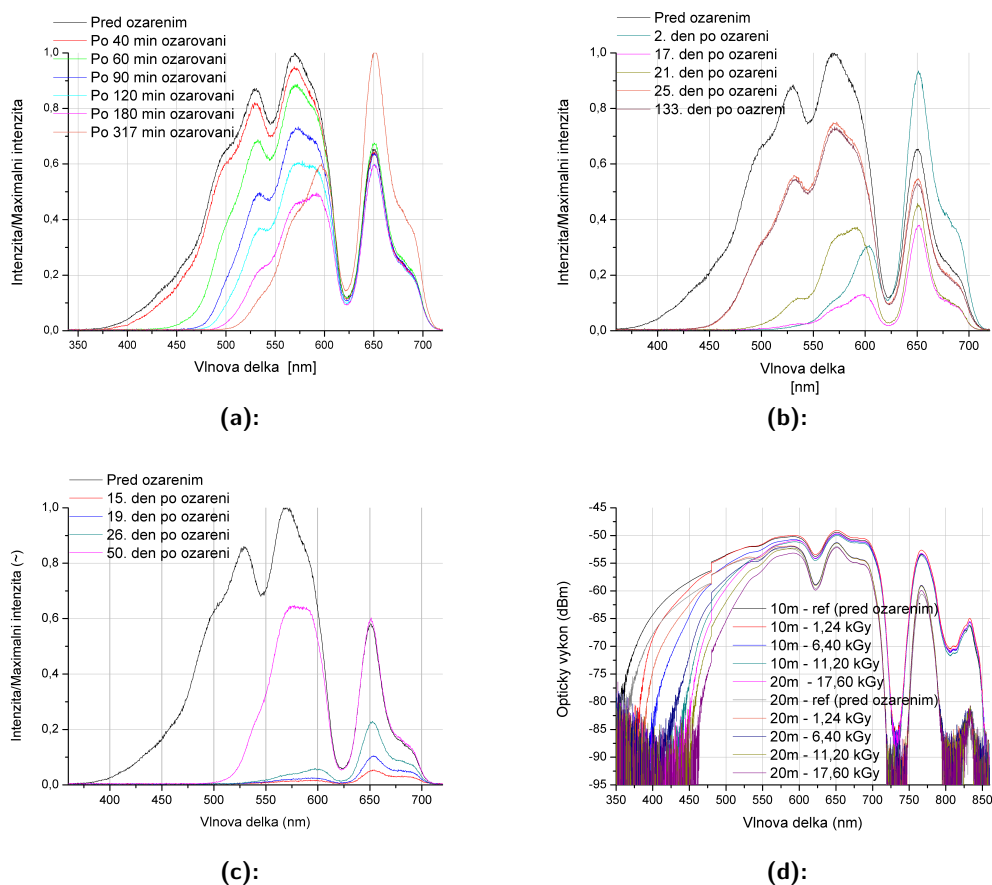


Obrázek 6.4: Relaxace POF vláken s průměrem 1 mm po ozáření zdrojem gama záření o dávkách 17,7 kGy, 28,6 kGy, 40,4 kGy, 51,4 kGy a 62,9 kGy v ozářovací komoře PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm.

Porovnáme-li průběhy relaxace vlákna o délce 10 m ozářeného v komoře PRAZDROJ (větší dávka záření za kratší čas) dávkou 51,3 kGy, obrázek 6.2 b) a vlákna o délce 10 m ozářeného v komoře PANOZA (málá dávka záření po delší čas) dávkou 51,4 kGy, obrázek 6.4 c), pak zjišťujeme, že při ozáření v komoře PRAZDROJ dochází k většímu nárůstu optického útlumu a tedy i delšímu času relaxace.

Dále byly měřeny spektrální charakteristiky a výsledky měření jsou uvedeny na obrázku 6.5. Výsledky měření jsou zobrazeny jako závislosti intenzity na vlnové délce, kde intenzita je vztahena k referenční maximální naměřené intenzitě referenčního neozářeného vlákna. Během ozáření optického vlákna dochází k velmi významnému snížení intenzity a posunu absorpční hrany, obrázek 6.5 a). Se zvyšující se dávkou záření intenzita klesá a dochází ke zvýšení absorpce jádra vlnovodu, absorpční hrana se posouvá směrem k vyšším vlnovým délkám. Intenzita světla procházející POF vláknem klesá až na 60% hodnoty před ozáření na vlnových délkách menších než 620 nm.

V okolí této vlnové délky intenzita svou hodnotu zvyšuje až na maximální naměřenou hodnotu před ozářením, viz obrázek 6.5 a). Tento trend pokračuje i po skončení ozáření, až 17 dní relaxace, kdy se hodnoty začaly vracet do stavu před ozářením, viz obrázek 6.5 b).



Obrázek 6.5: Výsledky měření spektrálních charakteristik vláken POF 1 mm měřeno spektrálním analyzátořem USB Ocean Optics 2000, a) měřeno během ozáření dávkou 10,1 kGy v ozařovací komoře ROZA, b) během relaxace po ozáření dávkou 10,1 kGy v ozařovací komoře ROZA, c) během relaxace po ozáření dávkou 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ, d) měřeno spektrálním analyzátořem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření v komoře PANOZA.

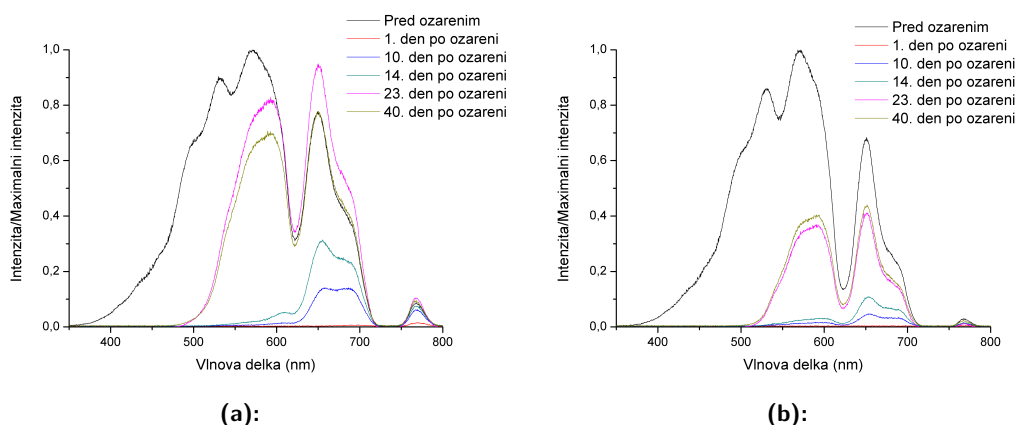
Před ozáření je absorpční hrana na vlnové délce 380 nm a vlivem ozáření dojde k posunu absorpční hrany na vlnovou délku 520 nm, viz obrázek 6.5 a). V prvních dnech po ozáření je posun absorpční hrany malý. 17. den se absorpční hrana začne posouvat směrem k hodnotě před ozáření, ale nedosáhne původní hodnoty ani po 133 dnech po ozáření, absorpční hrana se ustálí na vlnové délce 450 nm viz obrázek 6.5 b).

Porovnáme-li spektrální charakteristiky optických vláken ozářených dávkou 10,1 kGy a 51,3 kGy, obrázky 6.5 b) a c), pak můžeme pozorovat, že při ozáření vyšší dávkou dochází k poklesu intenzity i na vlnových délkách vyšších než 620 nm a většímu posunu absorpční hrany na 550 nm. Při relaxaci u

obou vláken dochází ke snížení absorpce a tedy ke zvýšení intenzity. Hodnota absorpce při relaxaci POF ozářeného dávkou 51,3 kGy je pozorována na vyšší vlnové délce než u vlákna ozářeného dávkou 10,1 kGy.

Optické spektrum vláken umístěných do ozařovací komory PANOZA bylo měřeno poslední den měření relaxace 52. den po ozáření, viz obrázek 6.5 b). Během ozáření dochází k posunu absorpce v závislosti na dávce ozáření a délce ozařovaného vlákna. Posun absorpční hrany vláken ozářených v komoře PANOZA je nižší než u vláken ozářených v komorách PRAZDROJ a ROZA.

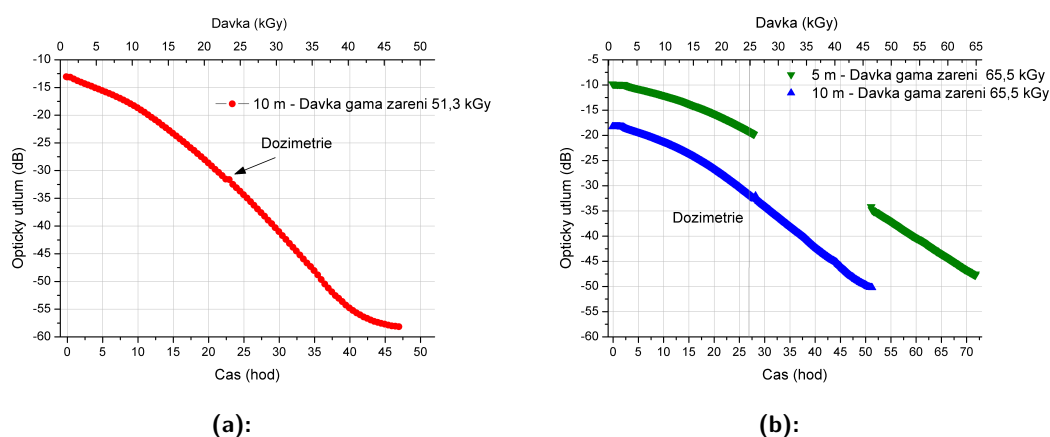
Při druhém experimentu ozařování plastových optických vláken v komoře PANOZA byly jejich optické spektrální charakteristiky měřeny během relaxace. Na obrázku 6.6 jsou uvedeny výsledky měření pro vlákna o délce 10 m (obrázek 6.6 a)) a 20 m (obrázek 6.6 b)) ozářená dávkou gama záření 51,3 kGy. Lze tak porovnat spektrální charakteristiky vláken o délce 10 m ozářených v komoře PANOZA (obrázek 6.6 a)) a PRAZDROJ (obrázek 6.5 c)) při relaxaci po ozáření téměř totožnou dávkou. U obou vláken dochází při ozáření k podobnému poklesu intenzity a posunu absorpční hrany až na vlnovou délku 550 nm. Během relaxace se pak rovněž u obou vláken absorpční hrana posouvá zpět až na vlnovou délku 550 nm a intenzita roste a na hodnotu před ozářením, ale původní hodnoty nedosáhne.



Obrázek 6.6: Výsledky měření spektrálních charakteristik vláken POF 1 mm měřeno spektrálním analyzátořem USB Ocean Optics 2000 během relaxace po ozáření dávkou gama záření 51,4 kGy v komoře PANOZA, a) vlákno o délce 10 m, b) vlákno o délce 20 m.

Vlastnosti optického polymerního vlákna se 7 jádry s průměrem 250 μm

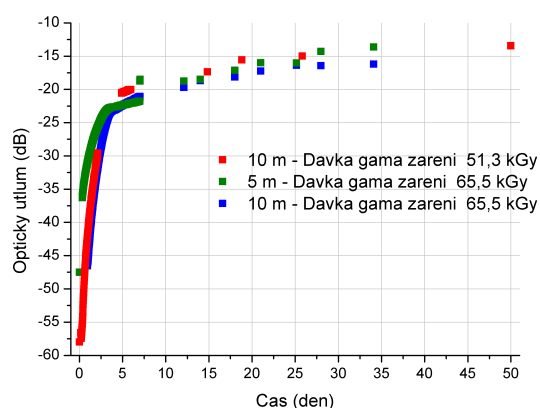
Během ozařování byl měřen výkon plastových optických vláken se sedmi jádry o průměru 250 μm v závislosti na době ozařování a dávce záření. Na obrázku 6.7 a) je zobrazen průběh optického útlumu vlákna o délce 10 m během ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy měřeno na vlnové délce 650 nm a na obrázku 6.7 b) je zobrazen průběh optického útlumu vláken o délce 5 m a 10 m během ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy měřeno na vlnové délce 650 nm. Z grafů je patrná téměř lineární závislost nárůstu optického útlumu na ozařující dávce. Při větší ozařující dávce, obrázek 6.7 b), dochází k rychlejšímu zvýšení optického útlumu až k neměřitelně vysokým hodnotám. Optický útlum dále závisí na délce vlákna, u delšího vlákna optický útlum roste rychleji. Tento trend ale není lineární, při dvojnásobné délce vlákna není optický útlum dvojnásobný.



Obrázek 6.7: Porovnání optických útlumů svazkových optických polymerních vláken 7 x 250 μm během ozáření měřeno na vlnové délce 650 nm a) s maximální dávkou ozáření 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ, b) s maximální dávkou ozáření 65,5 kGy v ozařovací komoře ROZA.

Po ozáření klesá optický útlum nejrychleji v prvních dnech relaxace. Podle obrázku 6.8 se z hodnot neměřitelných (nižších než -58 dB) optických útlum vláken sníží až o 30 dB během 5 dní. Následující dny relaxace se dále mírně snižuje a přibližuje se hodnotám před ozářením. Po 25. dnu relaxace se útlum vláken téměř nemění, během relaxace na hodnotu klesl na hodnotu -13,44 dB (50. den). Měření optického útlumu vlákna o délce 10 m ozářeného dávkou 51,3 kGy bylo zopakováno po 516 dnech po ukončení ozařování a naměřený optický útlum vlákna byl -15,86 dB na vlnové délce 650 nm. Optický útlum vlákna od 50. den relaxace mírně stoupl. Měření optického útlumu vláken ozářených dávkou 65,5 kGy bylo zopakováno po 144 dnech po ukončení ozařování a naměřené optické útlumy vláken byly u 10 m dlouhého vlákna -17,52 dB a u 5 m dlouhého vlákna -13,55 dB. Opět se tyto hodnoty liší pouze v rámci chyby měření od hodnoty naměřené 35. den relaxace, která je uvedena v grafu. V příloze v tabulkách A.4 a A.5 jsou uvedena data a dny, kdy byla

provedena měření ozařovaného vlákna celkovou dávkou 51,3 kGy a 65,5 kGy.

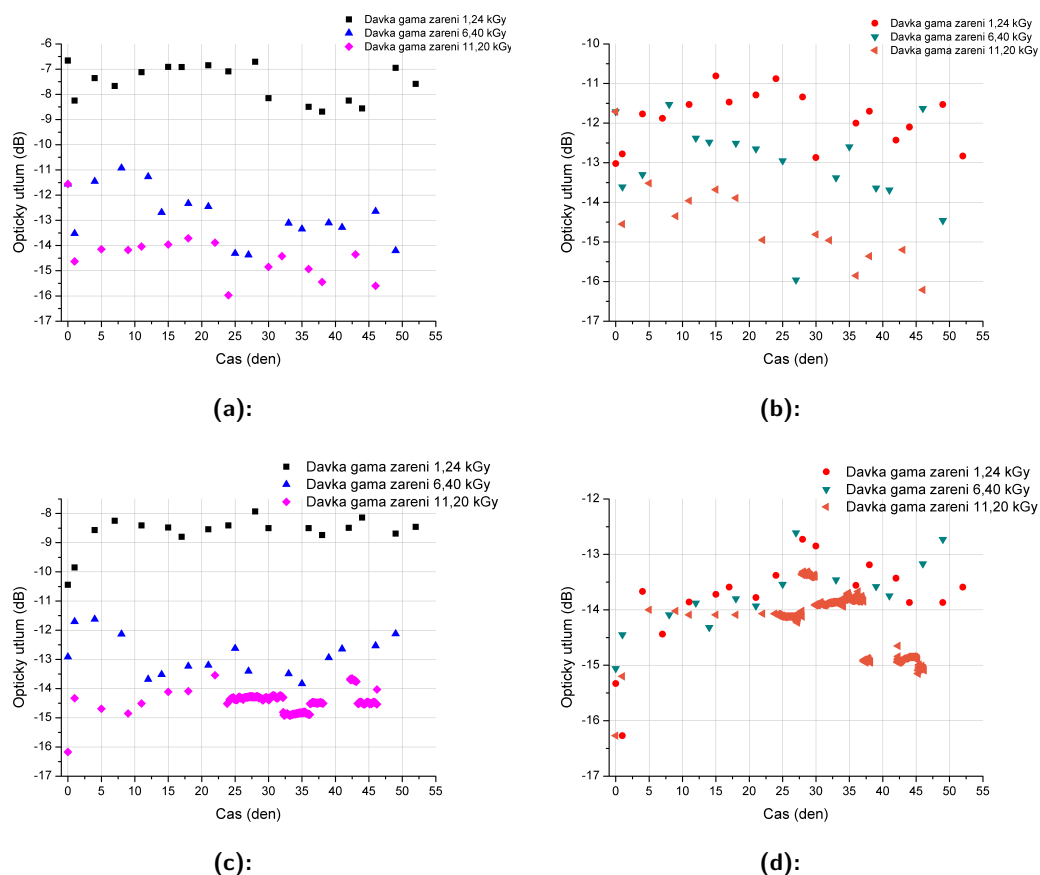


Obrázek 6.8: Porovnání optických útlumů svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru $250\ \mu\text{m}$ vystavených gama záření v ozařovacích komorách ROZA (51,3 kGy) a PRAZDROJ (65,5 kGy) při relaxaci, měřeno na vlnové délce 650 nm.

