



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECH-
NOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH PŘÍSTUPOVÉ OPTICKÉ SÍTĚ DESIGN OF PASSIVE OPTICAL NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ ŽÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL REICHERT



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Ondřej Žák

ID: 98472

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Návrh optické přístupové sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor návrhu optické přístupové sítě. Zaměřte se na prvky fyzické vrstvy a technologii výstavby. Zvažte výhody a nevýhody možných připojení FTTx. Porovnejte jednotlivé topologie a standardy u optických sítí typu PON. Proveďte návrh modelu tohoto typu sítě v lokalitě s ohledem na návrhové postupy používané v praxi a doporučení ITU. Dále proveďte simulaci navržené sítě a diskutujte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P.: Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras, MIKROKOM, Praha 1998
- [2] PFEIFFER, Thomas, et al. OPTICAL FIBERS PAVE THE WAY TO FASTER BRODBAND ACCESS. In PFEIFFER, Thomas, et al. Alcatel Telecommunications Review. 2005th edition. [s.l.] : [s.n.], [2005]. s. 1-9.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Pavel Reichert

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Anotace

Diplomová práce se zabývá přístupovými sítěmi, zejména pak jejich optickou variantou ve verzi pasivních sítí. Teoretická část práce je soupisem jednotlivých druhů pasivních optických přístupových sítí, je opatřena jejich základním popisem, který dále pokračuje uvedením a charakteristikou možností propojení optických přípojek, zákazníků včetně topologií v distribuční síti. Rozbor jednotlivých druhů sítí a možností jejich fyzického a logického provedení je základem pro úspěšný návrh a vyhotovení budoucí optické přístupové sítě.

Praktická část práce se věnuje analýze naměřených dat stávající metropolitní sítě s možností využití pro vybudování optické přístupové sítě v Brně, lokalitě Žlutý kopec – Preslova. Vyhodnocení dat ukázalo, že je možné navázat na již instalovanou síť, a proto je vytvořen návrh zmíněné přístupové sítě. Zvolená lokalita je v práci detailně rozebrána a znázorněna situačními schémata místa a konkrétních zákazníků, kteří budou připojeni pomocí pasivních rozbočovačů k centrálnímu bodu sítě. Následně je vytvořen projekt optické přístupové sítě na základě analyzovaných dat z měření. Projekt představuje rozbor a popis způsobu řešení plánované optické přístupové sítě za účelem přivedení služeb Triple Play zákazníkům.

V rámci vyhodnocení realizovatelnosti projektu a ověření parametrů fyzické vrstvy sítě byla provedena její simulace v prostředí OptiSystem. V souladu se zhodnocením výsledků je prokázána možnost úspěšného provozu optické přístupové sítě s atributy zapsanými v jejím návrhu.

Navržená síť je pasivního charakteru ve standardu GPON a v textu je popsána detailně její fyzická vrstva, navrhované přenosové rychlosti, útlumový a vlnový plán optické sítě. Práce zahrnuje konkrétní vedení HDPE chrániček a v nich zafouknutých mikrotrubiček včetně zakreslení do mapových podkladů a podrobné identifikace. Práce obsahuje charakteristiku jednotlivých použitých prvků, které jsou instalovány na trase – jejich počet, typ a eventuálně jejich délky. Diplomová práce uvádí technologii a postup výstavby přístupové sítě až do jejího zprovoznění.

Klíčová slova:

přístupová optická pasivní síť, GPON, FTTx, návrh, simulace, výstavba

Abstrakt

Diploma thesis is dealing with access networks, especially with the passive optical network. The theoretical part is a list of different types of passive optical access networks, including their basic description, which then goes on to feature connectivity options for optical units, customers, including topology of distribution network. Analysis of different types of networks and the possibility of physical and logical design is the basis for successful design and preparation of future optical access networks.

Practical part is devoting to data analysis of measurement existing metropolitan network to be used for construction of optical access network in Brno, Žlutý kopec – Preslova location. Data evaluation showed possibility of connecting with already installed network hence is created proposal of optical access network mentioned before. Selected location is analysed in detail and illustrated on situational scheme of location and customers, whose will be passive splitters to central office. Consequently is developed project of optical access network based on data analysed data from measurements. Project is study and description of planned solution of optical access network in order to bring Triple Play services to customers.

Within the interpretation of the feasibility of the project and verification physical layer parameters of network was made a simulation in OptiSystem. The possibility of successful operation of the optical access network with the attributes entered in its design is approved in accordance with the evaluation results.

The proposed network is passive in character of GPON standard, and the text describes in detail physical layer, proposed transmission speed, wave and attenuation plan of optical network. The work implies a specific line of HDPE ducts and microducts in them, including drawing the maps and identification in-depth. The work contains a description of the elements that are installed on the route – the number, type and eventually its length. Diploma thesis is introducing the technology and construction sequence of access network leading to its operational state.

Keywords:

optical access network, GPON, FTTx, proposal, simulation, construction network

Citace vysokoškolské práce

ŽÁK, O. *Návrh optické přístupové sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Reichert.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Návrh přístupové optické sítě* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 21. 05. 2011

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlu Reichertovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

Dále chci poděkovat společností Safibra, s.r.o a Optiwave Inc. za zapůjčení zkušební licence programu, ve kterém byly vyhotoveny simulace přístupové sítě.

V Brně dne 21. 05. 2011

.....

podpis autora

Obsah

Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	11
1. Přístupová síť.....	13
1.1. Základní pojmy.....	13
1.1.1. Telekomunikační síť.....	13
1.1.2. Přístupová síť.....	14
1.1.3. Charakteristika přístupových sítí.....	15
1.1.4. Činnosti, procedury, operace a služby zaštitěné přístupovou sítí.....	15
1.2. Rozdělení přístupových sítí.....	17
1.2.1. Dělení dle typu spojení.....	17
1.2.2. Dělení dle technologie přístupových sítí.....	17
1.2.3. Dělení dle použitého přenosového média.....	17
1.3. Nároky na přístupovou síť.....	18
1.3.1. Z pohledu provozovatele.....	18
1.3.2. Z pohledu zákazníka.....	19
2. Optické přístupové sítě.....	20
2.1. Členění přístupových optických sítí.....	20
2.2. Obecné složení optického přístupového systému.....	21
2.2.1. Optické síťové zakončení – ONT.....	22
2.2.2. Optická distribuční síť – ONU.....	22
2.2.3. Optická linková zakončení – OLT.....	22
2.2.4. Optická distribuční síť – ODN.....	22
2.3. Pasivní optické sítě.....	23
2.3.1. APON.....	24
2.3.2. BPON.....	24
2.3.3. GPON.....	25
2.3.4. EPON.....	25
2.3.5. XG-PON.....	26
2.3.6. 10G-EPON.....	27
2.3.7. WDM – PON.....	28
2.4. FTTx – vlákem do určitého bodu sítě.....	29
2.4.1. Fiber to the Building.....	29
2.4.2. Fiber to the Cabinet.....	29
2.4.3. Fiber to the Curb.....	30
2.4.4. Fiber to the Node.....	30
2.4.5. Fiber to the Exchange.....	30
2.4.6. Fiber to the Premises.....	30
2.4.7. Fiber to the Office.....	30
2.4.8. Fiber to the Home.....	31
2.4.9. Porovnání přípojek FTTx.....	31
2.5. Aktivní optické sítě.....	33

3.	Analýza naměřených dat optické trasy	34
3.1.	Původ dat	34
3.2.	Videomikroskop.....	34
3.3.	Transmisní metoda.....	36
3.3.1.	Detailnější analýza naměřených dat	37
3.3.2.	Zhodnocení naměřených dat.....	38
3.4.	Optický reflektometr	39
3.5.	Chromatická disperze CD	40
3.5.1.	Měření chromatické disperze vysílač → přijímač	40
3.5.2.	Zhodnocení chromatické disperze vysílač → přijímač	40
3.5.3.	Měření chromatické disperze jednosměrně	40
3.5.4.	Zhodnocení jednosměrného měření chromatické disperze	41
3.6.	Polarizační vidová disperze	41
3.6.1.	Měření polarizační vidové disperze vysílač → přijímač	41
3.6.2.	Zhodnocení polarizační vidové disperze vysílač → přijímač	42
3.6.3.	Měření polarizační vidové disperze jednosměrně	42
3.6.4.	Zhodnocení jednosměrného měření polarizační vidové disperze	42
3.7.	Komplexní závěr z analýzy naměřených dat	43
4.	Návrh optické přístupové sítě	44
4.1.	Rozbor návrhu sítě	44
4.1.1.	Metodologie rozboru nákladů sítě	44
4.1.2.	Ekonomicko-správní hledisko	44
4.1.3.	Provozně-technologické hledisko.....	45
4.1.4.	Přidružené náklady	46
5.	Technologie výstavby optických vláken	48
5.1.	Klasické instalace	48
5.1.1.	HDPE trubky	48
5.2.	Kabelovody a multikanály	49
5.2.1.	Samonosné kabely	49
5.3.	Progresivní a moderní trendy.....	50
5.3.1.	MCS Road	50
5.3.2.	MCS Drain.....	50
5.3.3.	Mikrotrubičkování	51
5.4.	Vnitřní instalace	51
6.	Vlastní návrh přístupové sítě	53
6.1.	Zaměření projektu	53
6.2.	Lokalita	53
6.3.	Situační plán lokality	54
6.4.	Použitá technologie.....	56
6.5.	Vlnový plán.....	57
6.6.	Útlumová bilance přístupové sítě	57
7.	Simulace přístupové sítě.....	61
7.1.	Převedení projektu do simulace	61
7.2.	Výstupy simulace.....	63

7.2.1.	Měření výkonu.....	63
7.2.2.	Spektrum signálu	63
7.2.3.	Zjištění časového průběhu signálu	64
7.2.4.	Měření chybovosti přenosové trasy.....	64
7.3.	Zhodnocení simulace	65
8.	Dokumentace projektu.....	66
8.1.	Realizace připojení přípojek FTTH	66
8.2.	Zavedení a popis trasy	67
8.3.	Nasazená technologie	69
	Závěr.....	71
	Seznam literatury	73
	Seznam použitých zkratk a symbolů	76
	Seznam příloh.....	79

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Začlenění jednotlivých typů sítí.	14
Obr. 1.2: Přenosový řetězec.....	16
Obr. 1.3: Členění spojů v přístupových sítích dle použitého média.	18
Obr. 2.1: Rozdělení optických přístupových sítí.	20
Obr. 2.2: Schéma elementů OAN.....	21
Obr. 2.3: Topologie optických distribučních sítí.....	23
Obr. 3.1: Znečištěný konektor (vlevo) a čistý konektor (vpravo).	35
Obr. 3.2: Příklad softwarem ConnectorMax.	36
Obr. 3.3: Náměr OTDR na 1310 nm vlákna s ID 05.....	39
Obr. 6.1: Zakreslení zamýšleného prostoru budoucí přístupové sítě. [29].....	54
Obr. 6.2: Zakreslení stávajících a budoucích optických tras v lokalitě. [29]	55
Obr. 6.3: Schéma připojení optické přístupové sítě k centrálnímu bodu.	55
Obr. 6.4: Zakreslení vedení nových vláken do kartografické mapy [30].	56
Obr. 6.5: Znárodnění zvolených vlnových délek přístupové sítě.	57
Obr. 6.6: Rozložení útlumu v jednotlivých větvích sítě.	59
Obr. 7.1: Rozkreslení zapojení jednotky ONU – konkrétně ONU-1-S01.....	62
Obr. 7.2: Zobrazení jednotky OLT a měřících přístrojů.....	62
Obr. 7.3: Výsledky měření výkonu na trase	63
Obr. 7.4: Spektrum vysílaného (vlevo) a přijímaného signálu (vpravo).	63
Obr. 7.5: Časový průběh signálu.	64
Obr. 7.6: Diagram oka rozhodnutí po příjmu na ONU (vlevo), na příjmu OLT (vpravo).	64
Obr. 8.1: Situační schéma rozložení jednotek ONU. [32].....	66
Obr. 8.2: Vedení mikrotrubiček a HDPE chrániček v přední části větve A.....	68
Obr. 8.3: Vedení mikrotrubiček a HDPE chrániček v zadní části větve A.	68

Seznam tabulek

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty přímou metodou pomocí OLTS.....	36
Tab. 3.2: Vypočítané referenční hodnoty jednotlivých vláken dle vstupních dat.	37
Tab. 3.3: Tabulka limitních hodnot vložného útlumu prvků.	38
Tab. 3.4: Výňatek a zdůraznění nevyhovujícího vlákna z tab. 3.1.....	39
Tab. 3.5: Naměřené hodnoty chromatické disperze vysílač → přijímač.....	40
Tab. 3.6: Naměřené hodnoty jednosměrného měření chromatické disperze.....	41
Tab. 3.7: Naměřené hodnoty polarizační vidové disperze vysílač → přijímač.....	41
Tab. 3.8: Naměřené hodnoty jednosměrného měření polarizační vidové disperze.....	42
Tab. 6.1: Nejdůležitější parametry zvolených vláken.	57
Tab. 6.2: Rozpis prvků trasy s kalkulací jejich útlumu pro větev A.	58
Tab. 6.3: Útlumové třídy PON dle [31].	59
Tab. 8.1: Přehled použitých součástí optické přístupové sítě OAN Žlutý kopec – Preslova. ..	70

Úvod

Cílem diplomové práce je vytvořit co nejkomplexnější pohled na problematiku návrhu optických přístupových sítí. Z tohoto důvodu je práce koncipována tak, aby objasnila principy a funkce přístupových sítí. Členěním sítí se postupně dostaneme od široce specifikovaného pojmu přístupových sítí ke konkrétní podoblasti sítí využívajících optických vláken. V práci jsou charakterizovány základní vlastnosti těchto sítí a dále činnosti, které spadají do oblasti jejich působnosti. V rámci přenosového řetězce je vymezen prostor, který zaujímají.

Pro přesné pochopení, jak budeme na pojem přístupové sítě nahlížet a definovat jej jsou v první kapitole rozebírány základní znaky přístupových sítí a postupným přechodem do užších podoblastí se dostáváme ve druhé kapitole k optickým přístupovým sítím, kterým bude jako celku věnován zbytek práce. Ve zmíněné kapitole se po krátkém rozčlenění dostaneme k meritu naší práce, tj. jednotlivým typům a topologiím těchto sítí, popisu jejich parametrů a primárních fyzických i logických prvků, z nichž jsou složeny. Této problematice a různým přístupům k realizaci optických sítí se věnujeme podrobně, protože jsou vstupními vědomostmi pro budoucí návrh vlastní sítě, jímž se budeme zabírat v další části práce.

Následující kapitola představuje praktickou část práce v podobě analýzy předaných naměřených dat Brněnské akademické počítačové sítě. Na souboru signifikantních měření jsou ukázány nejpodstatnější fyzické parametry optických vláken a jejich vztah, potažmo vliv na přenosový systém jako takový. Správné vyhodnocení těchto údajů je fundamentálním předpokladem pro budoucí návrh navazující přístupové sítě.

Čtvrtá kapitola společně s pátou tvoří kontinuální celek, zabývající se rozbořem návrhu a technologickým řešením výstavby optických sítí. Přináší metodologické a ekonomické rozvahy projektování optických sítí a jejich budování. V rámci diplomové práce chceme v těchto kapitolách shrnout nejvýznamnější faktory, které plánování sítě ovlivňují. S ohledem na tyto aspekty si klademe za cíl vytvořit prvotní představu o možnostech pro podrobnější návrh, který je předmětem následujících kapitol diplomové práce.

Samotným návrhem optické přístupové sítě v souladu s předchozími kapitolami se zabývá šestá kapitola, která přináší rozbor lokality, alternativy vytvoření konektivity pro odhadovaný počet zákazníků a zhodnocuje varianty systémů použitelných pro danou oblast s finálním výběrem jedné z nich. Obsahuje situační plán lokality a popisuje začlenění plánované přístupové sítě do stávající metropolitní sítě včetně vlnového plánu, útlumové bilance a orientačního zakreslení potenciálních zákazníků.

Na základě zvolené technologie a uvažovaného rozvržení sítě bude provedena simulace optické přístupové sítě pomocí programů k tomuto účelu určených. Její výsledky budou prezentovány a podrobněji zhodnoceny v sedmé kapitole.

V závěru práce bude vyhotovena projektová dokumentace navržené sítě včetně uvedení vybraných prvků sítě, jež by bylo třeba použít pro faktické vybudování sítě a popis kroků vedoucích k jejímu vyhotovení a zprovoznění.

Diplomová práce si klade za cíl porovnání standardů pasivních sítí a možných způsobů připojení optických jednotek k síti. S ohledem na návrhové postupy používané v praxi bude proveden návrh optické přístupové sítě ve zvolené lokalitě. Přestože cena vybudování optické sítě není nejpodstatnějším hlediskem návrhu plánované sítě, je cílem diplomové práce snaha o vybudování ekonomicky realizovatelného a provozně udržitelného projektu připojení koncových zákazníků v lokalitě. Pro ověření teoretické funkčnosti sítě před její fyzickou výstavbou bude součástí projektu provedení simulace a zhodnocení jejích výsledků jako mezikrok finalizace projektu.

Výstupem diplomové práce by měl být kompletní projekt včetně jeho dokumentace, postačující k detailnímu zakreslení vedení tras, umístění prvků a jejich následné realizace v praxi.

1. Přístupová síť

1.1. Základní pojmy

1.1.1. Telekomunikační síť

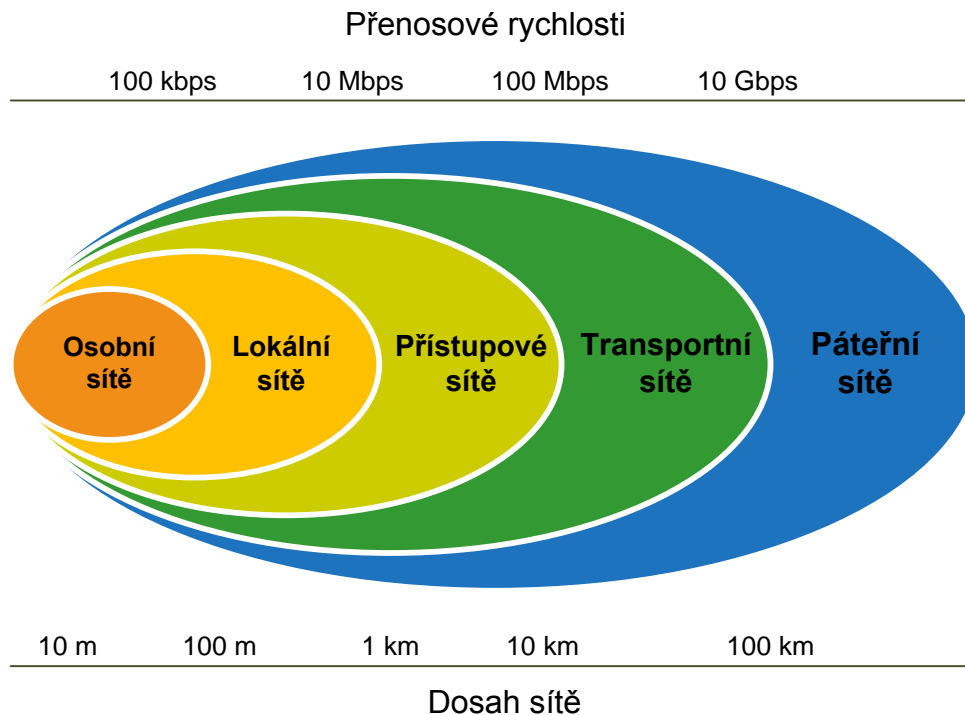
Pod pojmem síť budeme v dalším textu uvažovat veškeré prvky datové komunikace, tj. přenosová, spojovací, datová a jiná telekomunikační zařízení, která jsou uspořádána a určitým způsobem propojena za účelem poskytování prostředků potřebných pro komunikaci koncových uživatelů (zařízení) a přístup ke sdíleným zdrojům. Pojetí telekomunikací bude v našem užití představovat konvergované sítě, tj. integrované technologie klasických telekomunikačních služeb (hlas, telegraf, dálnopis) a datových služeb (počítačové sítě, datová centra aj.).

„V širším slova smyslu je telekomunikační síť souborem technických prostředků, sloužících k vysílání, přenosu, přeměně, příjmu a zpracování signálu. Nebo jinak, telekomunikační síť je souborem telekomunikačních zařízení (koncových, přenosových, spojovacích a pomocných), potřebných k poskytování telekomunikačních služeb.“, tato definice citovaná z [1] (kap. 1, str. 8) komplexně dokresluje představu o síti v souvislosti s tím, jakým způsobem na ni dále budeme nazírat.

Pojem síť budeme v kontextu předchozích vět chápat jako souhrn prostředků potřebných k výměně informací, předávání dat, komunikaci mezi prvky sítě či sdílení a využívání jejich zdrojů.

Dalším krokem, ať již technologickým, technickým či vědním, se postupně ve sdělovací později telekomunikační technice vytvořily podstatné podskupiny sítí, které blíže popisují jejich účel a umožňují užší členění v dnešní době rozlehlých vzájemně propojených sítí na tři základní – přístupové, transportní a páteřní. Grafické znázornění začlenění sítí si ukážeme na obr. 1.1 vycházejícího volně z [2]. Jedná se o ztvárnění myšlenky postupného vsazení sítí a jejich posloupnost přenášení informací v případě nejčastější situace, kdy chce zařízení z lokální sítě navázat spojení se zařízením mimo síť (internet). Zobrazujeme představu postupného využití přístupové sítě, lokální či osobní, ve snaze zajištění výše zmíněné komunikace. Přístupová síť, jejíž zdrojů je využíváno, umožní doručení v rámci jejich možností do lokality, kterou spravuje, případně provede první napojení na vnější systémy skrze transportní síť (a je-li to nezbytné iniciuje transfer dat směrem k páteřním linkám) Máme-li na mysli nejčastější situaci, kdy zařízení umístěné v lokální či osobní síti chce navázat relaci se zařízením mimo síť (nejčastěji do internetu).

Vzhledem k zaměření práce budeme pochopitelně největší prostor věnovat přístupovým sítím, ale pro úplnost uvedeme základní funkce páteřní sítě, mezi něž patří spolehlivý vysokokapacitní přenos mezi uzly páteřní sítě s důrazem na co nejnižší nadbytečnost (režijní data, management sítě) a maximální využití šířky pásma. Transportní (tranzitní, případně distribuční) síť se stará o předávání provozu mezi přístupovou a páteřní sítí.



Obr. 1.1: Začlenění jednotlivých typů sítí.

Obr. 1.1 vyjadřuje začlenění jednotlivých sítí od nejmenších osobních postupně směrem k páteřním. Dosah sítě (geografický rozsah) byl původním měřítkem pro jejich dělení na lokální, metropolitní a rozlehlé sítě.

Je třeba zdůraznit, že jednotlivé vzdálenosti, tj. dosah (příp. velikost sítě) a rychlosti se v současnosti značně překrývají a rozdíly se mohou v mnoha případech smývat a je těžké přesně vytyčit, kde se nachází určitá mezní hranice a nelze jednoznačně kategorizovat sítě dle rozsáhlosti a přenosových rychlostí jak tomu bylo v dřívějších dobách. Tento jev souvisí s neustálým rozvojem přenosových technologií, které se postupně rozšiřují na stále nižší úrovně v přenosové hierarchii jakožto nárůstem přenosových rychlostí a v určitých případech maximálních vzdáleností obecně. Grafické provedení dále znázorňuje myšlenku, s jakou budeme hledět na přístupovou síť a oblasti, které zaštiťuje, tj. zajištění přístupu k prostředkům pro jednotlivá zařízení, osobní a lokální síť a předávání dat vyšší hierarchické vrstvě sítě.

1.1.2. Přístupová síť

Pro naši další práci je nejdůležitější si ujednotit pojetí termínu přístupové sítě. Vyjdeme z následujících tří definicí, na jejichž základě si ujasníme podstatu přístupové sítě:

„Přístupovou síť tvoří prostředky, umožňující v odchozím směru aktivnímu uživateli – účastníkovi – připojení koncového zařízení k prvnímu uzlu sítě, který umí zprávu směřovat do jiných uzlů sítě a inverzně část od posledního takového uzlu ke koncovému zařízení pasivního účastníka.“ dle [1] na straně 9.

„Přístupovou síť lze obecně definovat jako soubor technických prostředků, které umožňují přístup zákazníkům ke službám poskytovaným provozovatelem sítě.“ citováno z [3] str. 16.

„Přístupová síť slouží k přenosu signálu mezi účastníky a síťovými uzly.“ viz [4] strana 13.

Z uvedených definic můžeme vytvořit průnik a přístupovou síť budeme rozumět souhrn telekomunikačních prostředků zajišťujících koncovým zařízením (účastníkům, uživatelům sítě) přístup k prvnímu uzlu sítě (ústředně) za účelem transferu signálu (informací, dat) mezi účastníkem a uzly přístupové sítě.

V souvislosti s přístupovou sítí se setkáváme s výrazem první/poslední míle, který zdůrazňuje fakt, že se jedná o připojení uživatele na první, respektive poslední bod veřejné sítě. I když jsou si tyto termíny v literatuře rovnocenné, čistě z formálního hlediska se ujednotíme na používání slovního spojení první míle v dalším textu práce, příkládajícího větší důraz důležitosti koncových zařízení (uživatelů) ze strany provozovatele sítě.

1.1.3. Charakteristika přístupových sítí

Základní popis přístupových sítí můžeme stručně vystihnout několika následujícími body [4]:

- koncentrace provozu z určitého prostoru k obslužnému uzlu,
- přenos dat na krátké a střední vzdálenosti (řádově po desítky kilometrů),
- přenos různorodých signálů – přenos dat, telefonní hovory, multimediální služby,
- různorodost použitých technologií,
- podléhají správě třetích osob, které jimi zprostředkovávají služby zákazníkům (operátoři, lokální poskytovatelé připojení, zprostředkovatelé konektivity),
- odlišná dostupnost a kvalita služeb – města, periferie, venkov, odlehlé lokality,
- konkurenční prostředí vytváří tlak na cenovou politiku a škálu nabízených služeb.