Při dalším experimentu v ozařovací komoře PANOZA (popsáno v kapitole 4) bylo použito celkem 6 POF vláken se sedmi jádry o průměru $250\ \mu\text{m}$, která byla vyndávána z ozařovací komory postupně podle ozařované dávky 1,24 kGy, 6,40 kGy, 11,20 kGy a 17,60 kGy. Z důvodu množství vláken použitých v experimentu, délce jejich ozařování a množství dostupných měřících přístrojů nebylo možné měřit optické útlumy vláken během ozařování. Měření probíhalo až po jejich vyjmutí z ozařovací komory (relaxace). Měření probíhalo během 52 dní po vyndání prvních vzorků. Útlumy optických vláken byly měřeny na vlnových délkách 535 nm a 650 nm a výsledky jsou zobrazeny na obrázku 6.9. Hodnota naměřená v 0. den, je hodnota optického útlumu vlákna před ozářením.

Na obrázcích 6.9 a) a b) jsou uvedeny hodnoty optických útlumů měřených na vlnové délce 535 nm. Z naměřených výsledků je patrné mírné zvýšení optického útlumu (maximálně o 3 dB) mezi hodnotou před ozářením (0. den) a po ozáření (1. den relaxace). Při měření optických útlumů na vlnové délce 650 nm se rozdíl hodnot před a po ozáření pohybují na úrovni chyby měření, obrázky 6.9 c) a d). Během relaxace nedochází k výraznému zvýšení nebo snížení ($\pm 2\ \text{dB}$) optického útlumu vláken na obou vlnových délkách. Nízká dávka gama záření má malý vliv na optický útlum, a proto jsou pozorované změny hodnot na úrovni chyby měření. Chyba měření u vláken se sedmi jádry s průměrem μm může být dána častým překonektorováním a manipulací s vlákny, kdy může docházet k makroohybům nebo mírnému poškození čel vláken.

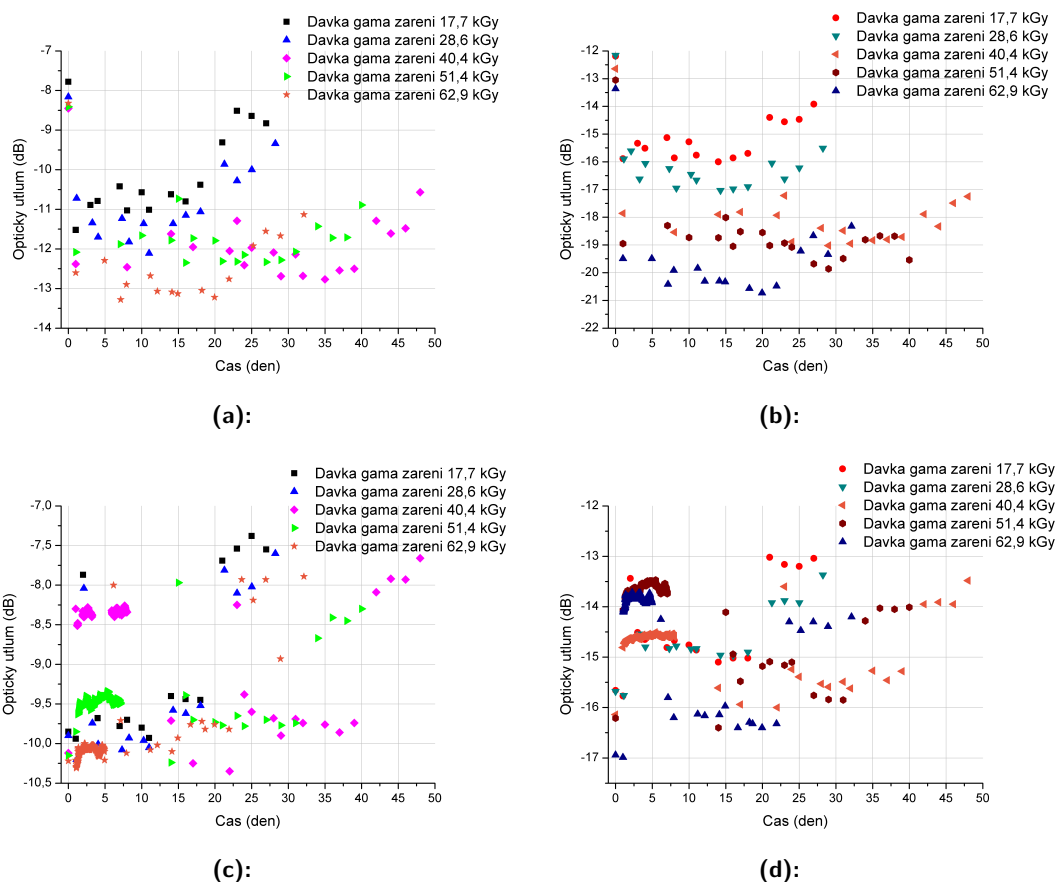
Jelikož optické útlumy plastových vláken po ozáření v komoře PANOZA ani při ozáření dávkou 17,6 kGy nedosahovaly na vlnové délce 650 nm vysokých nebo neměřitelných hodnot, byl proveden dodatečný experiment, při kterém



Obrázek 6.9: Relaxace svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru $250 \mu\text{m}$ po ozařování dávkou gama záření 1,24 kGy, 6,40 kGy, 11,20 kGy a 17,60 kGy zdrojem záření PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm.

byly použity vyšší dávky gama záření. Optická plastová vlákna se sedmi jádry o průměru $250 \mu\text{m}$ byla vyndávána z ozařovací komory postupně podle dosažené ozařované dávky 17,7 kGy, 28,6 kGy, 40,4 kGy, 51,4 kGy a 62,9 kGy. Z toho důvodu nebylo možné vlákna měřit online během ozařování, ale až po jejich vyndání z ozařovací komory při relaxaci. Měření probíhalo během 48 dnů po vyndání prvních vzorků. Útlumy optických vláken byly měřeny na vlnových délkách 535 nm a 650 nm a výsledky jsou zobrazeny na obrázku 6.10. Hodnota naměřená v 0. den, je hodnota optického útlumu vlákna před začátkem ozařování.

Na obrázku 6.10 je patrné, že mezi hodnotou před ozářením (0. den) a po ozářením (1. den relaxace) není vidět výrazné zvýšení optického útlumu. K mírnému snížení optického útlumu dochází 20. den relaxace u vláken o délce 10 m ozářených dávkami 17,7 kGy a 28,8 kGy, obrázek 6.10 a) a c). Při měření ostatních ozářených vláken na vlnové délce 535 nm, obrázky 6.10 a) a



Obrázek 6.10: Relaxace svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru $250 \mu\text{m}$ po ozařování zdrojem záření PANOZA a) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 535 nm, b) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 535 nm, c) vlákno o délce 10 m měřeno na vlnové délce 650 nm, d) vlákno o délce 20 m měřeno na vlnové délce 650 nm.

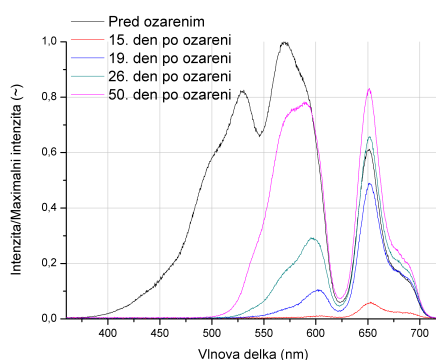
b), nedochází během relaxace k výraznému snížení nebo zvýšení optického útlumu, a proto rozptyl hodnot bude spíše dán chybou měření ($\pm 1 \text{ dB}$), která může být dána častým překonektorováním a manipulací s vlákny, kdy může docházet k makroohybům nebo mírnému poškození čel vláken. Na vlnové délce 650 nm je patrný větší vliv manipulace s vlákny na hodnoty naměřených optických útlumů, obrázek 6.10 c) a d). Rozdíly mezi naměřenými hodnotami jsou přisuzovány spíše chybě měření než změně vlastností optických vláken.

Výrazný rozdíl v nárůstu optických útlumů během ozáření a jeho vývoj při relaxaci je spatřován v metodě ozařování. Během ozařování větší dávkou gama záření na kratší časový úsek (komory ROZA a PRAZDROJ) dochází k velkému nárůstu optického útlumu (o 40 dB) až k neměřitelným hodnotám optického útlumu. Při relaxaci optický útlum postupně klesá až k hodnotám před ozářením, ale hodnot před ozářením není dosaženo, přičemž největší pokles se odehrává v prvních dnech relaxace. Oproti tomu po ozařování malou dávkou gama záření po delší čas (komora PANOZA) dochází k velmi mírnému nárůstu

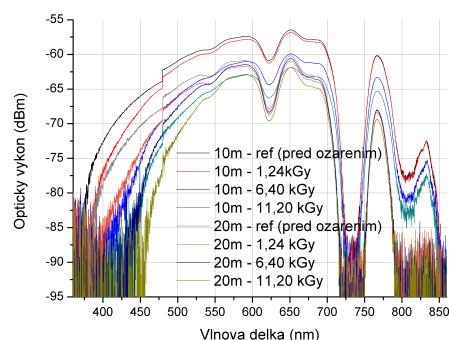
optického útlumu (maximálně o 8 dB), ovšem během relaxace nedochází k žádným výrazným změnám a je zde větší vliv chyby měření.

Dále byly měřeny spektrální charakteristiky a výsledky měření jsou uvedeny na obrázku 6.11. Výsledky měření jsou zobrazeny jako závislosti intenzity na vlnové délce, kde intenzita je vztažena k referenční maximální naměřené intenzitě referenčního vlákna neozařeného vlákna. Měření bylo provedeno pro vlákna ozářené dávkou 51,3 kGy a bylo provedeno 15 den relaxace, viz obrázek 6.11 a). Během ozáření došlo k velmi výraznému snížení intenzity a k posunu absorpční hrany z vlnové délce 380 nm na vlnovou délku 630 nm. V následujících 50. dnech relaxace dochází k opětovnému nárůstu intenzity především v oblasti vlnových délek v okolí 650 nm, kde je její hodnota po relaxaci vyšší než před ozářením. Vlnová délka absorpční hrany se začne postupně posouvat směrem k hodnotě před ozářením, ale nedosáhne původní hodnoty před ozářením, posun absorpční hrany se zastaví na vlnové délce 500 nm.

Optické spektrum vláken umístěných do ozařovací komory PANOZA bylo měřeno 52. den po ozáření, viz obrázek 6.11 b). V závislosti na ozařující dávce dochází k velmi mírnému posunu absorpční hrany u ozářených vláken a rovněž k mírnému poklesu optického výkonu.



(a):

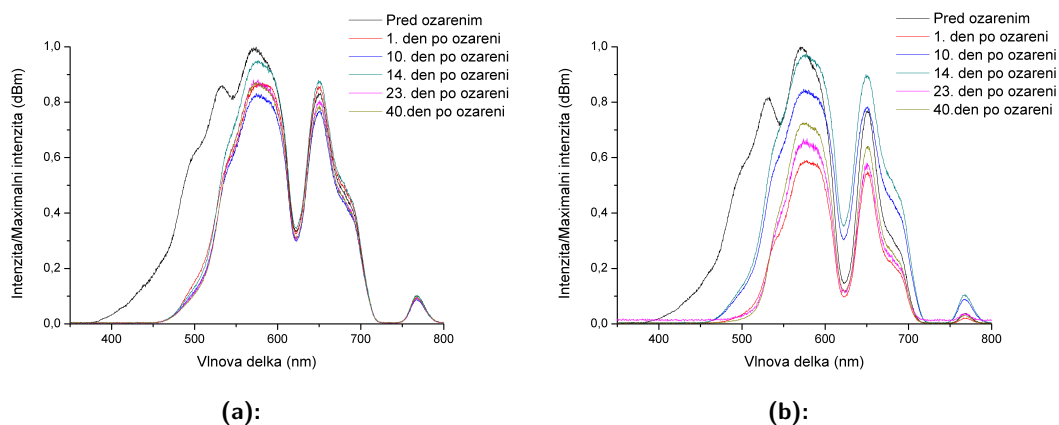


(b):

Obrázek 6.11: Výsledky měření spektrálních charakteristik svazkových optických polymerních vláken se sedmi jádry o průměru 250 μm a) ozářeno dávkou 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ a měřeno na spektrálním analyzátoru Ocean Optics, b) ozářeno v komoře PANOZA a měřeno na spektrálním analyzátoru Yokogawa.

Při druhém experimentu ozařování plastových optických vláken v komoře PANOZA byly jejich optické spektrální charakteristiky měřeny během relaxace. Na obrázku 6.12 jsou uvedeny výsledky měření pro vlákna o délce 10 m (obrázek 6.6 a)) a 20 m (obrázek 6.12 b)) ozářená dávkou gama záření 51,4 kGy. Lze tak porovnat spektrální charakteristiky vláken o délce 10 m ozářených v komoře PANOZA (obrázek 6.12 a)) a PRAZDROJ (obrázek 6.11 a)) při relaxaci po ozáření téměř totožnou dávkou. Během ozáření dochází u obou vláken k podobně mírnému poklesu intenzity na vlnové délce 650 nm, která se během relaxace opět vrací k hodnotě před ozářením. Ovšem

na vlnových délkách menších než 630 nm dochází u vlákna ozářeného v komoře PRAZDROJ k velmi výraznému poklesu intenzity na rozdíl od vlákna ozářeného v komoře PANOZA. Rovněž je rozdíl v posunu absorpční hrany, kde u vlákna ozářeného v komoře PRAZDROJ je absorpční hrana po ozáření vlákna na vlnové délce 630 nm a během relaxace se posune k vlnové délce 500 nm. Absorpční hrana vlákna ozářeného v komoře PANOZA je po ozáření na vlnové délce 460 nm a zůstává zde po celou dobu relaxace.



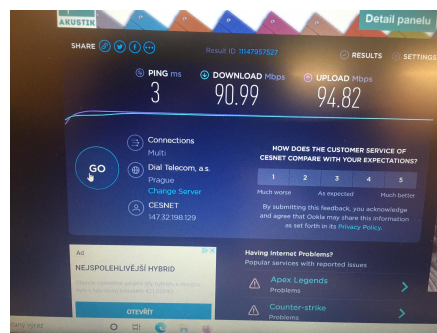
Obrázek 6.12: Výsledky měření spektrálních charakteristik vláken POF se sedmi jádry o průměru 250 μm měřeno spektrálním analyzátozem USB Ocean Optics 2000 během relaxace po ozáření dávkou gama záření 62,9 kGy v komoře PANOZA, a) vlákno o délce 10 m, b) vlákno o délce 20 m.

Měření přenosové rychlosti plastových optických vláken

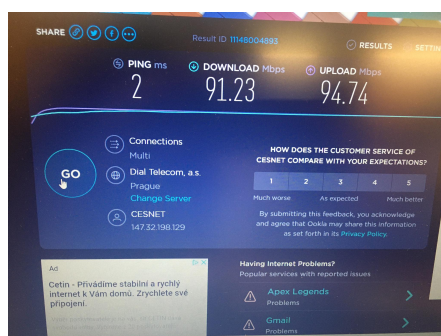
Po 194 dnech relaxace byla u optické plastové vlákna o délce 10 m s průměrem 1 mm a u optického plastového vlákna se sedmi jádry o průměru 250 μm provedeno měření jejich přenosové rychlosti. Toto měření mohlo být uskutečněno až po delší době relaxace, kdy bylo jisté, že už nebudou prováděna další měření optického útlumu vláken z důvodu odstřižení konektorů vláken. Testování přenosu pomocí připojení k internetové síti bylo provedeno za pomoci dvou přepínačů (KCD-303P-A2) s konvertory na elektrický/optický signál od firmy KTI Networks. K prvnímu přepínači byl připojen ethernetový kabel, druhý přepínač sloužil jako přijímač a byl připojen k měřicímu počítači. Oba přepínače byly propojeny měřeným plastovým optickým vláken. Výsledky měření jsou uvedeny na obrázku 6.13, kde je patrný jen minimální rozdíl mezi přenosovými rychlostmi vláken referenčních a vláken ozářených dávkou gama záření 51,3 kGy v komoře PRAZDROJ. Vliv gama záření není na přenosové rychlosti znatelný. Téměř žádný rozdíl také není v přenosové rychlosti mezi vlákny s průměrem 1 mm a vlákny se sedmi jádry o průměru 250 μm .