1.1.4. Činnosti, procedury, operace a služby zaštitěné přístupovou sítí

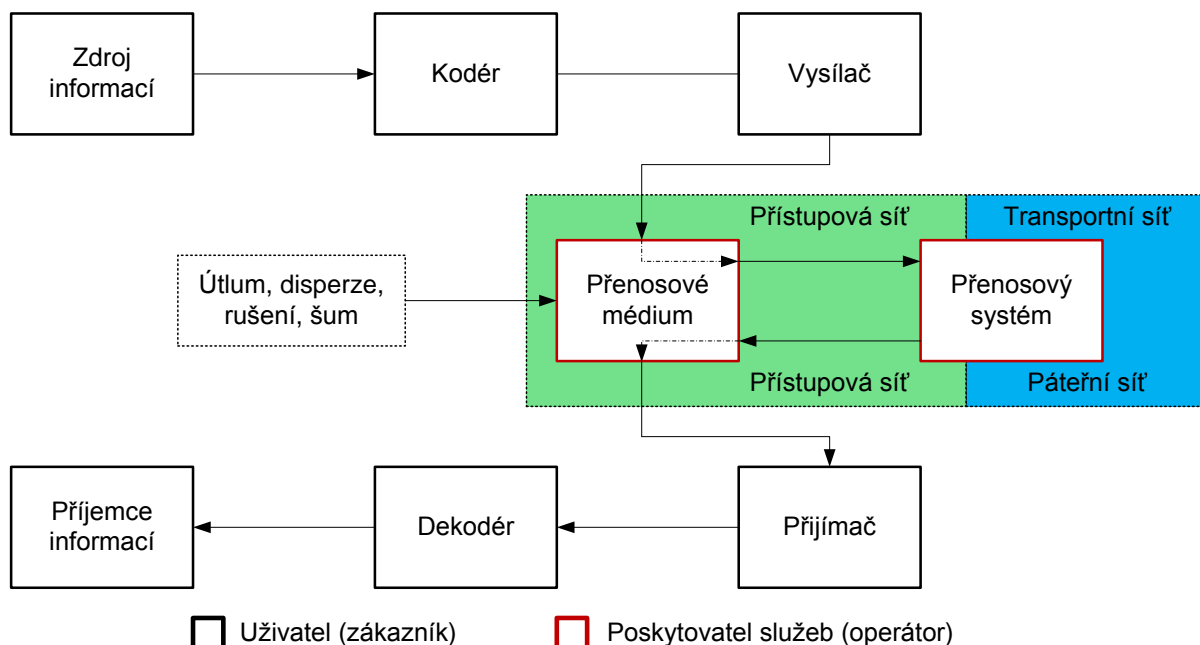
Funkce a oblasti spravované popisované sítě lze podle [3] a [4] shrnout následovně:

- transport signálu – komunikace (transfer dat) probíhá mezi značným počtem koncových zařízení a uzly sítě poskytovatelů služeb (telefonní ústředny, datová centra, servery, databáze atp.),
- grooming – klasifikování a třídění provozní zátěže, jenž umožňuje směrování sdružených signálů přístupovou sítí na příslušná rozhraní využívaných (dostupných) telekomunikačních služeb,
- koncentrace provozní zátěže – efektivnější využívání možností a kapacity skupinových signálů, řízení a síťových rozhraní,
- multiplexování a demultiplexování signálů – pro efektivní využití přenosových médií a prostředků směřující ke snížení kapacity a počtu potřebných fyzických tras; poskytování potřebné přenosové kapacity dle požadavků proměnných v čase i četnosti a charakteru odpovídajícím různým službám,
- adaptace účastnického rozhraní – přizpůsobení mezi účastnickým koncovým zařízením a transportním (multiplexním) zařízením přístupové sítě povaze přístupové sítě, tzn. signalizace, zajištění synchronizace, monitoring, napájení,

- adaptace síťového rozhraní – podoba a charakter signálů užitých v síti, jejich úprava a konverze na standardizované formy příslušných služeb.

Adaptace účastnického a síťového rozhraní musí probíhat v kooperaci, aby byla zajištěna shodnost používaných typů signálů určitých vlastností, přístupu k médiu, kódování, multiplexování a protokolů pro úspěšnou komunikaci mezi koncovým prvkem na straně provozovatele sítě. Je možné více se o této problematice dočíst v [4], 2. kapitola a dále ve skriptech [3], kapitola 4.

Jiný náhled na rozložení přístupové sítě získáme při pohledu na přenosový řetězec a jeho jednotlivé bloky (podrobněji viz [5]). Situaci jsme pro názornost zjednodušili a neobsahuje bloky A/D převodníků, multiplexerů, modulátorů dalších možných bloků – pro podrobnější studium lze doporučit téměř libovolnou knihu základů telekomunikační a sdělovací techniky. Přenosový řetězec na obr. 1.2 vysvětluje přesný tok dat od uživatele (odesilatele) přes prvky poskytovatele služeb k příjemci dat.



Obr. 1.2: Přenosový řetězec.

Zdrojem dat je uživatel, který chce odesílat data (komunikovat se zařízením ve vzdálené síti – z pochopitelných důvodů zanedbejme komunikaci v rámci lokální sítě). Informace, které chce uživatel odeslat, se shromáždí, zapouzdří do odpovídajících datových jednotek a kodér se postará o kódování za účelem snížení redundance. V dalším kroku zvýší redundanci pro účely detekce a korekce chyb, dále může následovat prokládání apod. (obecně dle technologických požadavků zařízení a použité technologie pro přenos). Po průchodu tímto blokem jsou data předána vysílači, kde může docházet k multiplexování a dalším činnostem, ale v neposlední řadě dojde k modulaci dat do podoby signálu, který je vyžadován médiem a poté je přizpůsobený signál vysílán na médiu. Jak naznačuje obrázek, v průběhu vedení signálu médiem dochází k ovlivnění signálu rušením, šumy a dalšími jevy charakteristickými pro dané médium. Data dorazí přenosovým systémem do řídicího bodu, kde je analyzován jejich obsah (primárně cílová destinace) pro potřeby dalšího zacházení s daty v síti. O tom jak hluboko zasáhne

tok dat v hierarchii přenosového systému, rozhoduje vzdálenost zdroje od cíle a skutečné propojení sítí mezi nimi. Dále jsou data opětovně seskládána do podoby, v které byla přenášena a jsou odeslána směrem k cíli, který provádí inverzní operace vůči těm, které provedl odesílatel – tzn. příjem, dekódování a interpretace dat příjemci.

Prvky uživatelů jsou rámovány černě a poskytovatele červeně. Vysílač, resp. přijímač je obvykle ve vlastnictví (nájmu) uživatele a je vybrán s přihlédnutím k vlastnostem přístupové sítě poskytovatele služeb, který jeho volbu a zakoupení nejčastěji zprostředkovává anebo doporučuje.

1.2. Rozdělení přístupových sítí

Přístupové sítě můžeme členit dle několika parametrů, podobně jako veškeré telekomunikační sítě. Uveďme si tři základní druhy členění těchto sítí, které nám z různých pohledů odliší jednotlivé sítě, dle třídících faktorů do přehledných skupin. Tato tři hlediska nejlépe odráží náš náhled na vnímání přístupové sítě.

1.2.1. Dělení dle typu spojení

Existují dva základní typy spojení uživatelů k přístupové síti [4]:

- Bod-bod – přímá spojení, radiová a optická pojítka – např. FSO, vytáčené spojení.
- Vícebodové – všesměrové šíření, typické pro bezdrátové a mobilní sítě, dále PON, aj.

Toto členění je potřeba zmínit, jelikož se v zásadě nebudeme zabývat optickými spojeními typu bod-bod volným prostorem FSO. Nicméně je potřeba si uvědomit, že většinu technologií v přístupové síti je možné modifikovat do obou možností a velmi záleží na tom, v kontextu jaké vrstvy síťových modelů budeme o tomto členění hovořit. Uvedené příklady je třeba chápat při dělení spojení na fyzické vrstvě, kde propojení bod-bod znamená přímé spojení dvou bodů (kabelem, vláknem, směrovým optickým signálem) a vícebodové propojení na fyzické vrstvě tvoří rozbočovače a sdružovače signálu, multiplexory atd.

1.2.2. Dělení dle technologie přístupových sítí

Podle [6] je dalším z možných způsobů dělení přístupové sítě rozdělení technologií na:

- Jednosměrné (satelitní) – využívají okruhu, nemají zpětný kanál a z tohoto důvodu jsou nevyhovující pro požadavky moderních služeb (aplikací, internetu).
- Úzkopásmové obousměrné (vytáčené připojení, ISDN) – nízké přenosové rychlosti nedostatečné pro nabízení aktuálně požadovaných služeb (multimediální data, interaktivní stránky, IPTV a další) majících vysoké nároky na rychlý přístup a odezvu koncového zařízení.
- Širokopásmové obousměrné (xDSL, bezdrátové sítě, kabelové datové sítě, FTTx) – širokopásmové připojení umožňující přístupové rychlosti až desítky Mbit/s.

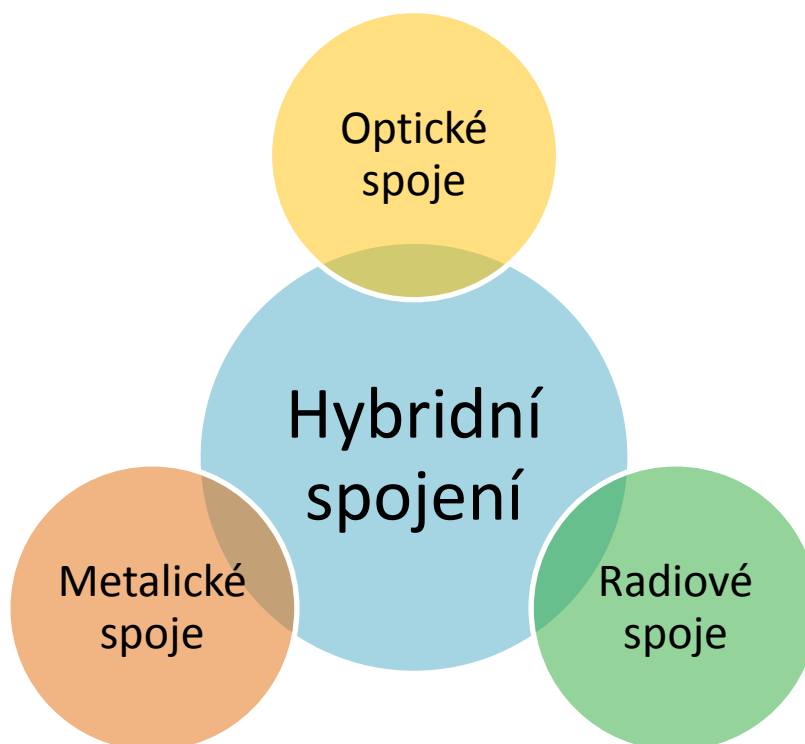
1.2.3. Dělení dle použitého přenosového média

Dle způsobu připojení koncových zařízení k ústředně [4]:

- Metalické – využití kroucených párů měděných vodičů, koaxiálních kabelů.

- Radiové – mobilní sítě, Wi-Fi a Wi-MaX sítě, satelitní spoje a ostatní radiová pojítka.
- Optické – optická vlákna, PON a AON, FTTx, optické směrové spoje FSO, IrDA.
- Hybridní – využívají kombinaci předchozích typů spojení.

Graficky výše zmíněné rozčlenění přehledně znázorňuje obr. 1.3. Na daném obrázku se snažíme naznačit, že skupina hybridních sítí je aktuálně nejvýznamnější, což má kořeny v tom, že původní telekomunikační sítě byly vystavěny na metalických základech a v současné době jsou jejich části zaměňovány za jiná přenosová média a používají jiné přenosové technologie, než ty, pro něž byly vybudovány.



Obr. 1.3: Členění spojů v přístupových sítích dle použitého média.

1.3. Nároky na přístupovou síť

Nároky na přístupovou síť můžeme členit do dvou skupin, které nabízí odlišné náhledy a požadavky provozovatele a zákazníka, jak je možné se dočíst například v [4].

1.3.1. Z pohledu provozovatele

Při projektování a návrhu přístupové sítě se pro úspěšné fungování a očekávatelný budoucí rozvoj sítě musíme držet následujících zásad:

- Rozšiřitelnost rozsahu služeb s podporou různých tříd QoS (kvality služeb).
- Efektivnost a flexibilitnost sítě.
- Jednoduchost integrace nových služeb a požadavků.
- Konsolidace uzlů – tj. redukce jejich počtů s ohledem na správu a potřebné řízení.
- Redukce nákladů na správu a údržbu zařízení.
- Pořizovací náklady a optimalizace ceny.

Pokud bychom se měli vžít do role provozovatele (případně vlastníka) přístupové sítě bude náš pohled dvojitý – musíme zajistit, abychom vytvořili konkurenceschopný návrh a realizaci, kterou je možné nějakým způsobem (ideálně co možná nejjednodušším) dále rozvíjet v budoucnu. Protichůdným tlakem je zformovat co možná nejrentabilnější a finančně zajímavé řešení, tj. takový projekt, který v sobě skloubí přijatelnou míru nákladů na vytvoření záze-
mí potřebného k provozu služby (zařízení, obsluha, dohled a údržba) a návratnost vložených aktiv do této služby, nezbytných pro její zprovoznění. Jinými slovy zvažujeme, zda nebudeme budovat službu, jejíž návratnost není zaručena, či v horším případě není reálná. Investice do kvalitních zařízení není nejlevnější záležitostí, ale ve většině případů skýtá později více možností rozvoje sítě. Další zvažovanou položkou je snaha o vytvoření sítě, která bude v ideálním případě konfigurovatelná a udržovatelná vzdáleným přístupem z centrálního ma-
nagementu, čímž redukuje náklady na práci v terénu, platy zaměstnanců a transport osob s potřebným vybavením. Moderní tendencí je vysoká automatizace chodu sítě s minimální potřebou zásahu lidských a dalších zdrojů (tj. výdajových položek).

1.3.2. Z pohledu zákazníka

Uvažujme uvědomělého zákazníka, který má rámcovou představu o tom, jaké služby chce využívat (nároky na šířku pásma, doplňkové služby), a je schopný si zvolit z nabídek pro něj nejvhodnější a nejpřijatelnější, potažmo dostačující. Pro takto smýšlejícího zákazníka jsou nejdůležitější následující aspekty:

- Zajištění požadovaných parametrů kvality služeb QoS – zpoždění, odezvy, dostupnosti a kvality přenosu.
- Připojení na standardní rozhraní nezávisle na typu sítě.
- Technologie Plug & Play¹ či podobný princip a charakter služeb.
- Zákaznická a servisní podpora ze strany provozovatele.
- Cena a celková kvalita poskytovaných služeb.

Uživatel se při výběru poskytovatele připojení řídí srovnáním ceny a kvality nabízených služeb, referencemi a předchozími zkušenostmi. Drtivá většina zákazníků se neorientuje na poli telekomunikačních a informačních služeb a dá se zjednodušeně říci, že pro ně není podstatné principiální technologické řešení služby, ale samostatný fakt, zda je služba dostupná a v odpovídající kvalitě či nikoliv. Tímto uměle vytváří tlak na provozovatele služeb, který ve snaze naplnění spokojenosti zákazníka (zachování finančních příjmů z něj plynoucích) podniká kroky pro dodržení svých závazků, při vynaložení pro něj únosných finančních nákladů

Společným zájmem jak uživatelů, tak provozovatelů sítě je spolehlivá, funkční síť, která netrpí výpadky, obsahuje záložní zdroje (duplikace, zálohování – tras i dat) a alternativní možnosti v případě selhání některého ze zařízení či prvku sítě. V ideálním případě nabízí v maximální možné míře dostupnost 24/7.²

¹ Plug & Play – označuje přístup „zapoj a hraj“, tzn. intuitivní jednoduché ovládání, instalace a konfigurace zařízení s co možná nejnižšími nároky na technické či jiné znalosti uživatele.

² 24/7 původně anglický výraz vyjadřující dostupnosti dvacet čtyři hodin denně, sedm dní v týdnu.

2. Optické přístupové sítě

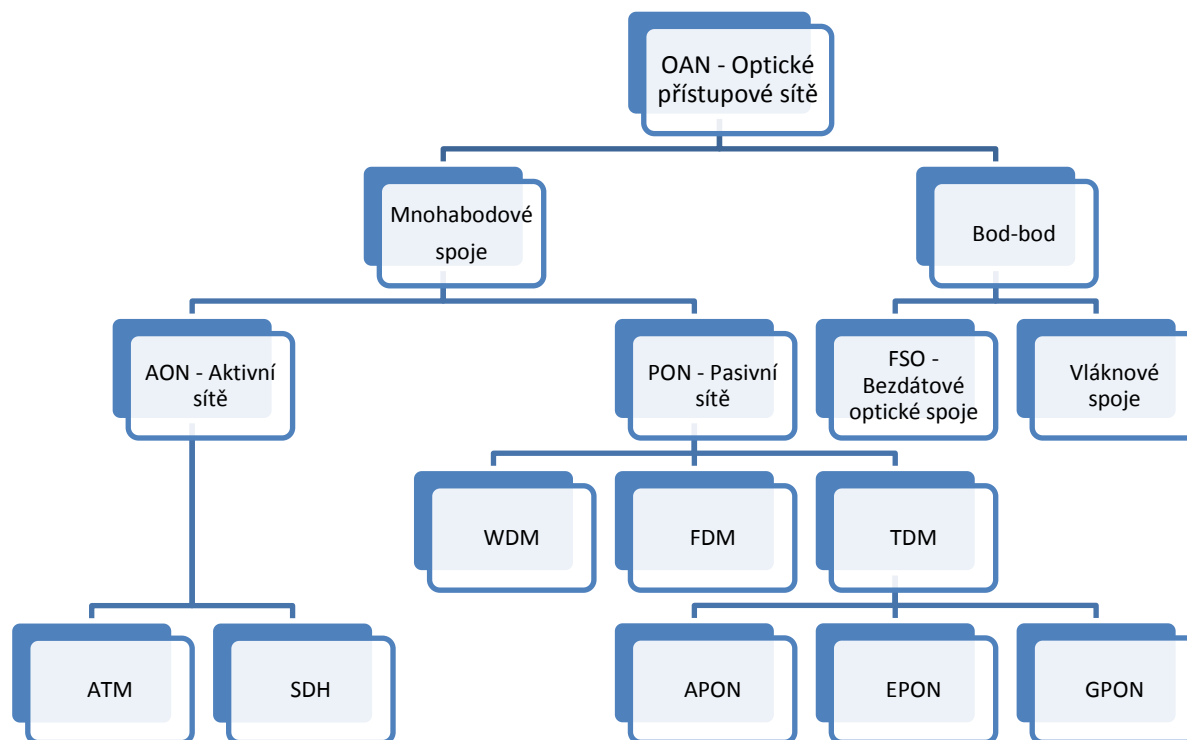
V předchozí kapitole jsme rozebrali definice přístupové sítě, její funkce, oblast správy a působnosti, ať již geografickou či logickou. Určili jsme na ní kladené nároky prostřednictvím uživatele (zákazníka) a na druhé straně správce, popř. vlastníka sítě. Stanovili jsme základní členění přístupových sítí a v této kapitole se blíže zaměříme na její podmnožinu, která v určité části přenosu využívá optických vláken.

Již jsme se zmínili o tom, že v páteřních sítích jsou téměř výhradně využívána optická vlákna. Totéž můžeme tvrdit o transportních sítích, které jsou vystavěny na různých technologiích, které používají jako médium optických vláken. Pro obě předchozí vrstvy je charakteristické, že pracují se objemnými toky dat, pro jejichž transfer je třeba mít k dispozici odpovídající kapacity ať již médií či zařízeních jako takových. Postupem na nižší vrstvu se střetáváme s různým postupem zavádění optických vláken v přenosových trasách vedoucích od uživatelů. Je zřejmé, že jiné nároky na přístupovou síť bude mít korporátní zákazník a jiné běžný uživatel (skupina uživatelů). V této kapitole dále rozvedeme základy optických sítí a způsob, jakým se jsou tyto sítě tvořeny a členěny.

Naposledy nezapomeňme zdůraznit, že v optických přístupových sítích OAN (Optical Access Network) nevyužíváme pouze optických vláknových spojů, ale rovněž optických spojů volným prostorem, které nebudeme blíže rozebírat.

2.1. Členění přístupových optických sítí

S ohledem na dělení přístupových sítí v podkapitole 1.2, přistupuje se k členění optických přístupových sítí, tak jak je ukázáno na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Rozdělení optických přístupových sítí.

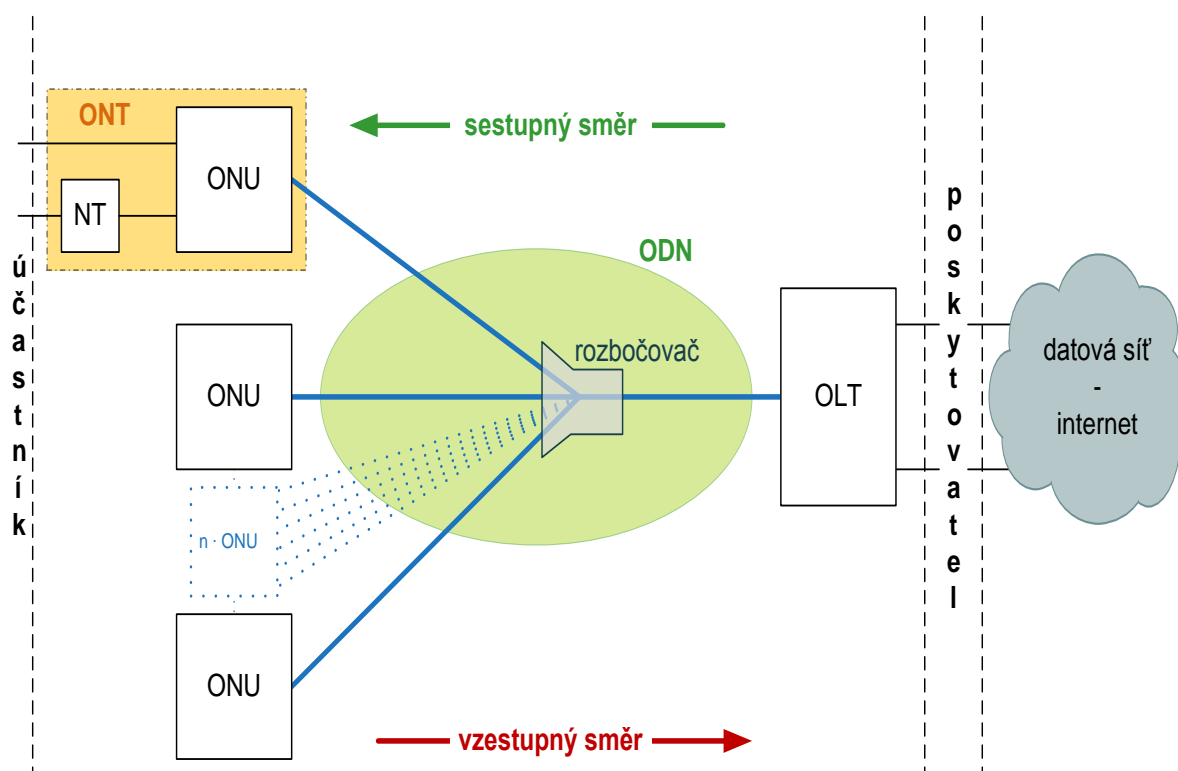
Tento obrázek je přehledem rozdělení podle komunikace, druhů sítě, použité technologie, přenosového systému a v případě pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network) z hlediska druhu multiplexování. Přihlédneme-li k bližší specifikaci zadání naší práce, je patrné, že nás bude nejvíce zajímat větev mnohabodových spojů a pasivních sítí. Klasických spojů typu bod-bod se dotkneme pouze okrajově.

2.2. Obecné složení optického přístupového systému

Optické přístupové sítě jsou konglomerátem základních funkčních prvků, které principiálně popisují provozní účel daného zařízení a jeho umístění v přenosovém řetězci. Pomocí primárních optických jednotek je možné popsat celou soustavu optické přístupové sítě.

Obr. 2.2 níže (v návaznosti na [7] a [8]) představuje základními bloky OAN, jimiž jsou:

- **ONT (Optical Network Termination)** – optické síťové zakončení; koncové zařízení na rozhraní účastnické a přístupové části sítě, zprostředkovává funkce mezi těmito rozhraními, zajišťuje spojení koncových zařízení účastnické sekce s přístupovou sekcí.
- **ONU (Optical Network Unit)** – optická síťová jednotka; entita zaopatřující funkce přechodu rozhraní mezi optickou a metalickou částí sítě.
- **OLT (Optical Link Termination)** – optická linková zakončení; jedná se o rozhraní mezi přístupovou sítí a sítěmi telekomunikačních služeb (datové sítě, internet, atd.).
- **ODN (Optical Distribution Network)** – optická distribuční síť; souhrn optických transportních prostředků, jež se nacházejí mezi jednotkami OLT a ONU (popř. ONT).



Obr. 2.2: Schéma elementů OAN.

2.2.1. Optické síťové zakončení – ONT

Zakončení na straně uživatele, které je odpovědné za přizpůsobení protokolů a jejich konverzi mezi rozhraním uživatele (příp. jeho lokální sítí) a optickou přístupovou sítí. V tomto zařízení dochází k ukončení optického vlákna a přímého propojení sítě zákazníka k tomuto zařízení. NT (Network Termination) – se v telekomunikacích používá k obecnému označení síťového zakončení, které je většinou lokalizováno na straně uživatele.

2.2.2. Optická distribuční síť – ONU

V tomto případě mluvíme o zobecněné verzi ONT, zakončení na uživatelské straně. Hlavní rozdíl oproti předcházející optické jednotce je v jejím umístění v hierarchii OAN a v jejím účelu realizace konektivity koncového uživatele s využitím metalické či bezdrátové sítě, jež na zařízení ONU bezprostředně navazuje. Blíže bude tato nuance vysvětlena v kapitole 2.3.7 věnující se konkrétnímu umístění ukončení optické sítě. Pro tento okamžik pouze uvedme, že hlavní rozdíl lze spatřit v počtu připojených uživatelů³, který je v tomto případě vícenásobný na rozdíl od ONT. S přechodem na jiný typ signálu na rozhraní přenosových médií je evidentní konverze z optického signálu na elektrický nebo rádiový a naopak.

2.2.3. Optická linková zakončení – OLT

Optická ukončovací jednotka se nachází na straně poskytovatele připojení a je v majetku telekomunikační společnosti. Stará se o připojení optické sítě k páteřním sítím, konverzi použitých protokolů, distribuci řízení a taktovacích signálů. Podstatnou složkou její činnosti je správa a dohled nad jednotlivými koncovými jednotkami ONT a ONU.