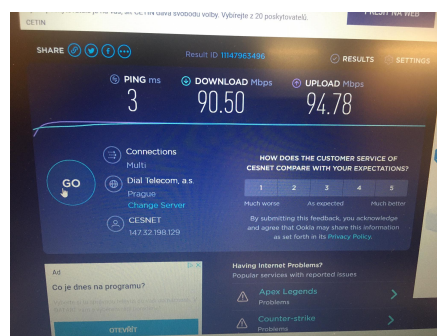
(a):



(b):



(c):



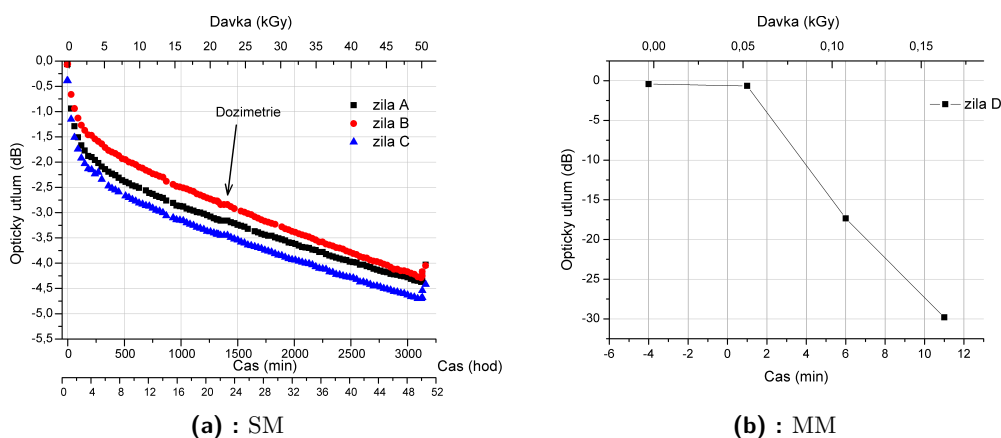
(d):

Obrázek 6.13: Výsledky měření přenosové rychlosti optických plastových vláken o délce 10 m, a) referenční měření vláken POF s průměrem 1 mm, b) měření vlákna POF s průměrem 1 mm ozářeného dávkou 51,3 kGy v komoře PRAZDROJ, c) referenční měření vláken POF se sedmi jádry o průměru 250 μm , d) měření vlákna POF se sedmi jádry o průměru 250 μm ozářeného dávkou 51,3 kGy v komoře PRAZDROJ.

6.2 Vlastnosti optického kabelu OPK

Výsledky měření optického útlumu kabelu OPK během ozařování maximální dávkou gama záření 51,3 kGy

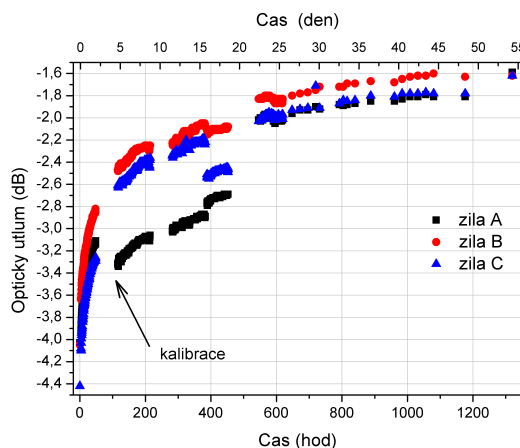
Na obrázcích 6.14 a), b) jsou uvedeny výsledky měření optického útlumu vláken optického kabelu OPK. Na obrázku 6.14 a) je patrné, že k největšímu nárůstu optického útlumu dochází v prvních osmi hodinách ozáření, kdy ozařující dávka dosáhne po osmi hodinách 7,5 kGy. Nárůst optického útlumu se jeví jako exponenciální. V následujících hodinách útlum neroste tak rychle, závislost útlumu na délce ozáření se jeví jako lineární. Po 22 hodinách byl proveden odečet ozářené dávky na dozimetru, ozařování bylo zastaveno na 8 minut. Po 51 hodinách 59 minutách ozařování byly maximální naměřené hodnoty optických útlumů pro SM vlákna žíly A $-4,37$ dB, pro žílu B $-4,29$ dB, pro žílu C $-4,70$ dB měřeno na vlnové délce 1550 nm. Na obrázku 6.14 b) optický útlum pro MM vlákno žíly D klesá velmi rychle, poslední měřitelná hodnota $-30,00$ dB byla dosažena 11 minut měřeno na vlnové délce 850 nm po začátku ozařování při odhadované dávce gama záření 0,152 kGy.



Obrázek 6.14: Závislost optického útlumu optických vláken v kabelu OPK na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 51,3 kGy pro a) optická vlákna SM - žíly A, B, C, měřeno na vlnové délce 1550 nm, b) pro optické vlákno MM - žíla D měřeno na vlnové délce 850 nm.

Výsledky měření optického útlumu optického kabelu OPK během relaxace po ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy

Na obrázku 6.15 jsou uvedeny výsledky měření optického útlumu žil A - C optického kabelu OPK. K nejprudšímu poklesu optického útlumu až o 1 dB, dochází v prvních dvou dnech po ukončení ozařování. Od 40. dne relaxace se hodnoty optických útlumů ustalují. Poslední měření proběhlo 55. den relaxace a naměřené hodnoty optických útlumů jsou pro žílu A $-1,59$ dB, pro žílu B $-1,62$ dB, pro žílu C $-1,63$ dB měřeno na vlnové délce 1550 nm. Jak je patrné z grafu, tak měření neprobíhalo ve všech dnech, pouze v těch, které jsem uvedeny v příloze v tabulce A.7. Před začátkem každého měření muselo dojít ke kalibraci měřícího přístroje a tedy k překonektorování trasy a mohlo docházet k chybám měření způsobeným zvýšeným optickým útlumem na optických spojkách. K chybě způsobené překonektorováním 0,5 dB došlo pravděpodobně 4. den u žíly A a 16. den u všech žil. Hodnota optického útlumu žíly D je stále neměřitelně vysoká.



Obrázek 6.15: Závislost optického útlumu na čase během relaxace po ozařování dávkou gama záření 51,3 kGy optického kabelu OPK pro jednovláknová optická vlákna SM - A, B, C měřeno na vlnové délce 1550 nm.

V tabulce 6.1 je uvedeno srovnání optických útlumů ozářeného optického kabelu OPK po relaxaci (55. den po ozáření) a referenčního optického kabelu OPK. U žil A, B, C se hodnoty útlumů liší přibližně o 1 dB, útlum žíly D ozářeného kabelu je neměřitelně vysoký.

Z grafů na obrázcích během ozáření a při relaxaci vyplývá, že nejmenší vliv mělo gama záření na žílu B, která měla optický útlum $-4,29$ dB na vlnové délce 1550 nm po ozáření. Po ukončení relaxaci měla ovšem nejmenší optický útlum žíla A $-1,59$ dB na vlnové délce 1550 nm. V tabulce 6.2 jsou porovnány hodnoty optických útlumů před a po ozáření.

Tabulka 6.1: Optické útlumy žil A - D optického kabelu OPK referenčního a optického kabelu OPK ozářeného měřeno 55. den po ukončení ozařování.

	vlnová délka [nm]	optický útlum [dB]	
		referenční kabel	ozářený kabel
žila A	1310	-0,23	-1,21
	1550	-0,70	-1,59
žila B	1310	-0,18	-1,24
	1550	-0,64	-1,62
žila C	1310	-0,19	-1,32
	1550	-0,24	-1,63
žila D	850	-0,49	N
	1300	-0,51	N

N - neměřitelně vysoký optický útlum

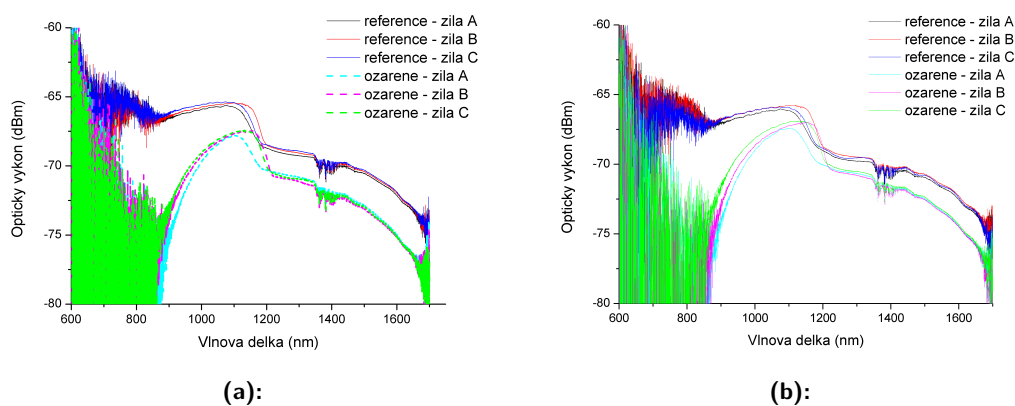
Tabulka 6.2: Srovnání optických útlumů žil A - C optického kabelu OPK před a po ozáření a po relaxaci pro vlnovou délku 1550 nm.

datum	optický útlum [dB]		
	žila A	žila B	žila C
Před ozářením	-0,06	-0,07	-0,39
Po dosažení dávky 65,5 kGy	-4,37	-4,29	-4,70
Začátek měření relaxace na ČVUT	-3,92	-3,63	-4,08
Poslední měření relaxace po ustálení opt. útlumu - 55 den	-1,59	-1,62	-1,63

Žila D optického MM vlákna měla před začátkem ozařování optický útlum $-0,41$ dB, po 11 min byl její útlum $-29,81$ dB při vlnové délce 850 nm. Optický útlum dále rostl tak prudce, že v následujících minutách už byl neměřitelně vysoký. Při relaxaci nedošlo ke snížení optického útlumu na měřitelnou hodnotu. Tento typ optického vlákna je tedy nevhodný pro použití v místech, kde by mohlo docházet k rychlému ozáření vlákna gama zářením.

Výsledky měření spektrálních charakteristik optického kabelu OPK ozářeného maximální dávkou gama záření 51,3 kGy

Na Obrázcích 6.16 jsou uvedeny spektrální charakteristiky optického kabelu OPK. Je zde uvedeno porovnání referenčního a optického kabelu OPK po ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy měřené na spektrálním analyzátoru Yokogawa AQ6370C měřeno na rozsahu vlnových délek 600 – 1700 nm. Na obrázku 6.16 a) je uvedeno měření 2. den po ukončení ozařování, na obrázku 6.16 b) je uvedeno měření 16. den po ukončení ozařování. Spektrální charakteristiky naměřené během relaxace potvrzují naměřené hodnoty optických útlumů na vlnové délce 1550 nm. Je zde patrný pokles optického útlumu mezi 2. a 16. dnem relaxace.

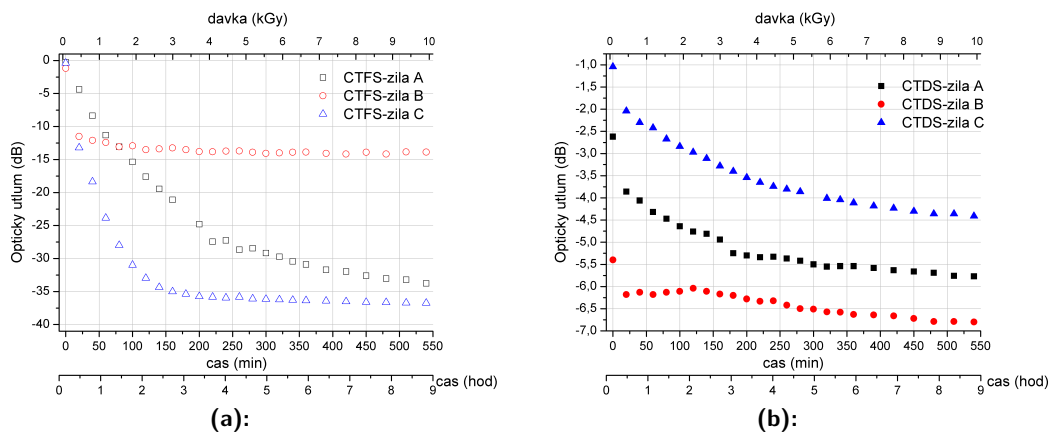


Obrázek 6.16: Vyhodnocení měření spektrální charakteristiky optického kabelu OPK referenčního a optického kabelu OPK po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy měřeno na spektrálním analyzátoru Yokogawa AQ6370C,
 a) 2. den po ukončení ozáření,
 b) 16. den po ukončení ozařování.

6.3 Vlastnosti optický kabelů CTDS a CTFS

Výsledky měření optického útlumu pro kabely CTDS, CTFS během ozařování maximální dávkou gama záření 10,1 kGy

Na obrázku 6.17 jsou zobrazeny průběhy měření optických útlumů MM vláken optických kabelů CTDS a CTFS během ozáření maximální dosaženou dávkou záření 10,1 kGy. Dny, kdy byly měřeny vlastnosti optických kabelů jsou uvedeny v příloze v tabulce A.6. Měření optického kabelu CTFS probíhalo na vlnové délce 850 nm, viz obrázek 6.17 a). Optický útlum vlákna s označením žíla A během ozařování rostl rychleji v první 4 hodinách ozařování, celkový nárůst optického útlumu byl o 29 dB. Nejmenší vliv má gama záření na vlákno s označením žíla B, kde k největšímu nárůstu optického útlumu o 10 dB dochází v prvních 50 minutách ozáření. Dále pak útlum roste jen velmi mírně, maximální optický útlum po ozáření nepřesáhl hodnotu -15 dB. Největší nárůst optického útlumu nastal u vlákna s označením žíla C. Optický útlum rostl o 36 dB. Konkrétní naměřené hodnoty jsou pro porovnání před ozáření a po ozáření uvedeny v tabulce 6.3.



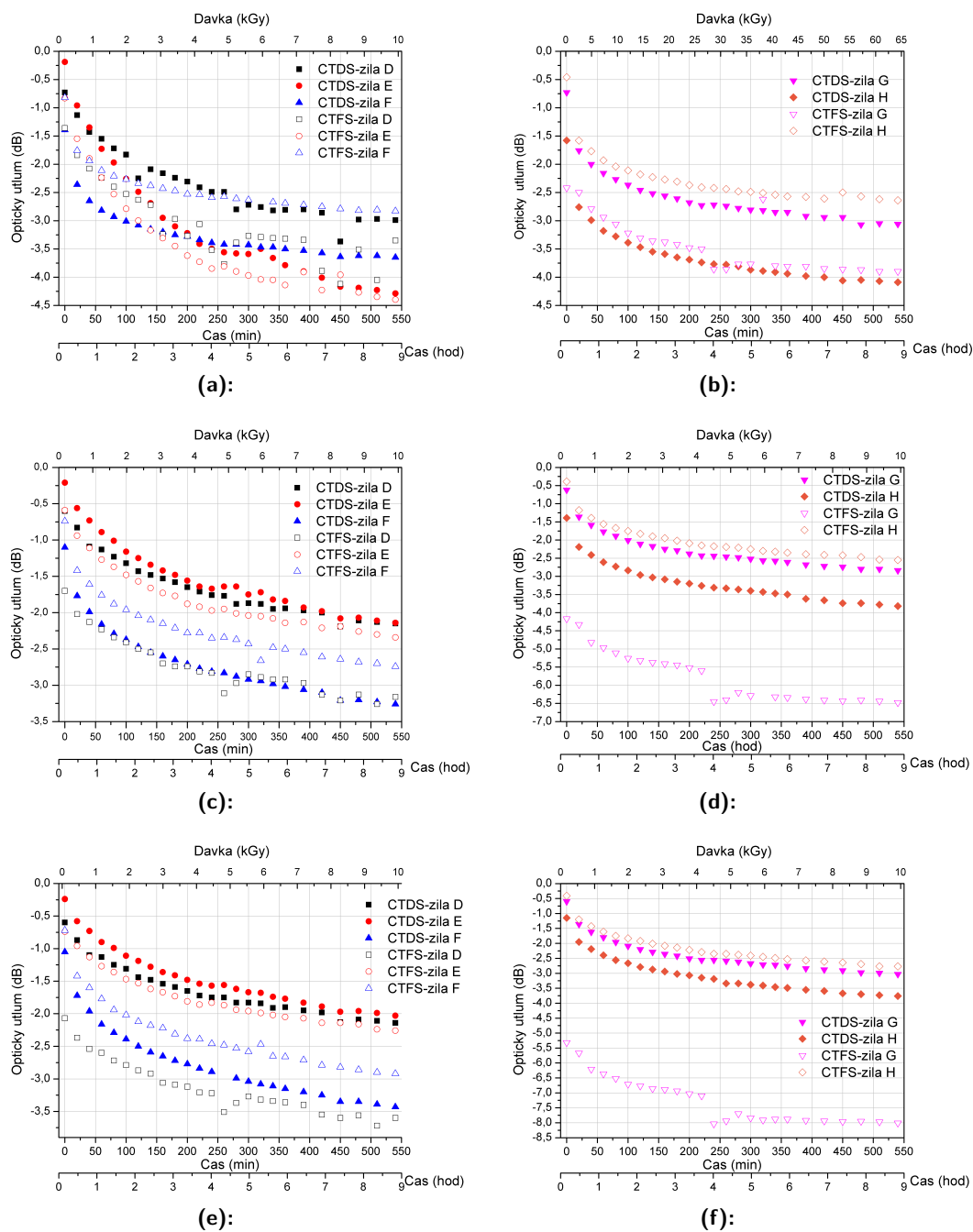
Obrázek 6.17: Závislost optického útlumu na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 10,1 kGy pro mnohavidová optická vlákna A, B, C

- výsledky pro optický kabel CTFS měřeno na vlnové délce 850 nm,
- výsledky pro optický kabel CTDS měřeno na vlnové délce 1300 nm.

Vliv gama záření na optický útlum pro optická vlákna kabelu CTDS měřeného na vlnové délce 1300 nm je uveden v grafu na obrázku 6.17 b), na kterém je optický útlum jednotlivých vláken výrazně nižší než v grafu na obrázku 6.17 a) pro vlnovou délku 850 nm. Nejmenších hodnot dosahuje optický útlum vlákna C a nejvyšších vlákno B. Průběhy optických útlumů během ozařování mají ovšem velmi podobný průběh. U žil A, C kabelu CTDS na vlnové délce 1300 nm optický útlum po ozáření vzrostl maximálně o 3,5 dB, v případě žíly B o 1,5 dB. Konkrétní naměřené hodnoty jsou pro porovnání před ozáření a po ozáření jednotlivých vláken uvedeny v tabulce 6.4.