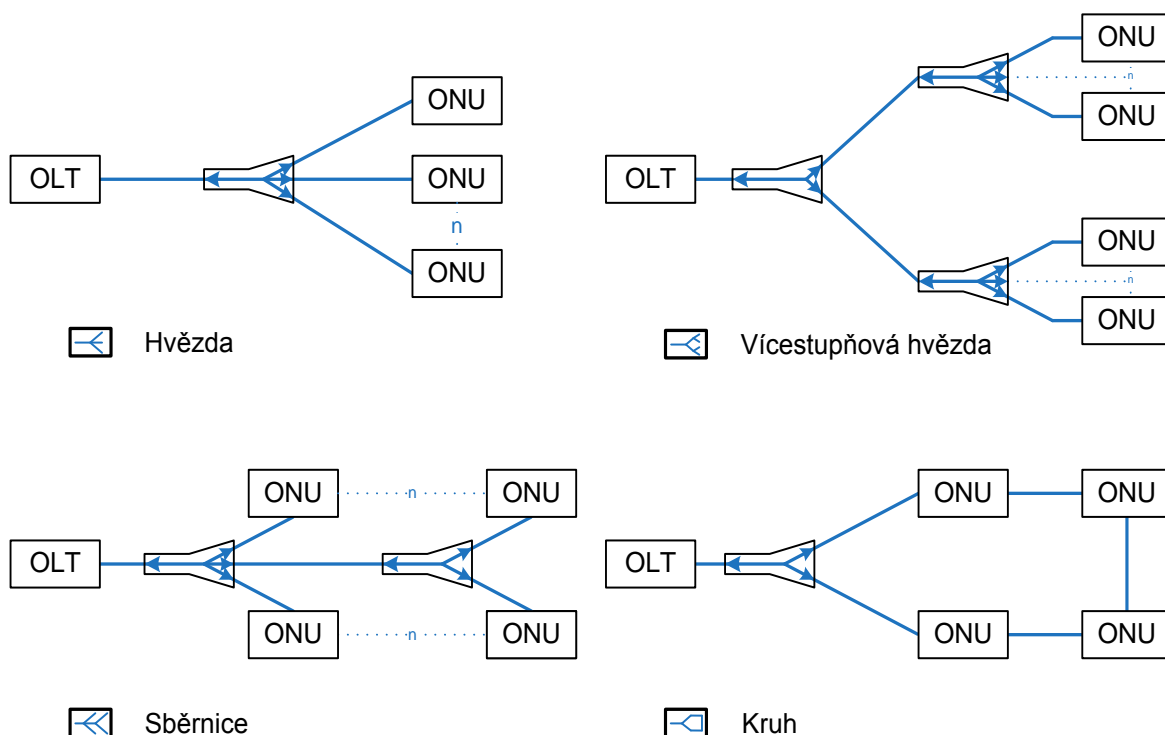
2.2.4. Optická distribuční síť – ODN

Je tvořena souborem všech optických přenosových prostředků mezi jednotkami OLT a ONT či ONU. Do této oblasti zahrnujeme spojovací a propojovací prvky – optická vlákna, konektory, spojky, filtry, rozbočovací prvky – aktivní či pasivní optické rozbočovače, vlnové filtry, multiplexery. Její začlenění v komplexu přístupové sítě je patrné z obr. 2.2

Optické sítě se většinou nacházejí v ODN v několika signifikantních rozloženích a uspořádáních prvků. Grafické znázornění těch nejpoužívanějších si lze prohlédnout na obr. 2.3. Zatímco topologie hvězdy se sama o sobě příliš nevyužívá, v praxi se často setkáváme s uspořádáním v podobě vícestupňové hvězdy, která se používá nejčastěji k připojení domácností. Sběrníková topologie podobná Ethernetu se uplatňuje například pro univerzitní účely. Strukturu uspořádání v podobě kruhu můžeme realizovat podnikových sítí, jelikož zaručuje oddělení vnitřní sítě a citlivých dat od vnější sítě a zároveň nabízí vysokorychlostní spojení mezi jednotlivými uzly v rámci privátní sítě.

³ V tomto kontextu chápeme jednoho uživatele jako subjekt, který vlastní danou jednotku (například člen rodiny). Rodina je složena z více osob, ovšem v tomto případě je budeme považovat společně za jednoho uživatele a odlišnými uživateli v tomto případě budeme rozumět členy jiné rodiny vlastníci jiné fyzicky odlišitelné zařízení či jeho část.

Primární naznačené struktury je možné kombinovat a zvolit je dle jejich individuálních charakteristik s ohledem na požadavky ze stran poskytovatele a zákazníka. Uvedené topologie se neliší pouze fyzickou organizací, nýbrž i provozními a investičními náklady. Limitujícími faktory výběru jsou maximální přípustná délka optické cesty mezi nejvzdálenější ONU a odpovídajícím OLT. Maximální délka je určena zvoleným typem vlákna a jeho měrným útlumem (celkovým útlumem v závislosti na délce trasy), útlumem optických rozhraní jednotek OLT a ONU, počtem rozbočovačů v cestě, spojek a konektorů. Dalšími faktory, které dále do výběru vstupují, jsou rozdíly vzdáleností mezi jednotlivými jednotkami ONU a OLT, s nimiž, resp. s různě velkým zpožděním signálu, je třeba rovněž kalkulovat (vyrovnávání zpoždění, začlenění do časového multiplexu aj.).



Obr. 2.3: Topologie optických distribučních sítí.

Praktická realizace všech jmenovaných zařízení je závislá na konkrétní technologii, použité v optické přístupové síti a pochopitelně výrobcem vybraného zařízení.

2.3. Pasivní optické sítě

„Pasivní optická přístupová síť obsahuje kromě aktivních optických koncových zařízení na straně poskytovatele a koncových uživatelů pouze čistě pasivní prvky.“ [9]. PON síť vychází z idey připojení více uživatelů prostřednictvím jednoho vlákna nebo páru vláken společných pro více uživatelů, čímž docílíme funkčního sdílení přenosové šířky pásma mezi jednotlivými účastníky.

V článku [10] se můžeme setkat s tímto názorem: „Označení pasivní optická síť není příliš přesné, protože rozbočovače jsou jedinými jejími pasivními prvky, ostatní prvky jsou aktivní.“ Přes polemiku nad slovem jedinými (např. konektory určitě patří mezi další pasivní prvky

sítě – pokud je síť obsahuje, což s velkou pravděpodobností ano), je možné tímto výrokem demonstrovat nejpodstatnější rozdíl mezi pasivními a aktivními sítěmi.

Pasivní optické sítě se většinou nacházejí v ODN v několika topologiích (různých rozloženích a uspořádáních prvků) jak již bylo ukázáno na obr. 2.3. společně s předcházejícím popisem jednotlivých základních stavebních prvků. Primárním prvkem pasivní sítě, jak bylo dříve zmíněno, je optický rozbočovač, který je schopen pasivním způsobem rozčlenit optické záření do více vláken (směrem k uživatelům). Je nutné mít na paměti, že rozbočovač v opačném směru (tj. od zákazníků) optické záření slučuje do společného vlákna (viz [8] kap. 11). Pasivním charakterem optické rozbočnice se rozumí to, že není třeba k ní přivádět napájení, což vede nejen k ekonomické úspoře, ale zvyšuje spolehlivost sítě – pasivní rozbočovač nepodléhá lokálním výpadkům energetické soustavy. Pro jeho označení se používá často i v české literatuře anglického výrazu splitter.

Jako maximální délka trasy pro PON se v literatuře (např. [7], bod 8.15) udává 10–20 km s ohledem na použité prvky, počet rozbočovačů a jejich dělicí poměr. Maximální délkou trasy rozumíme vzdálenost k poslednímu účastníku od výchozího (centrálního) bodu sítě na straně poskytovatele.

Vzhledem k použitému protokolu na druhé (linkové, spojové) vrstvě referenčního modelu ISO/OSI vzájemně od sebe odlišujeme varianty pasivních optických sítí. Z tohoto faktu je zároveň odvoditelná jejich reciproční inkompatibilita.

2.3.1. APON

Pasivní optická síť APON (ATM-based PON) byla prvním normalizovaným standardem pro PON v doporučení ITU-T G.983.1 z roku 1998. Využívá buňkového přenosu ATM ve dvou podporovaných přenosových módech [7]:

- symetrickém s rychlostí 155,52 Mbit/s v obou směrech (downstream i upstream),
- asymetrickém s rychlostí 622,08 Mbit/s ve směru k uživateli (downstream) a rychlostí 155,52 Mbit/s ve zpětném směru od uživatele k síti (upstream).

Výhodou této technologie je nativní podpora tříd QoS nasazením ATM technologie. Způsob řešení duplexního provozu je shodný s organizací v síti BPON a je popsán níže.

2.3.2. BPON

Pochází ze schváleného standardu ITU.T G.983.3 BPON (Broadband PON) z roku 2001. Jedná se o rozšíření předchozího standardu s cílem zavedení symetrického přenosu s rychlostí 622,08 Mbit/s v obou směrech, jak je uvedeno v [7].

Standards pro APON a BPON uskutečňují transport duplexního provozu pomocí simplexního SDM (Space Division Multiplexing) – *prostorově dělený multiplex*, tzn. přenosem každého směru vysílání dat vlastním vláknem nebo využitím jednoho vlákna G.652 nasazením vlnového multiplexu WDM. V případě vlnové dělení jsou určena odlišná pásma přenosu [11]:

- 1260 až 1360 nm – pro vzestupný směr (upstream).
- 1480 až 1500 nm – pro sestupný směr (downstream).

Další volitelné možnosti a způsob seskupování ATM buněk rozebírá [11].

2.3.3. GPON

Technologie je definována standardem G.984.1 (Gigabit-capable PON) z roku 2003. Specifikace tohoto standardu vycházejí z předchozích specifikací řady G.983 pro širokopásmové pasivní optické sítě. Jedná se o rozšíření v podobě umožnění nasazení vyšších přenosových rychlostí 1244,16 a 2488,32 Mbit/s při zachování principů širokopásmového optického systému. Obě přenosové rychlosti je možné nasadit v symetrickém módu, nebo jako přenosovou rychlost ve směru sestupném (směr od sítě poskytovatele k uživateli). V opačném směru (vzestupném) se používají nižší rychlosti uvedené ve standardu G.983 – tj. 155,2 Mbit/s, 622,08 Mbit/s, případně 1244,16 Mbit/s (ze zřejmých důvodů pouze pro vyšší ze dvou výše zmíněných primárních rychlostí). Ustanovení přenosových rychlostí popisuje publikace [7]. Schéma rozdělení vlnových délek pro jednotlivé směry (sestupný a vzestupný) je stejné jako v bodě 2.3.2.

GPON umožňuje přenos v přirozeném tvaru (nativním režimu), tj. hlas ani data není třeba zapouzdřovat do ATM buněk nebo IP paketů pro jejich transfer sítí viz [6]. K tomuto účelu je využíváno varianty protokolu GFP – generického protokolu pro tvorbu rámců (jednoduchost, minimum režie). Provádění předávání provozu se děje na základě ATM buněk nebo metody GEM (GPON Encapsulation Method). Metoda GEM se používá k přenosu GPON rámců majících proměnou délku. Rozbočovací poměr určující maximální počet účastníků je 1:64 (perspektivně 1:128).

Další výhodou Gigabitová PON je dle [6] úspora režijních informací, dále nabízí úspory v kapitálových nákladech a provozních výdajích. Obdobný závěr týkající se pořizovacích, potažmo provozních nákladů, naznačuje i citace z [10]: „*Od prvků GPON se očekává nízká cena a vysoké nasazení v sítích PON.*“

Podrobnější informace je možné se dočíst v [12], kde je mimo jiné zmíněno, že přes převzetí a zachování mnoha společných prvků nejsou pasivní sítě APON a BPON se sítí GPON plně kompatibilní. Příčinu lze částečně nalézt v použití GEM protokolu.

2.3.4. EPON

Jak již samotný anglický název Ethernet-based PON rozepisující zkratku napovídá, máme co dočinění se standardem využívajícím technologii Ethernet na spojové vrstvě. Zásadní změnu nepřináší EPON jenom v přechodu od ATM k Ethernetu, ale i v odlišnosti pracovní skupiny a v celkovém spadání pod jinou organizaci – jmenovitě specifikace standardem IEEE 802.3ah (2001) podle [7]. Rodinou řešení na bázi Ethernetu se IEEE obecně zabývá v 802.X specifikacích. Vyjma označení EPON se velmi často setkáváme i s pojmenováním Ethernet v první míli (EFM) viz seznam použitých zkratk. Koncepce je jednoduchá a vychází z následujícího předpokladu:

Jelikož většina lokálních LAN sítí je postavena na technologii Ethernet dá se předpokládat že, podaří-li se prosadit této technologii rovněž v přístupových sítích, odpadne složité a neefektivní konvertování nebo přizpůsobování protokolů odlišných technologií, čímž dosáhneme zjednodušení připojování lokálních sítí přímo k přístupové síti.

Zde je nutné podotknout, že celková režie spojená s nezbytným převodem mezi různými síťovými technologiemi ubírá značnou část kapacity (dle [6], v úvodu kap. 7, až 50 %). V souladu s [6] a důvody všeobecného rozšíření Ethernetu lze vidět možnosti uplatnění EPON v podobě jednoduché technologie s dostatečnou šířkou pásma, snadno instalovatelné a rozšířitelné.