Na obrázku 6.18 jsou zobrazeny průběhy měření optických útlumů SM

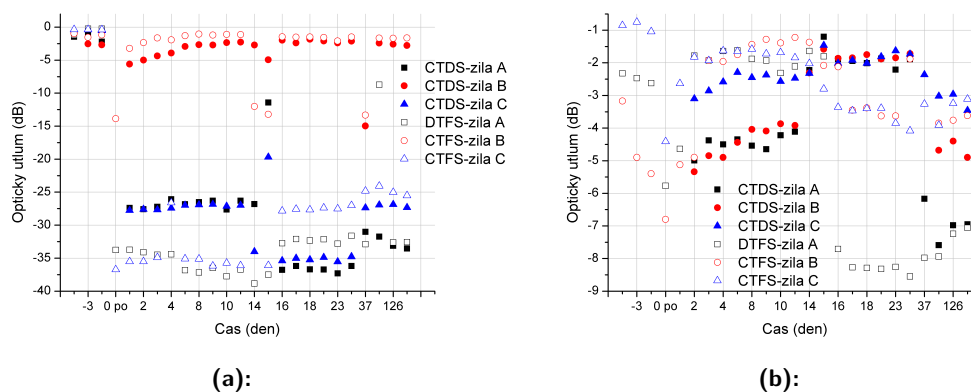
vláken optických kabelů CTDS a CTFS během ozáření maximální dosaženou dávkou záření 10,1 kGy. Dny, kdy byly měřeny vlastnosti optických kabelů jsou uvedeny v příloze v tabulce A.6. Na obrázcích 6.18 a), b) jsou zobrazeny výsledky měření na vlnové délce 1310 nm. Na této vlnové délce dosahuje vlákno D kabelu CTDS a vlákna F a H kabelu CTFS nejnižších optických útlumů (do -3 dB). Nejvyššího růstu optického útlumu (nad -4 dB) dosahují vlákna E a H kabelu CTDS a vlákno E kabelu CTFS. Na vlnových délkách 1550 nm a 1625 nm (obrázky 6.18 c) - f)) jsou průběhy optických útlumů velmi podobné. Na obou vlnových délkách 1550 nm a 1625 nm dosahují nejnižších hodnot vlákna (do -2,4 dB) D a E kabelu CTDS a vlákno E kabelu CTFS. Rovněž na obou vlnových délkách nejvyššího růstu optického útlumu dosahuje vlákno H kabelu CTDS (nad -3,7 dB na vlnových délkách 1550 nm a 1625 nm) a vlákno G kabelu CTFS (nad -6 dB na vlnových délkách 1550 nm a 1625 nm). U vláken D, E a G byl naměřen optický útlum nižší u kabelu CTDS. Naopak u vláken F a H byl nižší u kabelu CTFS. Konkrétní naměřené hodnoty jsou pro porovnání před ozářením a po ozáření uvedeny v tabulkách 6.3 a 6.4.



Obrazek 6.18: Závislost optického útlumu na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 10,1 kGy pro optické kabely CTDS a CTFS
 a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm,
 b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm,
 c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm,
 d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm,
 e) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm,
 f) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.

Výsledky měření optického útlumu pro kabely CTDS, CTFS během relaxace po ozáření maximální dávkou gama záření 10,1 kGy

Jak bylo výše zmíněno po ukončení ozařování následuje fáze relaxace, během které je měřen vývoj optického útlumu ozařovaných kabelů CTDS a CTFS. Výsledky měření jsou MM vláken zobrazeny na obrázku 6.19. Při měření na vlnové délce 850 nm, viz obrázek 6.19 a), byly naměřeny nejnižší optické útlumy u vláken B kabelů CTDS a CTFS. Nejvyšší optické útlumy vykazovala vlákna A a C kabelu CTFS ovšem jen do 15. dne měření na vlnové délce 850 nm, kdy tento den měření došlo ke snížení optických útlumů vláken A a C kabelu CTFS a naopak ke zvýšení optického útlumu až o 5 dB vláken A a C kabelu CTDS. K opětovnému zlepšení optického útlumu těchto dvou vláknem dochází 27. den měření. Od 27. dne měření až po ukončení měření 130. den se optický útlum všech měřených MM vláken mění jen nepatrně v rámci jednotek dB. Při měření na vlnové délce 1300 nm (obrázek 6.19 b) došlo k výraznějším změnám také 15. a 27. den měření. Nižší optické útlumy (až o 3 dB) byly naměřeny u vláken kabelu CTFS než u vláken kabelu CTDS právě do 15. dne měření. Dále se optický útlum vláken CTDS snížil až o 2 dB na vlnové délce 1300 nm. Nejvýraznější zvýšení optického útlumu o 6 dB bylo naměřeno u vlákna D kabelu CTFS. Od 27. dne měření do 130 dne se optické útlumy vláken příliš neměnily. Konkrétní naměřené hodnoty pro porovnání před ozáření a po ozáření jednotlivých vláken jsou uvedeny v tabulkách 6.3 a 6.4.



Obrázek 6.19: Závislost optického útlumu na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy optických kabelů CTDS, CTFS vláken MM - žíly A, B, C

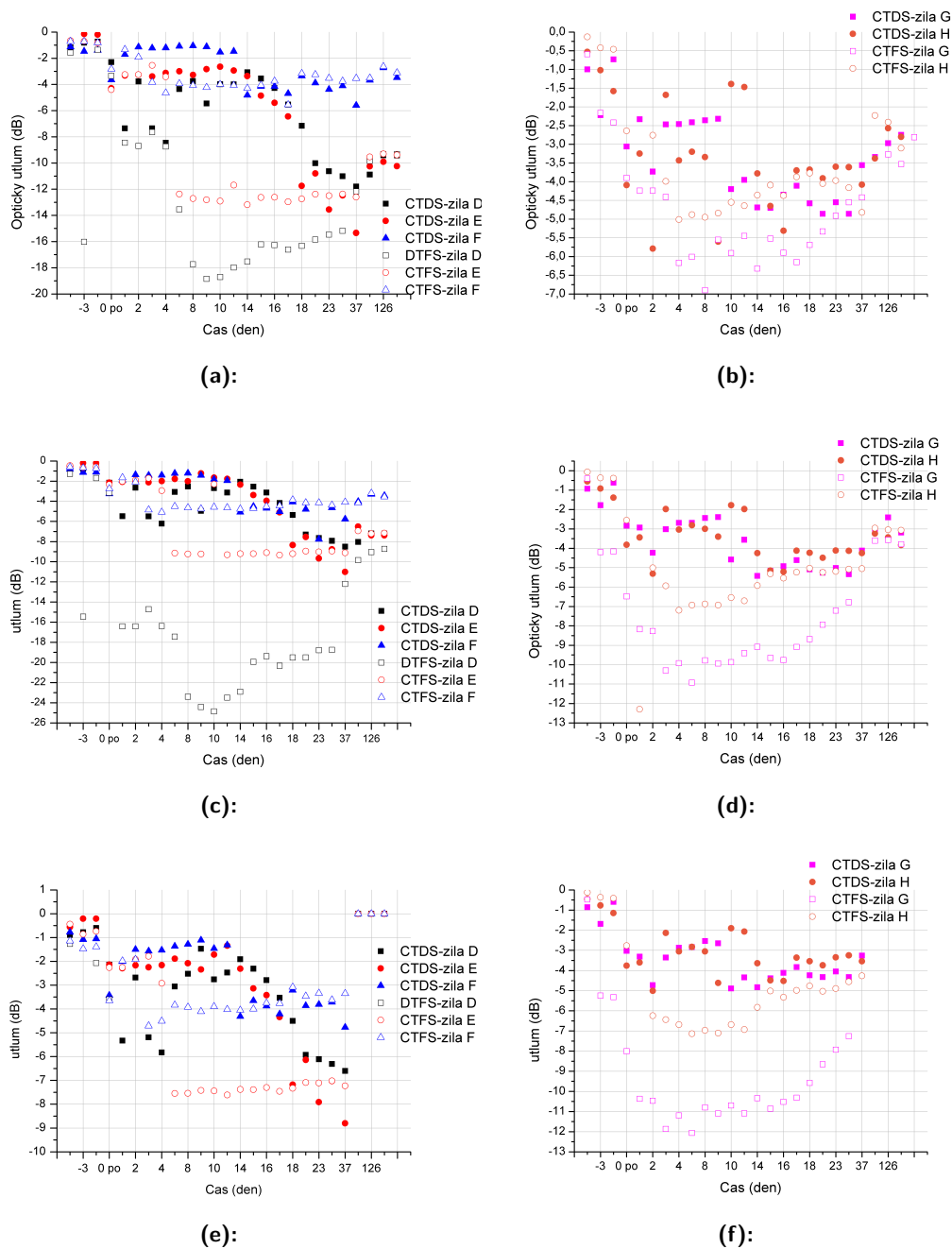
a) měřeno na vlnové délce 850 nm,

b) měřeno na vlnové délce 1300 nm.

Na obrázku 6.20 jsou zobrazeny průběhy měření optických útlumů SM vláken optických kabelů CTDS a CTFS během relaxace. V prvních 14 dnech relaxace se optické útlumy SM vláken kabelu CTDS velmi mírně snižují nebo se téměř nemění na všech měřených vlnových délkách. K mírnému nárůstu optického útlumu 14. den relaxace dochází u vláken F, G, a H, kde se jedná o

nárůst přibližně o 2 dB na všech vlnových délkách. Od 16. dne jejich optický útlum přestane stoupat, v případě vláken G a H se mírně snižuje, přibližně o 1 dB, až do 126 dne, kdy bylo měření ukončeno. Optických útlum vláken D a E kabelu CTDS od 14. dne roste o 6 - 8 dB až do 126. dne. Nejvíce stabilní naměřené hodnoty a zároveň nejnižší hodnoty optického útlumu kabelu CTFS vykazuje vlákno F tohoto kabelu. V prvních 4 dnech po ukončení ozařování kolísají hodnoty optického útlumu vláken kabelu CTFS velmi mírně v rámci chyby měření. K nárůstu optického útlumu dochází 4. den u vláken D a E až o 10 dB na všech vlnových délkách. V případě vláken G a H je tento nárůst nižší, přibližně o 2 dB. Po následující dny měření optický útlum vlákna D mírně roste. Optický útlum vlákna E se téměř nemění do 37. dne po ukončení ozařování, při posledních měřeních je patrné, že optický útlum vlákna E mírně poklesl. Pokles optického útlumu až o 4 dB je patrný u vláken G a H mezi 16. dnem a 126. dnem měření na všech měřených vlnových délkách (1310 nm, 1550 nm, 1625 nm).

U jednovlákových vláken je velmi důležitá čistota a stav jejich čel. Při překonektorování, které bylo časté při měření vlastností optických vláken kabelů CTDS a CTFS ozářených dávkou 10,1 kGy z důvodu použití měřících přístrojů uvedených v kapitole 5.2, může během měření dojít k jejich poškrábání, a tedy k nárůstu optického útlumu vlákna. Konkrétní naměřené hodnoty jsou pro porovnání před ozářením a po ozářením jednotlivých vláken uvedeny v tabulkách 6.3 a 6.4.



Obrázek 6.20: Závislost optického útlumu na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy optických kabelů CTDS a CTFS

- a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm,
- b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm,
- c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm,
- d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm,
- e) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm,
- f) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.

Tabulka 6.3: Referenční měření optického kabelu CTDS před ozáření, měření ozářeného kabelu CTDS 1. den po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTDS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).

Žíla	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]			
		před ozářením	po ozáření	1. měření na ČVUT	poslední měření
A	850	N	N	-27,40	-33,54
	1300	-2,62	-5,77	-4,64	-6,95
B	850	N	N	-5,60	-2,79
	1300	-5,4	-6,80	-5,12	-4,9
C	850	N	N	-27,76	-27,33
	1300	-1,04	-4,41	-2,63	-3,46
D	1310	-0,73	-2,29	-7,35	-9,43
	1550	-0,60	-2,15	-5,48	-7,21
	1625	-0,60	-2,14	-5,33	N
E	1310	-0,19	-4,29	-3,32	-10,24
	1550	-0,21	-2,14	-2,07	-7,38
	1625	-0,24	-2,03	-2,29	N
F	1310	-1,39	-3,65	-1,70	-3,47
	1550	-1,10	-3,26	-1,89	-3,44
	1625	-1,05	-3,43	-2,01	N
G	1310	-0,73	-3,06	-2,33	-2,75
	1550	-0,62	-2,84	-2,93	-3,19
	1625	-0,60	-3,03	-3,31	N
H	1310	-1,58	-4,09	-3,25	-2,80
	1550	-1,39	-3,82	-3,44	-3,83
	1625	-1,15	-3,76	-3,60	N

N - neměřeno z důvodu nedostupnosti zdroje záření

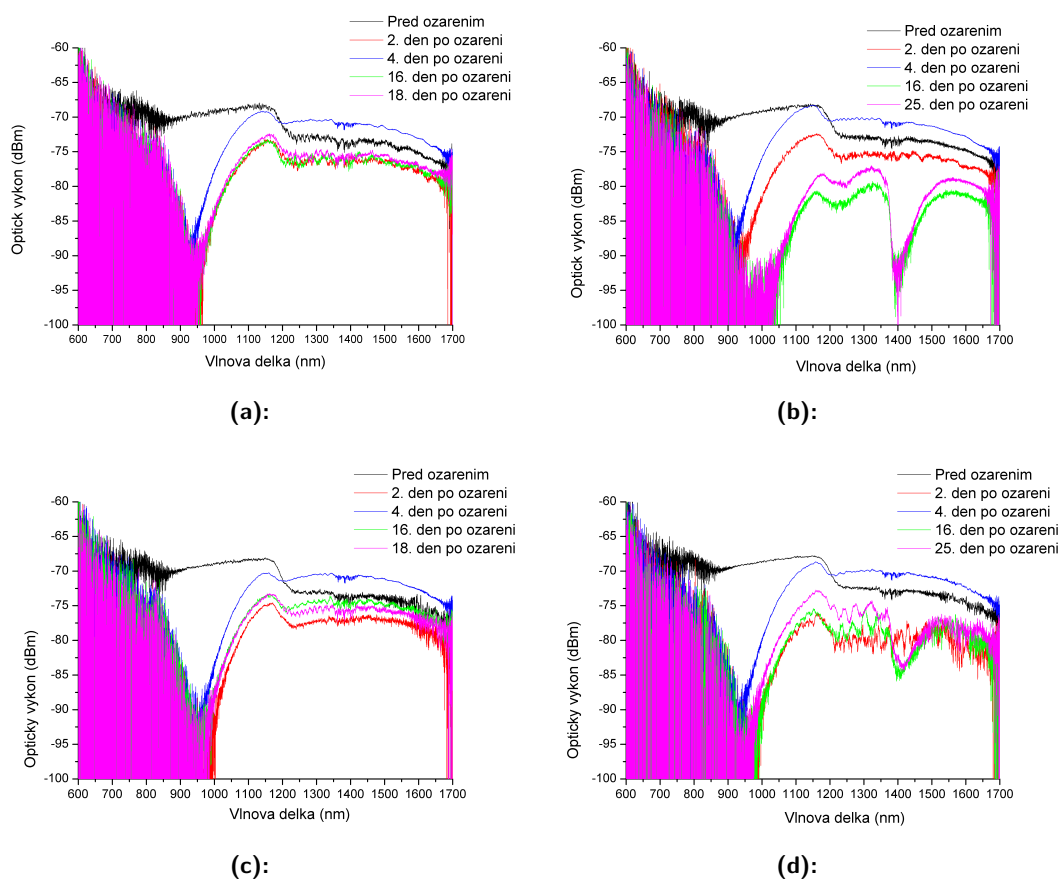
Tabulka 6.4: Referenční měření optického kabelu CTFS před ozáření, měření ozářeného kabelu CTFS 1. den po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTFS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).