S EPON se setkáváme ve dvou typech specifikací rozhraní – typ 1 (1000 Base-PX10) a typ 2 (1000 Base-PX20). Oba typy odlišuje překlenutelnou vzdáleností (10 respektive 20 km) a rozbočovacím poměrem. Zatímco první typ nabízí dělicí poměr 1:16, u typu dva je k dispozici rozbočení 1:32. Dále popisované parametry budou pro oba popisované typy shodné, z čehož je možné odvodit přednostní a perspektivnější využití typu 2 pro jeho lepší parametry.

Přenosové rychlosti jsou uspořádány symetricky 1,25 Gbit/s na fyzické vrstvě. Rozdělení podporovaných vlnových délek pro přenos Ethernetových rámců s pevnou délkou 2 ms je pro jednotlivé směry následující:

- 1260 až 1360 nm – pro vzestupný směr (upstream).
- 1480 až 1500 nm – pro sestupný směr (downstream).

Protokolem zavedeným na druhé vrstvě referenčního modelu ISO/OSI je Ethernet. Výhodou použití Ethernetu v přístupové síti je jeho snadné začlenění do metropolitních (transportních) sítí, kde se uplatňuje často SDH. Zapouzdření Ethernetu do rámců zpřístupní využití stávající infrastruktury. Nevýhodou Ethernetu je jeho přetrvávající absence implementace QoS, nezajišťování šířky pásma a nepodporování tradičních služeb TDM.

Více je možné se dočíst v [11] a [13], z nichž bylo čerpáno.

2.3.5. XG-PON

Nový standard přinášející přenosovou rychlost 10Gbit/s a řešící reverzní kompatibilitu se sítěmi typu GPON byl vyvinut mezinárodní telekomunikační unií ITU-T (doporučení ITU-T G.987). Nasazením nového systému je umožněna společný provoz předchozí a nové generace sítě GPON. Nový standard využívá původního časově děleného přístupu ke sdílenému optickému vláknu. Mezi základní parametry tohoto návrhu patří využití rozsahu vlnových délek 1575-1580 nm pro směr sestupný a pro směr vzestupný 1260-1280 nm. Zpětná kompatibilita je zajištěna, na rozdíl od 10G-EPON a EPON, plně pomocí vlnového oddělení. V souvislosti se zvolenou vlnovou oblastí vzestupného směru provedla ITU-T aktualizaci původního standardu GPON a změnila rozsah vlnových délek vzestupného směru z 1260 až 1360 nm na 1290 až 1330 nm, čímž nedochází k vzájemnému prolínání vlnových délek a dojde k úplnému oddělení. Přenosová rychlost (s využitím kódování NRZ – Non Return Zero) byla zvolena pro směr vzestupný shodně jako u předchozí generace GPON, tj. 2,48832 Gbit/s (odpovídá rychlosti řádu STM-16 v SDH). V sestupném směru má přenosová rychlost hodnotu 9,95328 Gbit, což koresponduje s řádem STM-64 synchronní digitální hierarchie. Zmíněné rychlosti odpovídají SDH záměrně, protože vychází z jejích principů. Technologie XG-PON nenabízí symetrickou variantu, ale zavádí nový maximální rozbočovací poměr 1:256. Limit maximálního fyzického dosahu zůstává nezměněn – 20 km. Navržený standard implementuje pozměněný zapouzdřovací protokol XGEM (XG-PON Encapsulation Method) vyvinutý z předchozího protokolu GEM. S ohledem na praktické zkušenosti se sítí GPON dochází

k zavedení silnějších bezpečnostních opatření a zároveň realizaci úsporných režimů provozu, za účelem dosažení snížení spotřeby elektrické energie a tím i finančních úspor. [14]

Do budoucna se počítá s nasazením vlnově děleného multiplexu, pro dosažení vyšších přenosových rychlostí (přednostně 40 Gbit/s), ovšem s představou zpětné neslučitelnosti s předchozími verzemi PON.

2.3.6. 10G-EPON

Nejnovější standart na poli pasivních optických sítí pochází z konce roku 2009, vydaný IEEE pod označením 802.3av. Pracovní skupinou byl splněn požadavek zajištění kompatibility s předchozí generací EPON. Koexistence bude řešena na bázi odlišného vlnového dělení v sestupném směru, pro vzestupný směr se využije jedné vlnové délky pro přenos a přístupové metody na základě časového dělení TDMA.

Nová generace 10G-EPON přináší následující schéma přenosových rychlostí – symetrická varianta 10,325 Gbit/s v obou směrech, oproti tomu asymetrický mód nabízí 10,325 Gbit/s ve směru od sítě k účastníkovi a 1,25 Gbit/s ve směru od účastníka k síti. Pro oba přenosové módy jsou připraveny tři výkonové třídy.

Vlnové dělení je definováno následujícím způsobem:

- 1260 až 1360 nm – pro vzestupný směr (upstream).
- 1570 až 1600 nm – pro sestupný směr (downstream).

Jak je patrné ve vzestupném směru nedoznala oblast vlnových délek změn, což má dle [9] opodstatnění v nasazení přímo modulovaných optických zdrojů. Proto bude v případě současného provozu EPON a 10G-EPON technologie v síti použito metody časového dělení TDMA, jak již bylo výše zmíněno. Výhledově se uvažuje i vyhrazení pásma 1270–1280 nm pro účely směru vzestupného. Tato problematika sebou přináší určitá omezení pro terminály ONU a OLT v závislosti na způsobu jejich charakteru a implementaci. Bude nezbytné vyčlenit přenosové rychlosti odpovídající patřičným rozhraním na straně OLT a na straně ONT a k nim přidruženým vlnovým délkám.

Popis technologie 10G-EPON vychází z [9] a [13]. Bližší informace se lze dozvědět na stránkách standartu IEEE 802.3av.

Závěrem je nutné zmínit dva odlišné odhady vývoje – cesta GPON nebo EPON (10G-EPON). Probíhá rozsáhlá diskuze jakou cestou se vydat a z jakých důvodů. Velmi záleží na umístění – ať již co se týče jednotlivých poskytovatelů v Evropě či ve světě, dále na tom jak daleko postoupilo nasazování optických vláken v přístupových sítích, strategii a možnostech provozovatelů atd. Popsání této problematiky je dalece nad rámec tohoto textu a není jeho meritem.

Celkovým srovnáním jednotlivých variant pasivních sítí můžeme učinit konkluzi, že přes použití podobných principů a společného výchozího modelu nejsou vzájemně kompatibilní, optické jednotky nejsou schopné vzájemné kooperace vzhledem k odlišnosti použitých protokolů na druhé vrstvě referenčního modelu ISO/OSI.

2.3.7. WDM – PON

U předchozích technologií se převážně využívá techniky vlnového dělení k oddělení odchozího a příchozího směru a uživatelé přistupují k síťovým zdrojům pomocí časového dělení TDMA. Nový přístup umožňující překonání limitů časového přístupu spočívá v umístění většího počtu vlnově oddělených délek na jednom vláknu tzv. WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network). Zvýšením počtu vlnových délek na jednom vlákne přinese zvýšení celkové kapacity vlákna. Obecně bereme v potaz dvě základní metody vlnově děleného multiplexu – CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) a DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). V našem jazyce se pro CWDM ujal název hrubě vlnově dělený multiplex, respektive hustě vlnově dělený multiplex pro DWDM, čímž je naznačen hlavní rozdíl mezi nimi, který spočívá v odstupu jednotlivých instalovaných vlnových délek. Bližší popis obou způsobů ponechme jiným dostupným pramenům [15] a [7] nebo přímo ve standardech ITU-T (G.671, G.694.1 a G.694.2).

Nyní se vrátíme k druhům technologií WDM-PON. Rozlišujeme tři hlavní typy dle [15], které budou popsány níže:

Pevně přidělené vlnové délky

Použití klasického rozbočovače, který přenáší veškeré vlákne nesené vlnové délky směrem ke koncovým jednotkám ONU/ONT. Tyto jednotky jsou pevně nastaveny pomocí WDM filtrů, tak aby propustily pouze jim určené vlnové délky z celého spektra. Ve vzestupném směru mají koncové jednotky fixně nastavenou vlnovou délku, kterou používají k odesílání dat. Nevýhodou toho způsobu je skutečnost, že ke každé koncové jednotce je přenášen úplný datový tok – proto je třeba jednotlivé toky ochránit tak, aby nedošlo k narušení bezpečnosti.

Vydělování vlnových délek

Místo rozbočovače je nasazena směrová odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating), čímž je vyřešena bezpečnostní mezera předchozího přístupu. Odbočnice vydělí jednotlivé vlnové délky z příchozího toku koncovým jednotkám do určených směrů. V sestupném směru dochází k šíření konkrétních nosných na stejné vlnové délce. Ve vzestupném směru opět používá každá koncová jednotka předem přidělené vlnové délky. Výhodou této metody je odstranění WDM filtru v přijímacím řetězci koncové jednotky, což vede, stejně jako lepší vlastnosti AWG odbočnice, ke snížení výsledného útlumu.

Kaskádní zapojení

Jedná se o kombinaci předchozích dvou způsobů, za účelem získání vyšší přesnosti vydělování jednotlivých vlnových délek a především k univerzálnímu síťovému návrhu. Přidáním přeladitelných filtrů v koncových jednotkách ONU/ONT získáme dynamickou progresivní síť umožňující aktivní přidělování vlnových délek jednotlivým jednotkám s ohledem na jejich aktuální využití. Lze tak využít momentálně nepoužité vlnové délky jiných jednotek pro uspokojení současných potřeb a požadavků ze strany sítě. Tento mechanismus se označuje jako DWA (Dynamic Wavelength Assignment).

Více o dané problematice pojednává literatura [15], ze které byly informace o WDM-PON čerpány a kde je možné se dozvědět detailnější informace.

2.4. FTTx – vláknem do určitého bodu sítě

V této kapitole navážeme na rozdělení přístupových sítí z bodu 1.2.3. FTTx představuje rodinu síťových řešení, které jsou typickými představiteli hybridních přístupových sítí. Souhrnně pojem FTTx – Fiber to the X značí pojem vyjadřující nahrazení původní metalické části sítě optickým vláknem. Místo, až po něž je metalické vedení nahrazeno optickým, je značeno obecně písmenem X a je zastoupeno anglickým slovem, které bod zakončení optického vlákna výstižně popisuje. Současná řešení přístupových sítí se jsou z pohledu majoritního poskytovatele nejčastěji řešena uspořádáním Fiber to the Exchange, což odpovídá přivedením vlákna do místní ústředny (RSU) a následné připojení uživatele pomocí technologie xDSL jak je možné se dočíst v [4]. Přístupové sítě FTTx podtrhují moderní trend a tendence, jakými se ubírá vývoj v těchto typech sítí, v souladu s kapitolou 1. „*Optické přístupové sítě pomalu přestávají být výsadou velkých firem – FTTO (Fiber to the Office) a datových center. [...] I když se vývoj budoucích přístupových sítí bude lišit podle daného provozovatele, země atd., je zřejmé, že optické technologie se z dlouhodobého hlediska stanou jejich základem.*“ jak uvádí výňatek z knihy [7]. V podkapitolách tohoto oddílu práce se detailněji zaměříme na jednotlivá řešení FTTx. Informační zdroje k podkapitolám FTTx jsou uvedeny odstavci pod popisem posledního z nich.

2.4.1. Fiber to the Building

Tato technologie přivádí optické vlákno až do budovy účastníků. Samotné připojení jednotlivých účastníků je řešeno v rámci vlastních účastnických rozvodů uvnitř budovy (vnitřní síť). Vnitřní síť může být řešena metalicky či bezdrátově, v závislosti na rozměrech a uspořádání budovy. Pro umístění zázemí převodu z optické na další navazující technologii bývá většinou využito vyhrazené technické místnosti, do které má přístup pouze pověřený personál. Pokud je budova staršího data a nebylo při její výstavbě s technickou místností počínáno, tak se zázemí nejčastěji umísťuje ve sklepních prostorách (suterénu budovy). Tento způsob řešení optických přípojek se používá u větších budov a bytových komplexů (panelové domy, činžovní domy, výškové budovy). Hovoříme-li o nejběžnějším způsobu realizace, pak je myšleno zakončení ONU/ONT a přechod na technologii 1 Gbit/s Ethernet, k němuž je připojen centrální prvek (směrovač, přepínač). K němu jsou skrze datovou síť (lokální síť v budově) připojeni strukturovanou kabeláží standardním nestíněným kabelem typu UTP jednotliví zákazníci. Jednoznačnou výhodou FTTB přípojek je využití stávajících metalických rozvodů v budově a tím i minimalizace zásahu do osobních práv a soukromí uživatelů.

2.4.2. Fiber to the Cabinet

FTTCab vyjadřuje obdobný koncept jako je FTTC, s tím rozdílem, že jsou optická zakončení umístěná v kabinetu nacházejícím se ve volném terénu. Toto označení se používá především pro umístění jednotek ONU na otevřených prostranstvích s méně hustou zástavbou. Zmiňujeme-li se o FTTC či FTTCab, poté se umístění kabinetu nachází do 300 metrů od připojovaných objektů a na rozdíl od FTTB se pro připojení koncových uživatelů realizuje

prostřednictvím digitálních přípojek xDSL. Ve společném rozvaděči se společně s jednotkou ONU nalézá DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) – digitální multiplexor.