Žíla	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]			
		před ozářením	po ozáření	1. měření na ČVUT	poslední měření
A	850	-0,24	-33,76	-33,75	-32,57
	1300	N	N	-1,78	-7,06
B	850	-1,17	-13,87	-3,23	-1,63
	1300	N	N	-1,92	-3,62
C	850	-0,38	-36,72	-35,50	-25,51
	1300	N	N	-1,82	-3,11
D	1310	-1,36	-3,53	-8,45	-9,32
	1550	-1,70	-3,16	-16,43	-8,73
	1625	-2,07	-3,60	-20,06	N
E	1310	-0,83	-4,40	-3,25	-9,38
	1550	-0,59	-2,34	-2,03	-7,16
	1625	-0,74	-2,26	-2,26	N
F	1310	-0,82	-2,83	-1,33	-3,11
	1550	-0,74	-2,74	-1,65	-3,56
	1625	-0,72	-2,92	-1,98	N
G	1310	-2,42	-3,90	-4,24	-2,81
	1550	-4,17	-6,48	-8,17	-3,79
	1625	-5,32	-8,01	-10,37	N
H	1310	-0,46	-2,64	-2,76	-3,10
	1550	-0,39	-2,55	-12,20	-3,07
	1625	-0,41	-2,77	-13,28	N

N - neměřeno z důvodu nedostupnosti zdroje záření

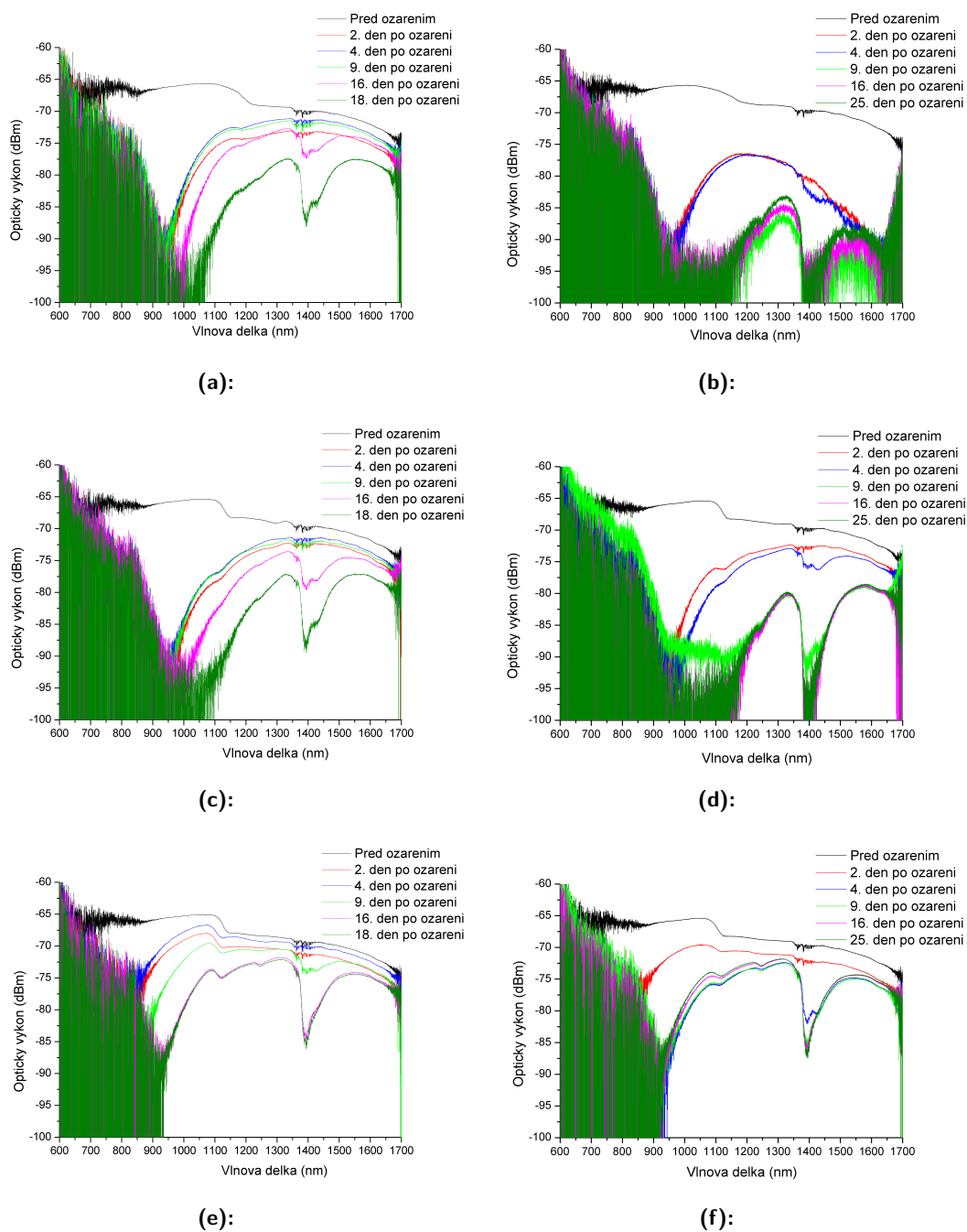
Výsledky měření spektrálních charakteristik pro kabely CTDS, CTFS ozářeného maximální dávkou gama záření 10,1 kGy

Na obrázcích 6.21 - 6.23 jsou uvedeny spektrální charakteristiky vláken optických kabelů CTDS a CTFS. Je zde uvedeno porovnání průběhů před ozářením a během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy měřené na spektrálním analyzátoru Yokogawa AQ6370C měřeno na rozsahu vlnových délek 600 – 1700 nm. Na obrázcích 6.21 jsou zobrazeny průběhy MM vláken A, B, C. Optický útlum 4. den relaxace je vyšší než 2. den, ovšem 16. den relaxace optický útlum opět klesá. Tyto výsledky korespondují s výsledky na obrázku 6.19. Při měření vlákna B došlo pravděpodobně k jeho špatnému připojení ke spektrálnímu analyzátoru, k dispozici nebylo vlákno stejného průměru 250 μm jako má vlákno B. Protože z jeho spektrální charakteristiky vyplývá, že vlákno přenáší jen velmi malý optický výkon, ale při měření jeho optického útlumu nebyly naměřeny vysoké hodnoty. Na obrázcích 6.22 - 6.23 jsou zobrazeny průběhy SM vláken D, E, F, G, H. Tyto výsledky opět korespondují s výsledky optických útlumů na obrázku 6.20. U vláken optického kabelu CTDS optický výkon 4. den relaxace vyšší než 2. den, ovšem 16. den relaxace optický výkon opět klesá. Nejnižší pokles optického výkonu po ozáření vlákna i během relaxace byl naměřen u vláken F a G kabelu CTDS. U vláken optického kabelu CTFS od 2. dne relaxace optický výkon klesá a jeho nejmenší pokles je naměřen u vláken F a H.



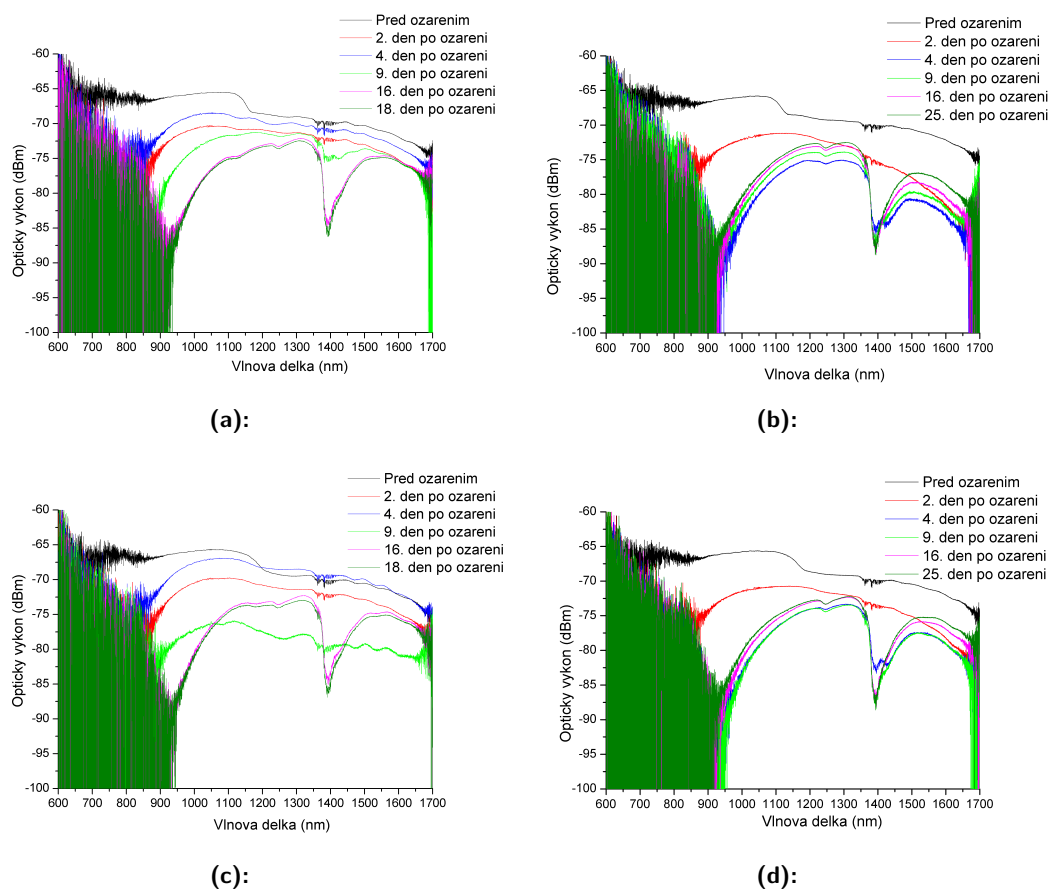
Obrázek 6.21: Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy

- a) vlákno A kabelu CTDS,
- b) vlákno A kabelu CTFS,
- c) vlákno C kabelu CTDS,
- d) vlákno C kabelu CTFS.



Obrázek 6.22: Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy

- a) vlákno D kabelu CTDS,
- b) vlákno D kabelu CTFS,
- c) vlákno E kabelu CTDS,
- d) vlákno E kabelu CTFS,
- e) vlákno F kabelu CTDS,
- f) vlákno F kabelu CTFS.

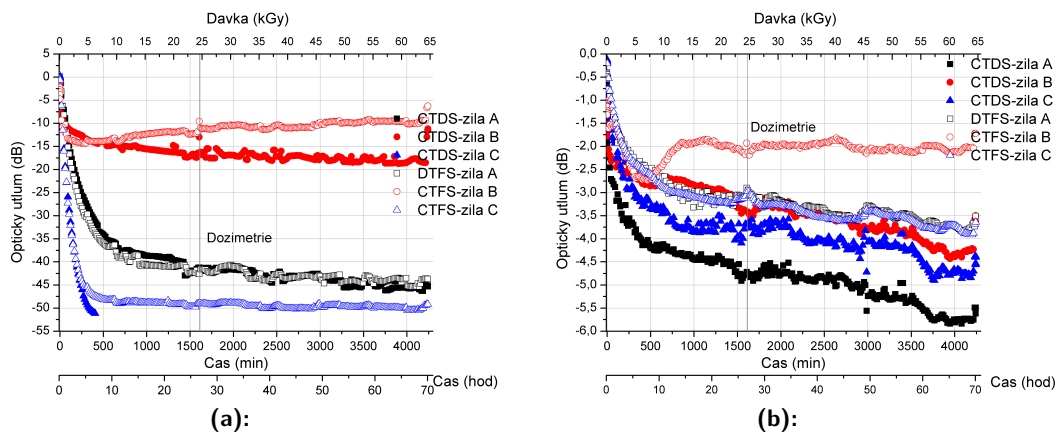


Obrázek 6.23: Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy

- a) vlákno G kabelu CTDS,
- b) vlákno G kabelu CTFS,
- c) vlákno H kabelu CTDS,
- d) vlákno H kabelu CTFS.

Výsledky měření optického útlumu pro kabely CTDS, CTFS během ozařování maximální dávkou gama záření 65,5 kGy

Na obrázku 6.24 jsou zobrazeny průběhy měření optických útlumů MM vláken optických kabelů CTDS a CTFS během ozáření maximální dosaženou dávkou záření 65,5 kGy na vlnových délkách 850 nm a 1310 nm. Nejvýraznější nárůst optického útlumu u všech měřených vláken obou optických kabelů nastává v prvních pěti hodinách ozařování. V následujících hodinách až do ukončení ozařování je pak nárůst optického útlumu výrazně mírnější. Nejnižší nárůst byl naměřen u vlákna B kabelu CTFS na obou vlnových délkách. Naopak nejvyšších hodnot (až neměřitelných) dosahuje vlákno C kabelu CTDS na vlnové délce 850 nm (obrázek 6.24 a) a vlákno A kabelu CTDS na vlnové délce 1300 nm (obrázek 6.24 b). Konkrétní naměřené hodnoty optického útlumu jsou pro porovnání před ozáření a po ozáření jednotlivých vláken uvedeny v tabulkách 6.5 a 6.6.

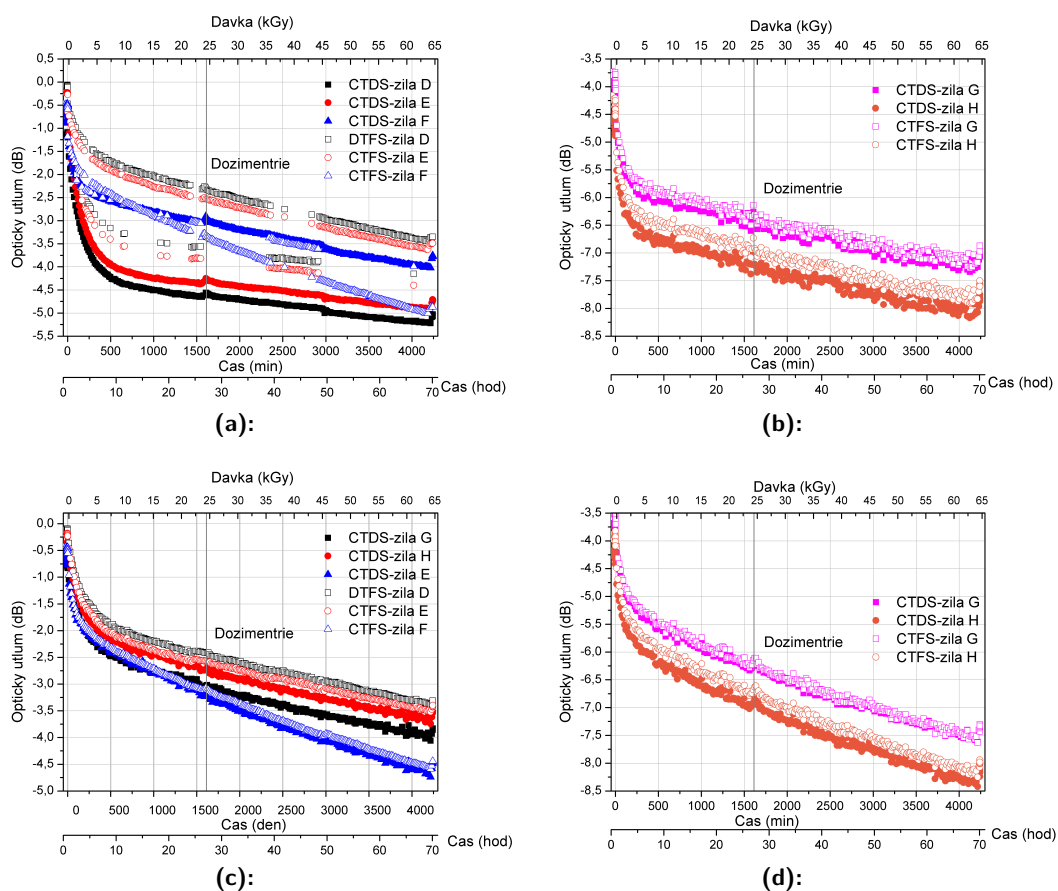


Obrázek 6.24: Závislost optického útlumu mnohavidových optických vláken na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS vláken MM - žíly A, B, C
a) měřeno na vlnové délce 850 nm,
b) měřeno na vlnové délce 1310 nm.

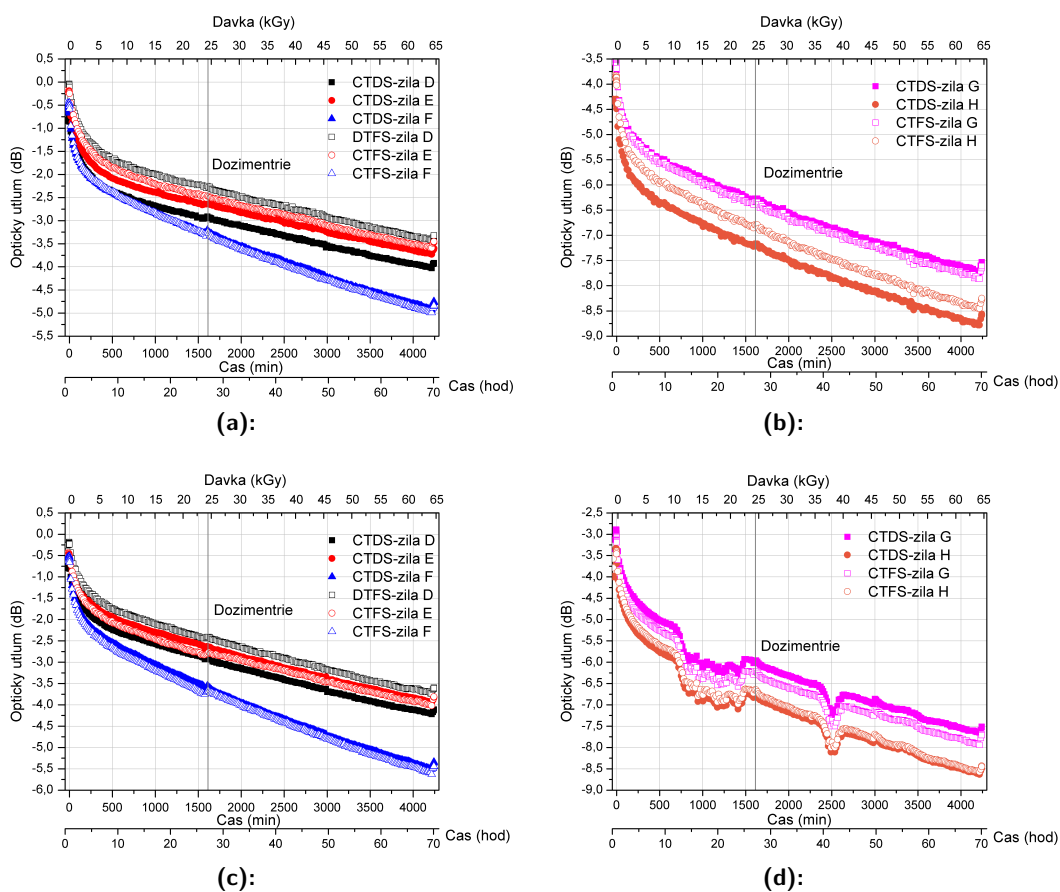
Na obrázcích 6.25 a 6.26 jsou zobrazeny průběhy měření optických útlumů SM vláken optických kabelů CTDS a CTFS během ozáření maximální dosaženou dávkou záření 65,5 kGy. Stejně jako u MM vláken i u SM vláken obou ozařovaných kabelů byl naměřen největší nárůst optického útlumu v prvních 5 hodinách měření. Nejnižší nárůst optického útlumu vůči hodnotě před ozáření (nárůst o 3 dB) byl naměřen u vláken D a E kabelu CTFS na všech vlnových délkách. Nejvyšší hodnoty optických útlumů v porovnání s hodnotami před ozáření měla vlákna D, E a H kabelu CTDS na vlnové délce 1310 nm (obrázky 6.25 a), b), nárůst optického útlumu byl až o 4,5 dB. Na vlnových délkách 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm (obrázky 6.25 c), d) a 6.26 a) - d)) byly nejvyšší naměřené hodnoty optického útlumu u vláken F a H obou kabelů, nárůst byl až o 5 dB. Konkrétní naměřené hodnoty jsou

6. Výsledky

pro porovnání před ozářením a po ozáření jednotlivých vláken jsou uvedeny v tabulkách 6.5 a 6.6.



Obrázek 6.25: Závislost optického útlumu SM optických vláken na čase během ozářování celkovou dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS
a) vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm,
b) vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm,
c) vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1490 nm,
d) vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1490 nm.

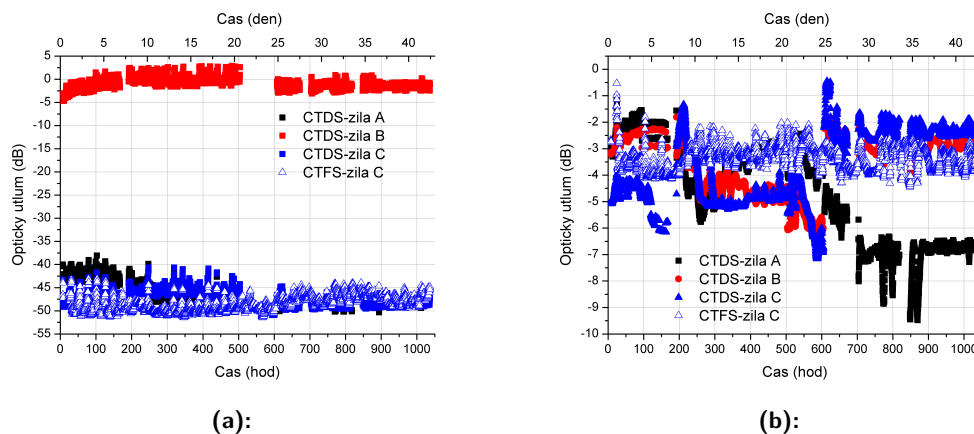


Obrázek 6.26: Závislost optického útlumu SM optických vláken na čase během ozařování celkovou dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS

- vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm,
- vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm,
- vlákna SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm,
- vlákna SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.

Výsledky měření optického útlumu optických kabelů CTDS, CTFS během relaxace po ozáření maximální dávkou gama záření 65,5 kGy

Jak bylo zmíněno dříve po ukončení ozařování následuje fáze relaxace, během které je měřen vývoj optického útlumu ozařovaných kabelech CTDS a CTFS. Výsledky měření MM vláken jsou uvedeny na obrázku 6.27. Konkrétní naměřené hodnoty jsou pro porovnání před ozáření a po ozáření uvedeny v tabulkách 6.5 a 6.6.



Obrázek 6.27: Závislost optického útlumu mnohavidových vláken na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS vláken MM - žíly A, B, C

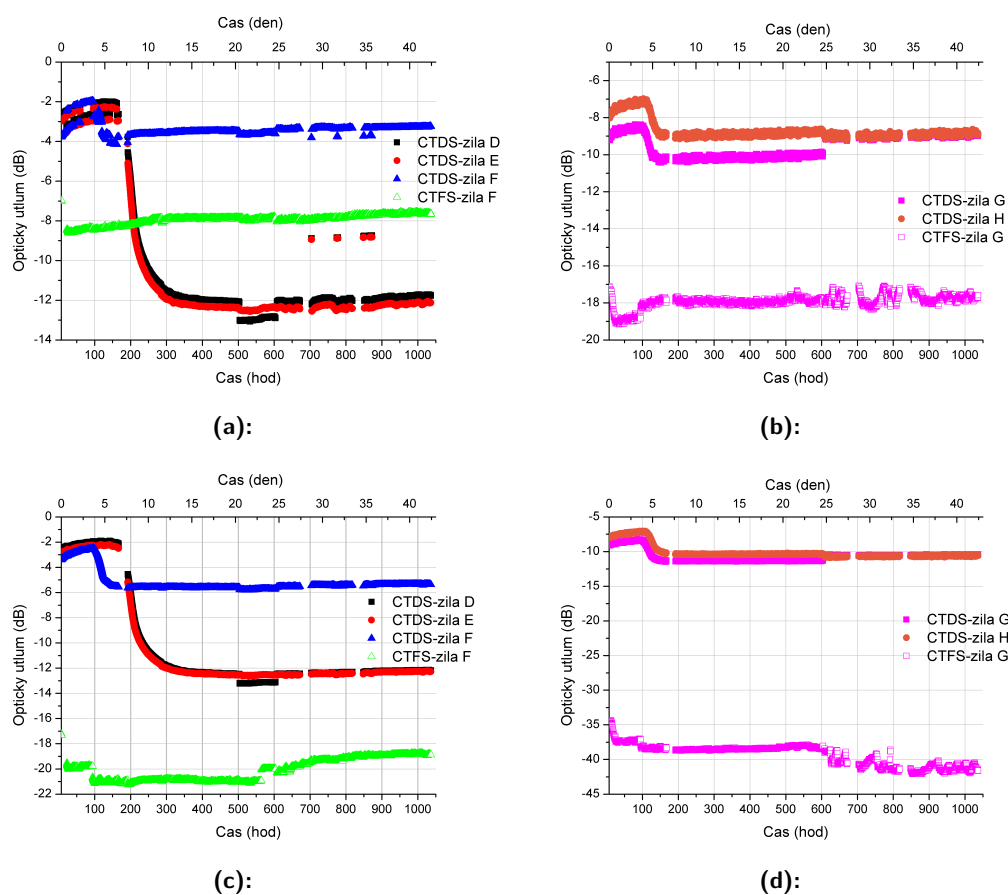
- a) měřeno na vlnové délce 850 nm,
b) měřeno na vlnové délce 1300 nm.

Při porovnání hodnot optických útlumů naměřených těsně po ukončení ozařování a hodnot naměřených po převozu vláken na pracoviště ČVUT zjišťujeme, že hodnoty po převozu jsou výrazně vyšší téměř u všech vláken optického kabelu CTFS. Toto zvýšení optického útlumu bylo způsobeno poškozením vláken při deinstalaci, tedy při vyjmutí kabelů z ozařovací komory. Při ozáření vlivem gama záření pravděpodobně došlo k výrazné změně mechanických vlastností optických kabelů a při vyndávání kabelů přes oddělující průchodky, které oddělují ozařovací komoru a měřící místnost došlo k mechanickému poškození optických vláken. Poškozená byla vlákna A, B, D, E, F, G, H optického kabelu CTFS. Nejmenší nárůst optického útlumu po převozu byl naměřen u vlákna F. Jako jediné nepoškozené vlákno se jeví vlákno C.

Při měření na vlnové délce 850 nm, viz obrázek 6.27 a), byly naměřeny velmi vysoké hodnoty optických útlumů (pod -40 dB) vláken A a C obou kabelů. Nejnižší optické útlumy byly naměřeny u vláken B kabelu CTDS. Během prvního dne jeho optický útlum mírně klesal, dále se příliš neměnil. Prvních pět dní jeho optický útlum vlákna B kabelu CTFS, který pak vzrostl natolik, že byl neměřitelný. Na obrázku 6.27 b) je patrný velký rozptyl hodnot během relaxace a velká nestabilita tohoto měření. I přesto je

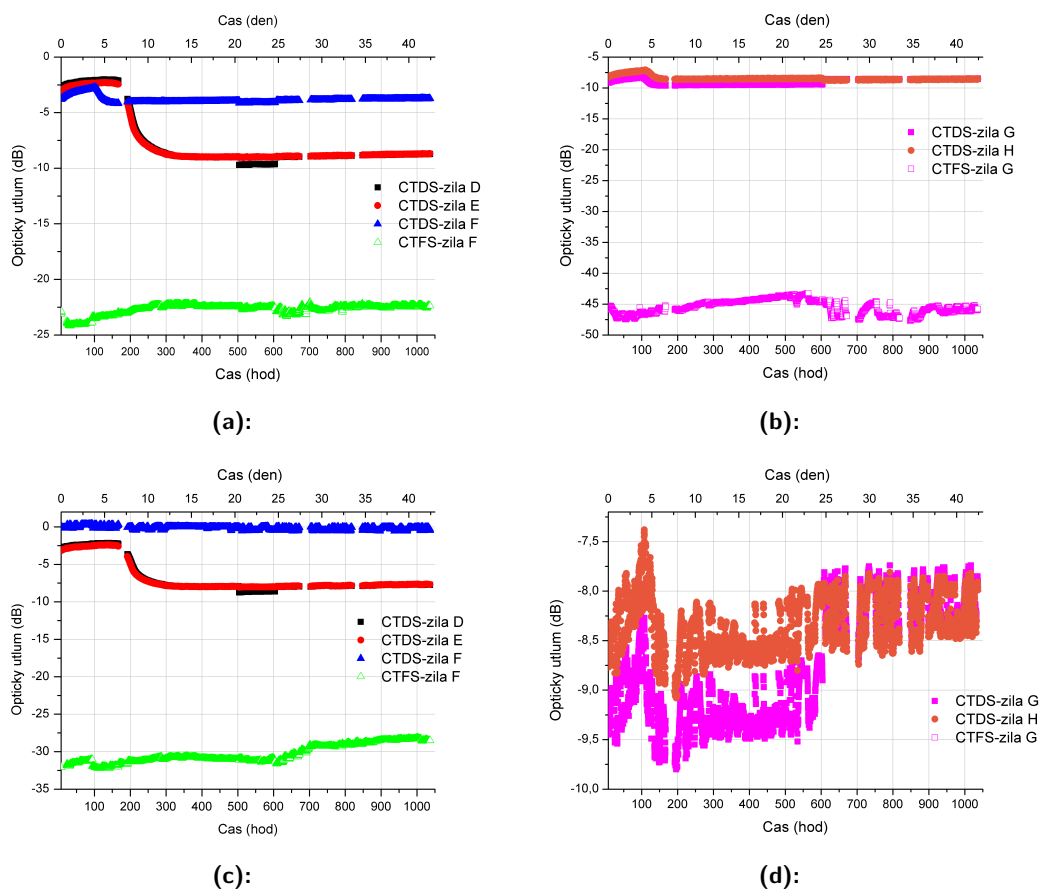
ale z grafu patrné, že po 7 dnech relaxace začíná optický útlum vláken A a B klesat. U obou vláken dochází k ustálení hodnot 35 dne relaxace, u vlákna B dochází do tohoto dne ke snížení optického útlumu. U vláken C kabelů CTDS a CTFS jsou hodnoty po ukončení relaxace nižší po ukončení ozářování.

Na obrázcích 6.28 a 6.29 jsou zobrazeny průběhy měření optických útlumů jednovidových vláken optických kabelů CTDS a CTFS během relaxace. Na všech měřených vlnových délkách byl zjištěn nejnižší optický útlum u vlákna F kabelu CTDS, který v prvních třech dne relaxace dále mírně klesá. Následující dva dny mírně roste a poté až do konce relaxace velmi mírně klesá, což může být způsobeno nepřesností měření. Stejný průběh opět na všech měřených vlnových délkách měly i hodnoty optických útlumů vláken G a H kabelu CTDS. Podobný průběh ale prudší nárůst optického útlumu na všech měřených vlnových délkách mezi 5. a 10. dnem měření byl zaznamenán u vláken D a E. Nejvyšší optický útlum u nepoškozeného vlákna byl naměřen u vlákna F kabelu CTFS, který během relaxace mírně klesal. Konkrétní naměřené hodnoty jsou pro porovnání před ozářením a po ozářením jednotlivých vláken jsou uvedeny v tabulkách 6.5 a 6.6.



Obrázek 6.28: Závislost optického útlumu jednovlákenných optických vláken na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS

- a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1310 nm,
- b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1310 nm,
- c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1490 nm,
- d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1490 nm.



Obrázek 6.29: Závislost optického útlumu jednovlákenných optických vláken na čase během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optických kabelů CTDS a CTFS

- a) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1550 nm,
- b) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1550 nm,
- c) vláken SM - D, E, F měřeno na vlnové délce 1625 nm,
- d) vláken SM - G, H měřeno na vlnové délce 1625 nm.

Tabulka 6.5: Referenční měření optického kabelu CTDS před ozáření, měření ozářeného kabelu CTDS 1. den po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTDS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).

Žíla	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]			
		před ozářením	po ozáření	1. měření na ČVUT	poslední měření
A	850	-0,88	-43,8	-40,14	N
	1300	-0,03	-2,66	-2,75	-5,59
B	850	-2,01	-11,53	-3,22	-1,05
	1300	-1,52	-2,65	-2,91	-1,93
C	850	-0,34	N	-43,42	-46,67
	1300	0,82	-2,96	-2,85	-1,16
D	1310	-1,15	-5,13	-2,68	-11,73
	1490	-0,81	-3,89	-2,68	-12,26
	1550	-0,75	-3,91	-2,69	-8,81
	1625	-0,80	-4,09	-2,92	-8,15
E	1310	-0,62	-4,82	-2,95	-12,08
	1490	-0,47	-3,58	-2,99	-12,34
	1550	-0,44	-3,62	-2,97	-8,76
	1625	-0,51	-3,81	-3,18	-8,09
F	1310	-0,74	-3,86	-3,75	-3,18
	1490	-0,71	-4,54	-3,51	-5,43
	1550	-0,52	-4,77	-3,78	-3,80
	1625	-0,60	-5,37	-4,32	-3,91
G	1310	-4,18	-7,12	-9,14	-8,94
	1490	-3,70	-7,41	-9,02	-10,45
	1550	-3,64	-7,60	-9,11	-8,51
	1625	-2,95	-7,89	-9,45	-7,91
H	1310	-4,84	-7,96	-7,97	-8,87
	1490	-4,24	-8,22	-7,95	-10,54
	1550	-4,39	-8,66	-8,19	-8,34
	1625	-3,59	-8,55	-8,77	-7,96

N - neměřitelně vysoký optický útlum

Tabulka 6.6: Referenční měření optického kabelu CTFS před ozáření, měření ozářeného kabelu CTFS 1. den po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy (měření provedeno 28.5. na pracovišti ČVUT) a měření ozářeného kabelu CTFS 130. den po ozáření (měření provedeno 4.10 na pracovišti ČVUT).