2.4.3. Fiber to the Curb

FTTC představuje situaci, kdy jsou vlákna přivedena k účastnickému rozvaděči, připojení koncových bodů je k němu řešeno pomocí metalických kabelů. Curb, neboli odpovídající překlad z anglického slova – okraj chodníku, názorně označuje, kde bývá optické vlákno zakončeno. Čili na okraji chodníku ve venkovním kabinetu v blízkosti skupiny domů, do nichž z tohoto místa pokračují metalické rozvody. Venkovní umístění kabinetu klade nároky na jeho odolnost vůči vnějším klimatickým vlivům a činnosti člověka (míněn je především vandalismus, zabezpečení proti nevyžádanému vniku a zcizení součástí třetí osobou). Stejně jako FTTCab využívá digitálního multiplexoru a stávajících metalických rozvodů vedoucích ze zařízení DSLAM k jednotlivým zákazníkům.

2.4.4. Fiber to the Node

FTTN je svou definicí dle velmi podobná FTTEEx. Síť typu FTTN je kombinací optiky a metalického vedení (uvádí se příklad VDSL/ADSL2+). Distribuční uzel, digitální multiplexor DSLAM je vzdálen od zákazníků více než 300 m, je odlišujícím rysem oproti FTTEEx a FTTC. V článku [10] je zkratka o tom, že FTTN znamená přivedení optického vlákna k datovému uzlu, čímž je zřejmě myšlen zmíněný digitální multiplexor.

2.4.5. Fiber to the Exchange

Organizaci přístupových bodů, kterou využívá například společnost Telefónica O2, Czech Republic, a.s., je vlákno přivedené do „výměnného bodu“ sítě. V našich podmínkách zastoupeným místní ústřednou a z tohoto bodu je k jednotlivým zákazníkům přiveden pár metalických vodičů. Dle [16] se nejedná o optickou přístupovou síť v pravém smyslu slova – jelikož pro připojení účastníka využívá pouze metalického vedení a optická vlákna jsou použita až od místní ústředny.⁴ Obecným charakterem tohoto technického konceptu je klesající šířka pásma účastníka vzhledem k jeho vzdálenosti k ústředně (odpovídaje fyzikálním vlastnostem média). U této technologie je tento pokles nejznatelnější.

2.4.6. Fiber to the Premises

Pomocí této zkratky bývají úhrnně označovány na tento bod navazující přístupy FTTH a FTTO, jež jsou charakterizovány v dalších dvou bodech.

2.4.7. Fiber to the Office

Jak již bylo v úvodním textu kapitoly zmíněno, FTTO ztvárňuje realizaci připojení korporátních zákazníků poskytovatele s vysokými nároky na přenosovou kapacitu sítě. Jedná se především o připojení velkých datových center, objektů průmyslových a obchodních zón, kance-

⁴ Rozporováno je využití optického vlákna v přístupové části sítě, protože prvním bodem na straně poskytovatele je místní ústředna, do níž je uživatel připojen páry metalických vodičů. Optických vláken je využíváno pro připojení ústředny k síti poskytovatel (k transportní síti).

lářských budov apod. Mimo tuto situaci se tento typ připojení aplikuje při zřízení konektivity pro úřady, školy a nemocnice či jiná obdobné instituce. Umístění a zabezpečení přípojného místa je většinou plně v režii vlastníka či provozovatele (nájemce) objektu. Režim přenosu závisí, na konkrétních požadavcích zákazníka, přesto je nejčastější realizací symetrický přenosový mód pro oba směry. Vezmeme-li v úvahu výčet a typ subjektů v něm zveřejněných je nasnadě, že budou na tento typ sítě kladeny vyšší nároky na spolehlivost, případně zálohu sítě (alternativní trasy) pro zajištění ochrany proti výpadkům aj.

2.4.8. Fiber to the Home

Je posledním standardem v našem výběru a značí přivedení vlákna až do domu koncového účastníka, tj. zákazníka služeb. Vlákno v tomto případě bývá terminováno v účastnické zásuvce (konverze na skupinu portů pro telefonii, televizní a datové služby), dále může navazovat vlastní kabeláž objektu zákazníka ať již v podobě bezdrátových spojů či pomoci metalických kabelů s patřičnými prvky společně vytvářejícími lokální síť uživatele. Z přenosového hlediska nabízí společně s FTTO nejvyšší přenosové rychlosti, protože se jedná o čistě optickou variantu. Toto řešení je vhodné pro rezidentní lokality (satelitní městečka apod.), stejně jako u služeb ADSL se nejčastěji zákazníkům nabízí v asymetrickém režimu s vyšší přenosovou rychlostí ve směru od poskytovatele (sestupný směr, downstream).

Toliko výčet nejpoužívanější typů technologie FTTx. Informačními zdroji k těmto podkapitolám byly publikace a články [7], [10], [17], [16]. Porovnáním souhrnů v jednotlivých zdrojích lze s ohledem na uváděné informace v síti internet dojít k závěru, že popis jednotlivých provedení optických zakončení a přechod na jiný druh přenosového média nemusí být jednoznačný a jejich výklad s popisem se mezi autory liší. Nejpatrnější je tato nejednoznačnost u odlišení FTTE_x, FTTC_{ab}, FTTC a FTTN, ve kterých se autoři značně rozcházejí v charakteristice uvedených přístupů.

2.4.9. Porovnání přípojek FTTx

Na závěr této podkapitoly 2.3.7 vyřkneme několik nejvýraznějších rozdílů, které od sebe navzájem odlišují popisované přístupy FTTx. Nejvíce markantní změnou mezi jednotlivými technologiemi je vzdálenost, ve které končí optické vlákno a začíná přenos informace s pomocí jiného média. Na tuto vzdálenost se při charakteristice systému musíme dívat z obou směrů, tj. jak ze strany uživatele, tak ze strany poskytovatele připojení. Čím více se přibližujeme straně poskytovatele, tím větší je pravděpodobnost, že se budeme nacházet v prostoru (zázemí), které je spravováno samotným poskytovatelem a běžnému zákazníkovi k němu není umožněn fyzický přístup. Opačným směrem se dostáváme na druhý pól, který je vytvářen samotným zákazníkem, ať již jeho osobou v případě FTTH, vlastníkem objektu hovoříme-li o FTTB a nejvíce osob vstupuje do možného zásahu do povolení a provozování v případě umístění ve veřejně přístupných prostorách FTTC, FTTC_{ab}. Autor sám má vlastní negativní zkušenost s poškozováním a opakovanou snahou o vyřazení z provozu těchto zařízení, nacházejících se v prostorách umožňujících negativní zásahy třetích osob. Předcházejícími větami je myšleno především zdůraznění faktu, že v případě, kdy se zařízení nachází v lokalitách veřejně přístupných nebo dosažitelných skupině osob, je nezbytné, aby se, na rozdíl od zázemí vlastněným (najímaným a dostupným) pouze provozovateli, zabýval řešením bezpečnosti

a ochrany přenosových technologií další subjekt. Zajištění tohoto požadavku je snazší v případě zvlášť vyčleněných prostor na straně zákazníka, s omezeným přístupem neoprávněných osob, které by mohly se zařízením manipulovat. Záměrně tento jev popisujeme natolik důkladně, protože realizace zabezpečení sebou přináší další finanční prostředky přidružené k výstavbě těchto sítí a dle vlastních zkušeností přináší mnoho dodatečných komplikací, o čemž z části pojednává podkapitola 4.1.4.

Nebudeme-li řešit pouze ochranu zařízení, mějme na paměti další okolnosti spojené s výstavbou těchto sítí, která je odlišná pro každý jednotlivý typ sítě. V závislosti na umístění převodu z optické na metalickou kabeláž se podstatným způsobem mění finanční náklady na vybudování sítě, právní náležitosti subjektů vstupujících do schvalovacího řízení projektu, jeho připomínkování atd. Podrobněji se tohoto tématu dotkneme v kapitole 4. Zůstaneme-li pouze u nákladů vynaložených na vybudování jednotlivých sítí je na první pohled zřejmé, že čím více ze současné zavedené infrastruktury využijeme, tím nižší výsledné náklady budeme muset při výstavbě vynaložit. Kvůli této skutečnosti je evidentní, že nejdražší z popisovaných řešení budou varianty FTTH a FTTO, tj. čistě optické přípojky, u kterých je nejnákladnější pokládka a cena optických vláken viz podkapitola 4.1. Oproti tomu z pohledu poskytovatele je nejjednodušší a nejvýhodnější využít přípojek FTTE_x, kdy využije téměř veškerou instalovanou kabelovou infrastrukturu, s omezením v podobě výše přenosových rychlostí. Na závěr proto konstatujeme, že výběr konkrétního typu přípojek je z velké části ovlivněn cenou instalace a finančním plánem projektu.

2.5. Aktivní optické sítě

Aktivní přístupové sítě jsou základem hybridních sítí viz 1.2.3. Optická část hybridní sítě je vystavěna nejčastěji na technologii SONET/SDH nebo ATM a Ethernet, konkrétněji EFM – Ethernet v první míli. Tyto sítě využívají aktivních optických síťových prvků k propojení ONU k terminálům linkového zakončení OLT. V případě hybridních sítí se využívá například kruhových sítí synchronní digitální hierarchie, které propojují přístupové body (např. ústředny RSU), kde dochází ke změně využívaného média, nejčastěji na metalická vedení s technologiemi xDSL. V tomto bodě zároveň koncentruje ústředna provoz a sdružuje/rozděluje účastnické signály do objemnějšího datového toku, který umožňuje vysokokapacitní technologie SDH přenést.

Výhodou realizace aktivní sítě je možnost správy těchto zařízení a jejich řízení. Dalším pozitivním faktorem podporujícím AON je zajištění větších překlenutelných vzdáleností než v případě PON a nabídka větších dělicích poměrů v bodech, kde dochází k distribuci toku do více směrů. Nevýhodou naopak bývá vyšší pořizovací cena a vyšší náklady na vybudování zázemí aktivní sítě.

Díky své technologii a topologickému uspořádání se tyto sítě zpravidla řadí mezi architektury P2P (Point-to-Point). Na fyzické vrstvě jsou realizovány spoji bod-bod do topologií, které umožňují zálohování či alternativní trasy pro případy výpadku či úprav prvků sítě, které by podstatným způsobem ovlivňovaly její chod.

Pro naše potřeby je tento výklad dostatečný k získání přehledu o popisovaném druhu optických přístupových sítí. Další informace je možné se dočíst v literaturách [4], [7] a [8] z nichž bylo čerpáno. Pro získání hlubších znalostí daného tématu odkazujeme na publikace přímo týkající se jednotlivých druhů aktivních optických sítí.

3. Analýza naměřených dat optické trasy

3.1. Původ dat

V práci se pro další potřeby – pronájem optické trasy budeme zabývat analýzou naměřených dat optických vláken Brněnské akademické počítačové sítě. Naměřená data, hodnoty a údaje pocházejí z měření Brněnské akademické počítačové sítě – BAPS.

Brněnská akademická počítačová síť je privátní optickou počítačovou sítí a zároveň společným projektem Masarykovy univerzity v Brně a Vysokého učení technického v Brně.

„BAPS – Brněnská akademická počítačová síť propojuje univerzity, pracoviště akademie věd, soudy, finanční úřady, instituce vlády, nemocnice a další zařízení splňující možnost připojení k síti. Budování BAPS se dělí na několik etap. Vytváření BAPS přechází do další etapy větší nou po zpřístupnění další alternativy pro zvýšení výkonnosti a rozsáhlosti sítě, či přísunu nových financí a příspěvků.“, citováno z [18].

Při měření bylo vždy náhodně zvoleno několik vláken ze svazku (48 nebo 96) vláken typu G.652, jednovlákenných vláken 9/125 μm osazených většinou konektory SC/PC, rovněž jako je tomu v našem případě šesti vybraných vláken.

V průběhu měření optických přenosových parametrů BAPS bylo použito několik metod. Budeme se věnovat převážně měřením útlumu a odrazivosti, podpořených vyšetřeními videomikroskopem. Dále se zaměříme na rozbor naměřených dat chromatické a polarizační vidové disperze. Blíže jsou tyto měřicí metody rozebrány v publikaci [19] nebo v článku [20]. Pro úplnost uvedme, že všechna měření jsou přílohou na přiloženém CD, kde si je lze detailněji prohlédnout, včetně parametrů přístrojů a podrobných informací k jednotlivým měřením (nastavení, krok, nejistoty atp.), které zde z tohoto důvodu nejsou nijak zmiňovány. S tím je spojeno i uvádění pouze výňatků či příkladů jednotlivých měření, které jsou svým charakterem názorné pro demonstrování důležitých parametrů optických vláken a jejich naplnění. Nyní se již zaměříme na vyhodnocení jednotlivých měření.