Žíla	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]			
		před ozářením	po ozáření	1. měření na ČVUT	poslední měření
A	850	-0,09	-43,74	-45,81	N
	1300	-0,02	-2,46	-46,57	N
B	850	-3,50	-6,75	-10,69	N
	1300	-2,57	-3,08	-12,43	N
C	850	-0,54	-49,23	-44,46	-45,87
	1300	-0,34	-3,45	-2,8	-3,09
D	1310	-0,17	-3,49	-17,90	-27,61
	1490	-0,05	-3,26	-32,83	-47,23
	1550	-0,17	-3,50	-42,41	-49,47
	1625	-0,58	-3,95	-55,77	N
E	1310	-0,33	-3,62	-21,28	-31,00
	1490	-0,15	-3,36	-37,94	N
	1550	-0,32	-3,62	-47,48	-54,2
	1625	-0,86	-4,18	N	N
F	1310	-0,60	-5,00	-6,98	-7,66
	1490	-0,44	-4,42	-17,21	-18,88
	1550	-0,61	-5,02	-23,11	-22,37
	1625	-0,95	-5,80	-32,00	-28,51
G	1310	-3,99	-7,06	-17,23	-17,58
	1490	-3,53	-7,40	-34,41	-41,58
	1550	3,60	-7,71	-45,89	-45,78
	1625	-3,11	-7,78	N	N
H	1310	-4,47	-7,70	-29,04	-31,13
	1490	-3,93	-8,06	-51,18	-54,79
	1550	-3,94	-8,35	N	N
	1625	-3,39	-8,51	N	N

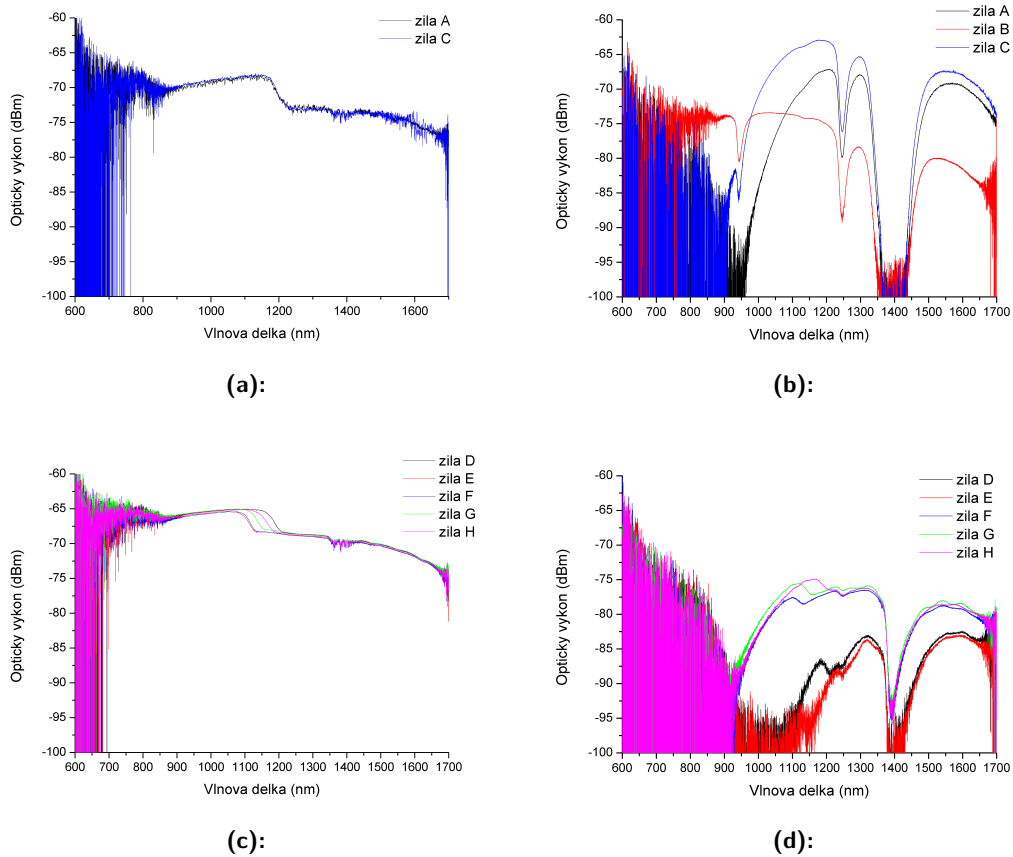
N - neměřitelně vysoký optický útlum

Výsledky měření spektrálních charakteristik pro kabely CTDS, CTFS ozářeného maximální dávkou gama záření 65,5 kGy

Na obrázcích 6.30 - 6.31 jsou uvedeny spektrální charakteristiky vláken optických kabelu CTDS a CTFS. Je zde uvedeno porovnání průběhů před ozářením (MM vlákna - obrázky 6.30 a), 6.31 a), SM vlákna - obrázky 6.30 c), 6.31 c)). Spektrální charakteristiky byly měřeny 171. den po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy na spektrálním analyzátoru Yokogawa AQ6370C měřeno na rozsahu vlnových délek 600 – 1700 nm.

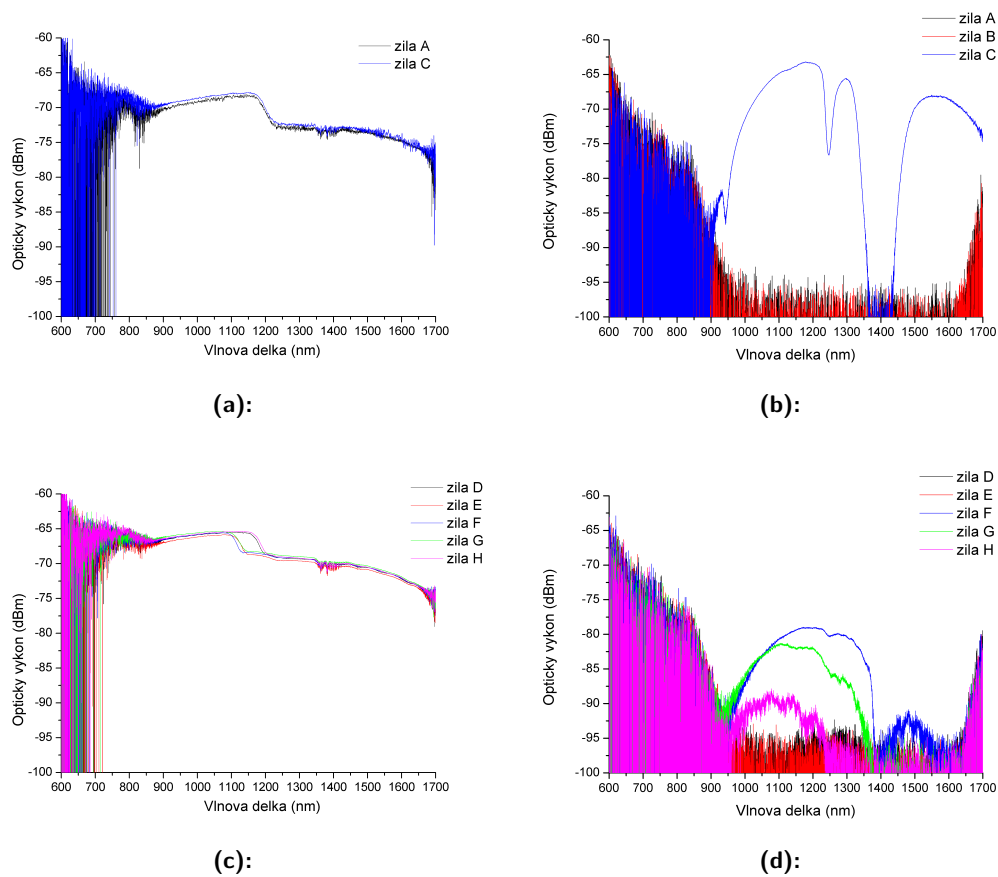
Nepřetržité měření optického útlumu po ozáření bylo ukončeno po 42 dnech, protože v posledních 5 dnech došlo k ustálení optického útlumu. Ale z průběhu optického útlumu měřeného na spektrálním analyzátoru u vláken A a C, obrázek 6.30 b) je patrné, že optický útlum i po ukončení měření velmi pomalu klesal. Optický útlum vláken A a C dosahuje přibližně stejné hodnoty na vlnové délce 1300 nm jako před ozářením. U vlákna B toto nelze s jistotou tvrdit, protože patrně došlo k chybnému měření spektrální charakteristiky před ozářením. U SM vláken G a H také pravděpodobně došlo k mírnému poklesu optického útlumu mezi 42. dnem a 171 dnem relaxace, neboť se po 171 dnech jejich průběhy spektrálních charakteristik velmi podobají průběhu vlákna F.

Průběhy spektrálních charakteristik optického kabelu CTFS, obrázky 6.31 b) a d), potvrzují měřené hodnoty optických útlumů během relaxace. Tedy to, že došlo k poškození téměř všech vláken. Optické vlákno C se jako jediné jeví v pořádku. Vlákna F a G nebyla tolik poškozená a byl u nich měřitelný optický výkon na vlnové délce 1310 nm a 1550 nm.



Obrázek 6.30: Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C 171. den relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optického kabelu CTDS

- a) vlákna MM - A, B, C - reference,
- b) vlákna MM - A, B, C - ozářené,
- c) vlákna SM - D, E, F, G, H - reference,
- d) vlákna SM - D, E, F, G, H - ozářené.



Obrázek 6.31: Spektrální charakteristiky měřené spektrálním analyzátozem Yokogawa AQ6370C 171. den relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy optického kabelu CTFS

- a) vlákna MM - A, B, C - reference,
- b) vlákna MM - A, B, C - ozářené,
- c) vlákna SM - D, E, F, G, H - reference,
- d) vlákna SM - D, E, F, G, H - ozářené.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo měření vlastností optických vláken a kabelů během a po ozáření gama zářením. Celkem bylo provedeno pět různých experimentů ozařování optických vláken a kabelů, které probíhaly ve třech ozařovacích komorách ROZA, PRAZDROJ (větší ozařující dávka po kratší časový úsek) a PANOZA (menší ozařující dávka po dlouhý časový úsek) na pracovišti ÚJV Řež, a.s. Následné měření po ukončení ozařování probíhalo v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze.

Provedla jsem měření optických vlastností 3 typů optických kabelů označených CTDS, CTFS a OPK, které pro experimentální účely vyrobila firma OPTOKON Kable a.s. Kabely CTDS a CTFS obsahovali 8 optických vláken, kde 3 optická vlákna byla mnohavidová (označení A, B a C) a 5 optických vláken bylo jednovidových (označení D, E, F, G a H). Kabel OPK obsahoval čtyři optická vlákna z toho 3 jednovidové a 1 optické vlákno mnohavidové. Kromě optických kabelů jsem také měřila vlastnosti dvou optických velko-průměrových plastových vláken. První vlákno mělo průměr 1 mm, druhý typ plastového vlákna obsahoval sedm jader o průměru 250 μm .

Optické kabely CTDS a CTFS byly ozařovány celkovými dávkami gama záření 10,1 kGy a 65,5 kGy a ozařování bylo provedeno v ozařovací komoře ROZA. Optický kabel OPK byl ozařován dávkou gama záření 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ. Plastová optická vlákna s průměrem 1 mm byla ozářena dávkou gama záření 10,1 kGy v komoře ROZA a dávkou gama záření 51,3 kGy v komoře PRAZDROJ. Plastová optická vlákna se sedmi jádry o průměru 250 μm byla ozářena dávkou gama záření 51,3 kGy v komoře PRAZDROJ a dávkou gama záření 65,5 kGy v komoře ROZA. Oba typy plastových optických vláken byly rovněž ozařovány v komoře PANOZA s celkovými dávkami gama záření 1,24 kGy; 6,4 kGy; 11,2 kGy; 17,6 kGy; 17,7 kGy; 28,6 kGy; 40,4 kGy; 51,4 kGy a 62,9 kGy.

Optický útlum kabelů a vláken byl prováděn pomocí přímé metody. Plastová optická vlákna byla měřena na vlnových délkách 535 nm a 650 nm. Optický útlum mnohavidových vláken optických kabelů byl měřen na vlnových délkách 850 nm a 1300 nm, u jednovidových vláken bylo měření prováděno na vlnových délkách 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm.

Optický útlum plastového optického vlákna s průměrem 1 mm o délce 1,5 m vzrostl během ozařování dávkou gama záření 10,1 kGy v ozařovací komoře

ROZA na -18 dB a optický útlum vlákna délce 15 m vzrostl na -24 dB na vlnové délce 650 nm. Při posledním měření 133. den relaxace byly u těchto vláken naměřeny optické útlumy -15,8 dB vlákna (délka vlákna 1,5 m) a -21,8 dB u vlákna (délka vlákna 15 m) měřeno na vlnové délce 650 nm.

Po ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ roste optický útlum optického vlákna s průměrem 1 mm na -50 dB a optický útlum plastového optického vlákna se sedmi jádry o průměru 250 μm na -58 dB na vlnové délce 650 nm. 50. den relaxace byl optický útlumu plastového optického vlákna s průměrem 1 mm -12,5 dB a dále mírně klesal, protože při posledním měření 516. den relaxace nabýval hodnoty -9,52 dB. Optický útlum plastového optického vlákna se sedmi jádry o průměru 250 μm klesl během relaxace na hodnotu -13,44 dB (50. den) a dále mírně rostl, protože při posledním měření 516. den relaxace nabýval hodnoty -15,86 dB na vlnové délce 650 nm.

Po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy v ozařovací komoře ROZA stoupl optický útlum plastového optického vlákna se sedmi jádry o průměru 250 μm o délce 5 m na -48 dB a vlákna o délce 10 m na -50 dB na vlnové délce 650 nm. Při posledním měření 144. den relaxace byl naměřen pokles optického útlumu vlákna o délce 5 m na -13,55 dB a vlákna o délce 10 m na -17,52 dB na vlnové délce 650 nm.

Po ukončení ozařování v ozařovací komoře PANOZA dosahoval optických útlum plastového vlákna o průměru 1 mm o délce 10 m po záření dávkou 11,2 kGy hodnoty -8,9 dB a po záření dávkou 51,4 kGy hodnoty -24 dB na vlnové délce 650 nm, což je méně než po ozáření v ozařovacích komorách ROZA a PRAZDROJ. Během relaxace pak dochází ke snížení optického útlumu vlákna o délce 10 m 46. den po ozáření dávkou 11,2 kGy na hodnotu -3,9 dB a 49. den po ozáření dávkou 51,4 kGy na hodnotu -4 dB na vlnové délce 650 nm.

Nižší optické útlumy po ozáření v komoře PANOZA byly naměřeny na vlnové délce 650 nm u obou typů POF vláken. Při měření na vlnové délce 535 nm dosahovala POF vlákna s průměrem 1 mm při vyšších ozařovaných dávkách (nad 40 kGy) neměřitelně vysokých hodnot. U plastových optických vláken se sedmi jádry o průměru 250 μm na vlnové délce 535 nm dochází k mírnému nárůstu optického útlumu po ozáření maximálně o 7 dB, ale během relaxace nedochází k výraznému snížení nebo zvýšení optického útlumu. Rozptyl naměřených hodnot je přisuzován chybě měření (± 1 dB), kde tato chyba je způsobená rozdílným optickým útlumem na optických konektorech při přepojování mezi přístroji a také makroohyby optických vláken.

Bylo také provedeno měření spektrálních charakteristik pomocí spektrálního analyzátoru Ocean Optics USB2000 a bylo zjištěno, že během ozařování plastových optických vláken dávkou gama záření 51,3 kGy dochází k posunu absorpční hrany až k vlnové délce 630 nm. Při relaxaci se absorpční hrana posouvá zpět k hodnotě před ozářením, ale nedosáhne její původní hodnoty před ozářením 500 nm.

Optický kabel OPK byl ozářen dávkou gama záření 51,3 kGy v ozařovací komoře PRAZDROJ. Ozařování gama zářením způsobuje nárůst optického útlumu SM vlákna A -4,37 dB, vlákna B -4,29 dB, vlákna C -4,70 dB

měřeno na vlnové délce 1550 nm. Při relaxaci dochází k poklesu optického útlumu vlákna A $-1,59$ dB, vlákno B $-1,62$ dB, vlákno C $-1,63$ dB měřeno 55. den po ozáření na vlnové délce 1550 nm. Optický útlumu MM vlákna D měřeného na vlnové délce 850 nm byl již po 11 min ozářování $-29,81$ dB a dále rostl tak prudce, že v následujících minutách už byl neměřitelně vysoký. Při relaxaci nedošlo ke snížení optického útlumu na měřitelnou hodnotu.

Optické kabely CTDS a CTFS byly ozářovány dávkami 10,1 kGy a 65,5 kGy v ozářovací komoře ROZA. V případě MM vláken byly naměřeny nižší hodnoty optických útlumů na vlnové délce 1300 nm než na vlnové délce 850 nm. Při obou experimentech na vlnové délce 850 nm vykazuje nejnižší naměřené optické útlumy po ozáření i po ukončení relaxace vlákno B obou kabelů. Při experimentu ozáření optických kabelů dávkou gama záření 10,1 kGy byly naměřeny nejnižší optické útlumy na vlnové délce 850 nm u vlákna B kabelu CTDS po ozáření $-5,60$ dB i 130. den relaxace $-2,79$ dB a vlákna B kabelu CTFS po ozáření $-13,87$ dB i 130. den relaxace $-1,63$ dB. Při experimentu ozáření optických kabelů dávkou gama záření 65,5 kGy byly naměřeny nejnižší optické útlumy na vlnové délce 850 nm u vlákna B kabelu CTDS po ozáření $-11,53$ dB i 130. den relaxace $-1,05$ dB a vlákna B kabelu CTFS po ozáření $-6,75$ dB. Po ukončení ozáření nižší dávkou gama záření 10,1 kGy vykazuje lepší výsledky na vlnové délce 1300 nm vlákna C kabelu CTDS ($-4,41$ dB), ovšem při ozáření vyšší dávkou 65,5 kGy vykazuje nižší optické útlumy vlákno B kabelu CTFS ($-3,08$ dB po ozáření).

V případě SM vláken nejmenšího nárůstů optického útlumu po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy dosahují na vlnové délce 1310 nm vlákna D a G kabelu CTDS a vlákna F a H kabelu CTFS, na vlnových délkách 1550 nm a 1625 nm vlákna D a E kabelu CTDS a vlákno E kabelu CTFS. Ovšem po ukončení relaxace dosahují nejnižších optických útlumů na optická vlákna F, G a H všech měřených vlnových délkách.

Po ukončení ozářování dávkou gama záření 65,1 kGy byl naměřen nejmenší nárůst optických útlumů u vláken D a E kabelu CTFS na všech vlnových délkách. Po ukončení relaxace (130. den po ukončení ozářování) dosahovalo vlákno F kabelu CTDS nejnižších optických útlumů na všech měřených vlnových délkách ($-3,18$ dB na vlnové délce 1310 nm, $-5,43$ dB na vlnové délce 1490 nm, $-3,80$ dB na vlnové délce 1550 nm, $-3,91$ dB na vlnové délce 1625 nm).

Při ozáření vlivem gama záření pravděpodobně došlo k výrazné změně mechanických vlastností optických kabelů a při vyndávání kabelů přes oddělovací průchodky, které oddělují ozářovací komoru a měřící místnost došlo k mechanickému poškození optických vláken. Poškozená byla vlákna A, B, D, E, F, G, H optického kabelu CTFS. Nejmenší nárůst optického útlumu po převozu byl naměřen u vlákna F. Jako jediné nepoškozené vlákno se jeví vlákno C.

Z naměřených výsledků vyplývá, že polymerní optická vlákna jsou vhodná do prostředí jen z velmi nízkou dávkou gama záření 20 kGy a dále je nutné přenos dat provádět na vlnové délce 650 nm. Z měření vyplynulo, že vlnová délka 535 nm je nevhodná z důvodu výrazně vyššího optického útlumu pro

ozáření gama záření.

Při měření optických kabelů bylo zjištěno, že mnohavidová optická vlákna mají mnohem vyšší optický útlum na vlnové délce 850 nm, proto je nutné v případě použití mnohavidových vláken použít pro přenos dat vlnové délky 1300 nm. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vláken B kabelu CTDS (-1,93 dB 130. den relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy) a C kabelu CTDS (-1,16 dB 130. den relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy). Vlákno B má geometrické rozměry jádra 200 μm , pláště 220 μm a sekundární ochrany 400 μm a vysoký obsah OH iontů. Vlákno C má geometrické rozměry jádra 62,5 μm , pláště 125 μm a sekundární ochrany 250 μm a odpovídá standardu OM1.

V případě jednovidových vláken byly naměřeny velmi podobné výsledky optických útlumů vláken na všech měřených vlnových délkách (1310 nm, 1490 nm, 1550 nm a 1625 nm). Nejlepší výsledky z hlediska nejnižšího nárůstu optického útlumu během ozáření a relaxace v obou experimentech na vlnových délkách 1300 nm a 1550 nm vykazovala vlákna F (ihned po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy -3,86 dB na vlnové délce 1310 nm a -4,77 dB na vlnové délce 1550 nm, 130. den relace -3,18 dB na vlnové délce 1310 nm a -3,80 dB na vlnové délce 1550 nm), G (ihned po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy -7,12 dB na vlnové délce 1310 nm a -7,60 dB na vlnové délce 1550 nm, 130. den relace -8,94 dB na vlnové délce 1310 nm a -8,51 dB na vlnové délce 1550 nm) a H (ihned po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy -7,96 dB na vlnové délce 1310 nm a -8,66 dB na vlnové délce 1550 nm, 130. den relace -8,87 dB na vlnové délce 1310 nm a -8,34 dB na vlnové délce 1550 nm) optického kabelu CTDS. Vlákna F, G a H mají rozměry jádra 9 μm , pláště 125 μm a sekundární ochrany 250 μm a odpovídají standardům ITU-T G.657.A1 (vlákno F), G.652.D/G.657.A1 (vlákno G) a G.652.D (vlákno H).

Literatura

- [1] DeCusatis, C. *Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking*. Burlington: Elsevier, 2008. ISBN: 978-0-12-374216-2.
- [2] Novotný, K. *Optická komunikační technika*. Skripta, FEL ČVUT, Praha, 1997, str. 121 - 122, ISBN 978-80-01-03920-5.
- [3] Maršálek, L. *Optická vlákna*. Ostrava, 2006 [cit. 20.10.2020]. Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁNSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. [citát 18.11.2021] Dostupné z: <https://docplayer.cz/333859-Opticka-vlakna-vs-b-technicka-univerzita-ostava-fakulta-elektrotechniky-a-informatiky-katedra-elektroniky-a-sdelovaci-techniky.html>
- [4] Dubský, P., Kucharski, M. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha: MIKROKOM, 1994, str. 13 - 15.
- [5] OPTOCORE, Ribbon Fiber Cable 101: Five Fundamentals of Ribbon Optic Cable. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.optcore.net/archive27318/>
- [6] Radiobiologie. *Základní fyzikální poznatky o ionizujícím a neionizujícím záření, jeho detekce a dozimetrii*. Kapitoly: 1.5.3- 1.5.5. [citát 25.12.2021]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/>
- [7] Cabalka, M. Interní dokument ÚJV Řež, a.s., Řež, 2021.
- [8] Fanderlík, I. *Optical properties of glass* Amsterdam: Elsevier, 1983. Glass science and technology.
- [9] Sandu, A. K., Singh, S., Pandey, O. p. *Gamma ray induced modifications of quaternary silicate glasses* Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 41, Number 16, IOP Publishing Ltd., 2008.
- [10] Konečná, Z., Plaček V., Havránek P. *Unusual Attenuation Recovery Process After Fiber Optic Cable Irradiation*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 266, 2017.
- [11] Novotný, K., Martan, T., Šístek, J. *Systémy pro optické komunikace*. Skripta, FEL ČVUT, Praha, 2007, str. 45 - 48, 93 - 95. ISBN 80-01-02810-0.

- [12] Bubník, L., Klajbl, j., Mazuch, P. *Optoelektrotechnika*. Kapitola 14: Měření optických vláken a optických kabelových tras, ISBN: 978-80-88058-20-5, [citát 26.12.2021], Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/14.html>
- [13] Úvod do POF *Charakteristický útlum PMMA-POF*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/5733123/19/images/12/Introduction+to+POF+Obtained+with->
- [14] Technická vysoká škola v Norimberku, Aplikované centrum POF *Popis POF*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <http://www.pofac.info/en/homepage/what-are-pof/principle-of-pof.html>
- [15] MITSUBISHI RAYON CO.,LTD., ESKA OPTICAL FIBER DIVISION, High-Performance Plastic Optical Fiber, Super Eska Polyethylene Jacketed Optical Fiber Cord. *Datasheet k optickému vlákně SH-4001* Japan. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.pofeska.com/pofeskae/download/pdf/f/CK10.pdf>
- [16] MITSUBISHI RAYON CO.,LTD., ESKA OPTICAL FIBER DIVISION, High-Performance Plastic Optical Fiber, Eska. *Datasheet k optickému vlákně CK-10* Japan. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: *POF 7x250um*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.pofeska.com/pofeskae/download/pdf/f/CK10.pdf>
- [17] Strnad, S. *Optická vlákna a telekomunikace*. 2. vydání Praha 1991, ISBN 80-900721-0-0
- [18] Chleboun, J. *Spektrální charakteristiky ve vláknové optice* [online] Brno, 2011 [cit. 20.11.2020]. Bakalářská práce. VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42546
- [19] Bhumik, S., McGrath, A. *Differences between OM1, OM2, OM3, OM4, OS1, OS2 fiber optic cable nomenclatures* Sterlight Tech. Prosinec 2013, [cit. 29.4.2021]. Dostupné z: https://www.stl.tech/optical-interconnect-products/opticalfibre/pdf/Differences_between_OM1_OM2_OM3_OM4_.pdf
- [20] Zikmund, M. *Studium vlastností optických vláken s dotací ionty erbia*. Bakalářská práce, ČVUT V Praze, 2021. [citát 18.11.2021] Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/94913/F3-BP-2021-Zikmund-Marek-document.pdf?sequence=-1&disAllowed=y>
- [21] ITU-T: G.652 - Characteristics of a single-mode optical fibre and cable [online]. ITU-T, 2009-11 [cit. 2010-11-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/TREC-G.652-200911-I>>.
- [22] ITU-T: G.657 - Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network [online]. ITU-T, 2009-11 [cit. 2010-11-12].

- [23] OPTOKON KABLE s.r.o, Ruggedized Mobile Cable *Informace o produktu*. Jihlava, ČR, 2019,[citát 26.11.2021]. Dostupné z: <https://www.optokon.com/product/334-ruggedized-mobile-cable>
- [24] CORNING, Corning ClearCurve ZBL Optical Fibre *Informace o produktu*. USA, 2014, [citát 18.6.2020]. Dostupné z: https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1464_07-14_English.pdf
- [25] ITU-T, Specification for Bend Insensitive Single-Mode Optical Fiber (G.657.A1) *Standardy ITU-T*. 2014, [citát 18.6.2020]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp
- [26] ITU-T, Specification for Low Water Peak Single-Mode Optical Fiber (G.652.D) *Standardy ITU-T*. 2013, [citát 18.6.2020]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp
- [27] J-FIBRE Jena, j-BendAble OM2/OM2+ Multimode Fibers *Standardy ITU-T*. Německo, 2016, [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.j-fiber.com/en/products-services/multimode-fibers/j-bendable-om4om3om2-om2/>
- [28] OPTOKON KABLE s.r.o, Outdoor CST armoured Unitube Cable *Informace o produktu*. Jihlava, ČR, 2019,[citát 26.11.2021]. Dostupné z: <https://www.optokon.com/product/437-outdoor-cst-armoured-unitube-cable-gc>
- [29] J-FIBRE Jena, OptiGrade 50/125 R.H. Radiation Hard Fiber *Standardy ITU-T*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: https://publications.leoni.com/fileadmin/j-fiber/publications/data_sheets/jf_optigrade_rad-hard_50-125.pdf?1581763103
- [30] J-FIBRE Jena, Step-index Multimode Fiber 200/220 VIS-IR *Standardy ITU-T Datasheet k optickému vlákn*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.j-fiber.com/en/about-us/profile/>
- [31] J-FIBRE Jena, Radiation Hard Multimode Fiber *Standardy ITU-T Datasheet k optickému vlákn*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.j-fiber.com/en/products-services/special-optical-fibers/radiation-hard-fibers/>
- [32] J-FIBRE Jena, Radiation Hard Singlemode Fiber *Standardy ITU-T Datasheet k optickému vlákn*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.j-fiber.com/en/products-services/special-optical-fibers/radiation-hard-fibers/>
- [33] J-FIBRE Jena, MIL-Spec Radiation Hard Fibers MIL-PRF-49291/7C SMF 09/125/250 *Standardy ITU-T Datasheet k optickému vlákn*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: https://publications.leoni.com/fileadmin/j-fiber/publications/data_sheets/jf_mil-spec_09-125-245.pdf?1581762794

- [34] SUMITOMO ELECTRIC GROUP, PureBand-Plus® Single-Mode Optical Fiber *Standardy ITU-Tu Data-sheet k optickému vlákně*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://sumitomoelectriclightwave.com/product/pa-sm/>
- [35] OPTOKON, Měřicí přístroj OFT820-POF *Návod k použití*. Jihlava, Česká republika, 2009, [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.optokon.com/product/45-oft-820-pof-series-plastic-optical-fiber-loss-test-set>
- [36] OPTOKON, Měřicí přístroj OFT820 *Návod k použití*. Jihlava, Česká republika, 2009, [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.optokon.com/product/41-oft-820-loss-test-set>
- [37] OPTOKON, Měřicí přístroj LS-800 *Návod k použití*. Jihlava, Česká republika, 2009, [citát 18.6.2020]. Dostupné z: http://www.optokon.com/files/testers-manuals/TEQ_02-09_CZ-LS800-MA4.pdf
- [38] OPTOKON, Měřicí přístroj OFT4212 *Návod k použití*. Jihlava, Česká republika, 2009, [citát 18.6.2020]. Dostupné z: http://www.optokon.com/files/testers-manuals/TEQ_02-09_CZ-LS800-MA4.pdf
- [39] Ocean Optics *Optický spektrometr Ocean Optics USB 2000+*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.labx.com/item/ocean-optics-usb-2000-uv-vis-spectrometer/4285616>
- [40] Ocean Optics *Zdroj optického záření Ocean Optics HL-3P-CAL kalibrovaný v Vis-NIR*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://www.labx.com/item/ocean-optics-hl-3p-cal-calibrated-vis-nir-light-source/LV42010563>
- [41] Yokogawa Test and Measurement Corporation, Optický spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C *Návod k použití*. [citát 18.11.2021]. Dostupné z: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/aq6370c-optical-spectrum-analyzer/>

Příloha A

Tabulky

Tabulka A.1: Přehled ozařovaných POF vláken.

Typ POF	Délka vlákna	Experiment / Dávka ozáření
S průměrem jádra 1 mm	- 1,5 m, 15 m	→ 10,1 ± 1,2 kGy (27.5.2019)
	- 10 m	→ 51,3 ± 1,7 kGy (9.9.2019)
	- 10 m, 20 m	→ 1,24 kGy (11.1.2021)
	- 10 m, 20 m	→ 6,4 kGy (11.1.2021)
	- 10 m, 20 m	→ 11,2 ± 1,1 kGy (11.1.2021)
	- 10 m, 20 m	→ 20 kGy (říjen 2021)
	- 10 m, 20 m	→ 30 kGy (říjen 2021))
	- 10 m, 20 m	→ 40 kGy (říjen 2021)
	- 10 m, 20 m	→ 50 kGy (říjen 2021))
	- 10 m, 20 m	→ 65 kGy (říjen 2021)
	Svazek 7 jader o průměru 250 μm	- 10 m
- 5 m, 10 m		→ 65,5 ± 7,4 kGy (14.9.2020)
- 10 m, 20 m		→ 1,24 kGy (11.1.2021)
- 10 m, 20 m		→ 6,4 kGy (11.1.2021))
- 10 m, 20 m		→ 11,2 ± 1,1 kGy (11.1.2021)
- 10 m, 20 m		→ 17,6 ± 1,7 kGy (11.1.2021)
- 10 m, 20 m		→ 20 kGy (říjen 2021)
- 10 m, 20 m		→ 30 kGy (říjen 2021)
- 10 m, 20 m		→ 40 kGy (říjen 2021)
- 10 m, 20 m		→ 50 kGy (říjen 2021))
- 10 m, 20 m		→ 65 kGy (říjen 2021)

Tabulka A.2: Přehled ozařovaných optických kabelů.

Typ kabelu	Experiment / Dávka ozáření
CTDS - 1 (A)	→ ozářeno dávkou $10,1 \pm 1,2$ kGy (27.5.2019)
- 2 (B)	→ ozářeno dávkou $65,5 \pm 7,4$ kGy (14.9.2020)
- 3 (C)	→ referenční měření a experiment v komoře PANOZA (11.1.2021)
CTFS - 1 (A)	→ ozářeno dávkou $10,1 \pm 1,2$ kGy (27.5.2019)
- 2 (B)	→ ozářeno dávkou $65,5 \pm 7,4$ kGy (14.9.2020)
- 3 (C)	→ referenční měření a experiment v komoře PANOZA (11.1.2021)
OPK - 1 (A)	→ ozářeno dávkou $51,3 \pm 1,7$ kGy (9.9.2019)
- 2 (B)	→ referenční měření
- 3 (C)	
- 4 (D)	

Tabulka A.3: Termíny prováděných měření optického výkonu vláken POF během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (květen 2019).

Datum měření	21.5.	27.5.	27.5.	29.5.	13.6.	19.6.	21.6.	1.7.	25.7.	7.10.	8.2.2021
Den po ozáření	-6*	0**	0***	2	17	23	25	34	58	133	622

* Měření před ozářením v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky na ČVUT

** První měření na pracovišti ÚJV Řež, a. s.

*** Poslední měření na pracovišti ÚJV Řež, a. s.

Tabulka A.4: Termíny prováděných měření optického výkonu vláken POF během relaxace po ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy (září 2019).

Datum měření	11.9.	12.9.	13.9.	15.9.	16.9.	25.9.	29.9.	6.10.	30.9.	8.2.2021
Den po ozáření	0*	1	2	4	5	14	18	25	49	516

* Poslední den ozařování, první měření po ozáření na pracovišti ÚJV Řež, a. s.

Tabulka A.5: Termíny prováděných měření optického výkonu vláken POF během relaxace po ozáření dávkou gama záření 65,5 kGy (září 2020).

Datum měření	17.-24.9.	29.9.	1.10.	5.10.	8.10.	12.10.	15.10.	21.10.	8.2.2021
Den po ozáření	0* - 7	12	14	18	21	25	28	34	144

* Poslední den ozařování, první měření po ozáření na pracovišti ÚJV Řež, a. s.

Tabulka A.6: Termíny prováděných měření optického útlumu optických kabelů CTDS a CTFS během relaxace po ozáření dávkou gama záření 10,1 kGy (květen 2019).

Datum měření	21.5.	24.5.	27.5.	28.5.	29.5.	30.5.	31.5.	3.6.	4.6.	5.6.	6.6.
Den po ozáření	-6*	-3*	0**	1	2	3	4	7	8	9	10
Datum měření	7.6.	10.6.	11.6.	12.6.	13.6.	14.6.	17.6.	19.6.	21.6.	3.7.	29.8.
Den po ozáření	11	14	15	16	17	18	21	23	25	37	94
Datum měření	30.9.	4.10	7.10								
Den po ozáření	126	130	133								

* Měřeno před ozářením

** Poslední měření na pracovišti ÚJV Řež, a. s.

Tabulka A.7: Termíny prováděných měření optického útlumu optického kabelu OPK během relaxace po ozáření dávkou gama záření 51,3 kGy (září 2019).

Datum měření	11.9.	12.9.	13.9.	16.9.	17.9.	18.9.	19.9.	20.9.	23.9.	24.9.	25.9.
Den po ozáření	0*	1	2	5	6	7	8	9	12	13	14
Datum měření	26.9.	27.9.	28.9.	29.9.	30.9.	4.10.	5.10.	6.10.	7.10.	8.10.	9.10
Den po ozáření	15	16	17	18	19	23	24	25	26	27	28
Datum měření	10.10	11.10.	14.10.	15.10.	16.10.	18.10.	21.10	22.10	23.10	24.10	25.10.
Den po ozáření	29	30	33	34	35	37	40	41	42	43	44
Datum měření	26.10.	30.10.	31.10.	5.11.							
Den po ozáření	45	49	50	55							

* Poslední den ozařování, první měření po ozáření na pracovišti ÚJV Řež, a. s.