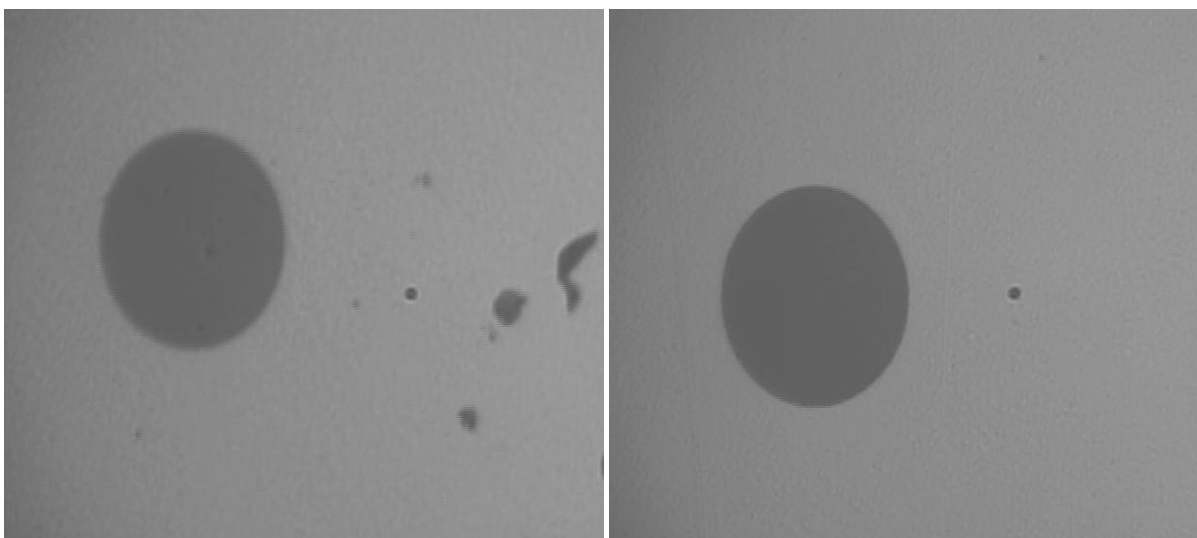
3.2. Videomikroskop

Při vyhodnocování útlumu konektorovaných konců optických vláken bylo použito měřicího zařízení EXFO FIP-400. Zařízení slouží k zjištění stavu konektorované plochy a konektoru jako celku. Optickou metodou ve vysokém rozlišení dokáže odhalit usazený prach, nečistoty a mechanické poškození na stykové ploše konektoru. Tímto způsobem odhalíme příčinu zvýšeného útlumu na konektorech či v optickém rozvaděči. V kombinaci s příručním displejem a patřičným softwarovým vybavením (ConnectorMax od firmy EXFO) je možné čistotu i stav zkoumaného prvku automaticky vyhodnotit dle kritérií vyplývajících z norem IEC/IPC pro odpovídající typ konektoru.

Na obr. 3.1 je k vidění příkladová dvojice zaneseného a čistého konektoru z měření optickým videomikroskopem. Vlevo je ukázka znečištěného konektoru, kterých bylo z devíti poskytnutých vzorků obdobným způsobem viditelně zaneseno či jinak znečištěno rovných sedm. O zbylých dvou (jeden z nich se na obr. 3.1 nalézá vpravo, druhý je uložen na CD pod číslem 23 ve složce *Videomikroskop*) se můžeme domnívat, že by testu vyhověly. Nicméně vzhledem

k potřebě prozkoumání ve vysokém rozlišení přímo při měření, není možné přesně rozhodnout, zda by byly podle norem vyhodnoceny jako vyhovující či nikoliv. Formulovat tento závěr je možné pouze přímo při měření, anebo dodatečně ze souborů vygenerovaných měřícím přístrojem s pomocí výše zmíněného k tomu účelu dedikovanému softwaru. Na výsledných hodnotách útlumu, viz [21] bod 2.1, se přesvědčujeme o významném vlivu na výslednou hodnotu útlumu před a po provedeném čištění optického vlákna.

Na čistotu a kvalitu konektorovaného spoje má vliv několik faktorů. Rozhodující je typ konektoru, zda je opatřen krytkou ochraňující proti vniku prachu a mechanickému poškození či nikoliv. Dalším důležitým faktorem je práce servisních techniků, její četnost, přístup a preciznost prováděných úkonů tak, aby nedošlo k nevyžádanému mechanickému poškození prvků sítě.



Obr. 3.1: Znečištěný konektor (vlevo) a čistý konektor (vpravo).

Obecně lze z poskytnutých vyobrazení videoskopu konstatovat, že se čela konektorů nacházela ve stavu vyžadujícím provedení jejich vyčištění specializovaným náčiním, jakožto prvním krokem ke zlepšení přenosových parametrů jednotlivých optických vláken na trase. Jak již bylo zmíněno – pro detailní analýzu by bylo třeba softwaru, který bychom využili přímo při měření či následně z naměřených dat, bohužel nedisponujeme těmito možnostmi (data nejsou uložena v potřebném formátu), a proto se pouze omezíme na předchozí závěr společně s následujícími ukázkami (obr. 3.2) z přesného vyhodnocení softwarem ConnectorMax od firmy EXFO dle norem IEC/IPC.

Na obr. 3.2 je vlevo ukázka pohledu na čelo konektoru, který nevyhovuje požadavkům norem, oproti tomu je pohled na vyhovující konektor, který rovněž obsahuje nedokonalosti (zvýrazněné zelenou barvou), jež ovšem nejsou kritické a nepřekračují stanovené limitní parametry. Obrázky jsou získány z trial verze programu ConnectorMax dostupné na www.exfo.com. Jedná se o ukázkové vyhodnocení demonstračních souborů přiložených jako vzorové ukázky k nainstalovanému programu.



Obr. 3.2: Příklad softwarem ConnectorMax.

Poznámka k obr. 3.2 – na obrázcích jsou zobrazena jednovláková vlákna s naznačeným oddělením jádra, pláště a primární ochrany vlákna.

3.3. Transmisní metoda

Naměřené hodnoty referenční transmisní metodou pomocí soupravy OLTS (Optical Loss Test Set) ze dne 3.6. 2010 přístrojem EXFO FOT-932 ukazuje tab. 3.1. Před měřením nebyly známy žádné další informace, mimo typu vlákna a použitých konektorů. Tímto se dostáváme do střetu s první nevýhodou měřicí metody, která dokáže zjistit celkový útlum optického vlákna. Pro zobrazení průběhu je třeba použít metody OTDR, k níž se dostaneme později.

Přímá metoda využívá měření úrovně přenášeného signálu. Referenční metodou pro měření optických tras a součástí, z nichž se trasa skládá, je transmisní metoda viz [19] a [20]. Vyhodnocení se ustanovuje dle limitních hodnot vydaných v doporučeních ITU pro jednotlivé typy instalací. Hodnoty optického útlumu odrazu lze nalézt u jednotlivých typů zařízení pro konkrétní přenosovou technologii na stránkách výrobců.

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty přímou metodou pomocí OLTS.

ID vlákna	λ [nm]	$IL_{A \rightarrow B}$ [dB]	Ref. A \rightarrow B	$IL_{B \rightarrow A}$ [dB]	Ref B \rightarrow A	Průměr [dB]	ORL A [dB]	ORL B [dB]	Délka [km]
BOT_ZLKOP_05	1310	2,33	0,32	2,36	0,19	2,35	20,99	14,88	4,567
	1550	1,66	0,24	1,65	-0,02	1,66	21,26	16,66	
	1625	1,73	0,19	1,76	-0,02	1,75	21,84	17,10	
BOT_ZLKOP_06	1310	1,76	0,32	1,75	0,19	1,75	34,86	34,86	4,568
	1550	1,15	0,24	1,18	0,00	1,17	36,74	36,84	
	1625	1,32	0,19	1,32	-0,02	1,32	37,67	37,68	

BOT_ZLKOP_17	1310	2,49	0,32	2,55	0,19	2,52	35,58	35,16	4,569
	1550	1,77	0,24	1,78	0,00	1,77	37,22	36,99	
	1625	1,93	0,19	1,95	-0,02	1,94	37,97	37,88	
BOT_ZLKOP_018	1310	2,33	0,32	2,36	0,19	2,35	35,26	35,44	4,569
	1550	1,68	0,24	1,67	0,00	1,68	36,99	37,29	
	1625	1,88	0,19	1,92	-0,02	1,90	37,76	38,27	
BOT_ZLKOP_25	1310	1,72	0,32	1,79	0,19	1,75	35,00	34,63	4,571
	1550	1,17	0,24	1,20	0,00	1,19	36,76	36,56	
	1625	1,37	0,19	1,30	-0,02	1,34	37,65	37,40	
BOT_ZLKOP_026	1310	1,74	0,32	1,76	0,19	1,75	34,93	34,62	4,571
	1550	1,10	0,24	1,20	0,00	1,15	36,71	36,57	
	1625	1,31	0,19	1,26	-0,02	1,29	37,63	37,39	

Poznámka k tab. 3.1 – referenční hodnoty v tabulce mají hodnoty v dB, IL je vložný útlum, ORL je útlum odrazu (viz seznam použitých zkratk a symbolů na konci práce).

Z tab. 3.1 je podstatné zdůraznit vlnové délky, které jsou významné z přenosového hlediska po optickém vlákně tj. 1310 nm, 1550 nm a 1625 nm. Porovnáním hodnot útlumu na těchto vlnových délkách můžeme nalézt příčinu zvýšených úrovní útlumu, kdy se nečistoty a poškození konektoru projevuje na vlnové délce 1310 nm. Vzrůstající velikost útlumu na vlnových délkách 1550 a 1625 nm značí negativní ohyby vlákna [19].

3.3.1. Detailnější analýza naměřených dat

Jak již bylo zmíněno v odstavci 3.3, z charakteristiky trasy je nám známý pouze typ vlákna a použité konektory. O optických spojkách, svárech není známo nic bližšího a bez použití reflektometrické metody se konkrétnější údaje nedozvíme. Tento fakt zásadně ovlivňuje a částečně zkresluje naši výpočetní kalkulaci. Přesto pro získání základního odhadu bude postačující, použijeme-li těchto vstupních proměnných [21]:

- vložný útlum konektoru SC/PC $\alpha_{kon} = 0,4$ dB,
- koeficient útlumu vlákna $\alpha(\lambda_{1310}) = 0,32$ dB/km,
- koeficient útlumu vlákna $\alpha(\lambda_{1550}) = 0,19$ dB/km,
- koeficient útlumu vlákna $\alpha(\lambda_{1625}) = 0,24$ dB/km.

Tab. 3.2: Vypočítané referenční hodnoty jednotlivých vláken dle vstupních dat.

ID vlákna	λ [nm]	IL [dB]	Délka [km]
Sumarizace	1310	2,261	4,569
	1550	1,668	
	1625	1,896	

Poznámka k tab. 3.2 – vypočítané hodnoty jsou vztaženy k sumarizaci, čímž rozumíme zprůměrování délky měřených vláken. Činíme to z praktických důvodů – délka vláken se liší v řádu jednotek tisícín. Výsledné odhadované celkové útlumy se od sebe nebudou výrazně lišit. Vzhledem k tomu, že budeme hodnoty porovnávat na dvě desetinná místa, je zbytečné uvádět vypočtené hodnoty pro více než jedno vlákno se zprůměrovanou délkou 4,569 jak udává tabulka.

Cesta k vypočteným hodnotám vede úvahou základní představy vlákna určité délky se dvěma konektory na jeho koncích. Jelikož neznáme počet ani typ optických svárů či spojů v průběhu vlákna, nebudeme je při výpočtu zahrnovat. Spočítané hodnoty lze proto snadno získat dle následující rovnice (z teoretických předpokladů pro návrh trasy uvedených v [8], zjednodušeně – celkový útlum trasy A_{celk} se rovná součtu útlumu jednotlivých prvků, ze kterých je složena):

$$A_{\text{celk}} = 2 \cdot \alpha_{\text{kon}} + l_x \cdot \alpha_n(\lambda), \quad (3.1)$$

kde α_{kon} je vložný útlum konektoru, l_x značí délku trasy (dle tabulky) a $\alpha_n(\lambda)$ je koeficient útlumu vlákna.

Hodnotu koeficientu útlumu vlákna pro jednotlivé délky získáme studiem literatury [7], [8] nebo [19]. Souhrnně jsou vypsány na předchozí stránce před tab. 3.2. Dosazením do rovnice (3.1) a výpočtem pro jednotlivé řádky tab. 3.2 stanovíme limitní hodnoty.

3.3.2. Zhodnocení naměřených dat

Prostým porovnáním naměřených hodnot z tab. 3.1 a výpočtem určených, limitních v tab. 3.1 zjistíme, zda se nejsou tyto hodnoty překročeny a pokud ano můžeme z toho vyvodit několik závěrů. Jedním z nich, je (při výrazném překročení limitní hodnoty), porucha na trase mechanického charakteru (na konektoru, spojce, sváru či jiném prvku). Při nižším překročení limitu balancujeme mezi dvěma neodlišitelnými možnostmi – nečistoty konektoru nebo přítomnosti spojek potažmo svárů, o kterých jsme nevěděli, potenciálně obě možnosti zároveň. S odhalením přesné příčiny nám bude nápomocen reflektometr. Orientačních hodnot, jichž by neměly úrovně vložného útlumu jednotlivých prvků přesáhnout, udává tab. 3.3 podle článku [21].

Tab. 3.3: Tabulka limitních hodnot vložného útlumu prvků.

Prvek	Vložný útlum – IL
Konektor	0,50 dB
Spojka	0,10 dB
Svár	0,05 dB

Dalším krokem je analýza vycházející z článku [21] podle nějž není přípustné, aby minimální hodnota útlumu odrazu konektoru klesla pod 22 dB.

Opětovným pohledem do tab. 3.1 ve sloupci ORL porovnáváním s výše zmíněnou velikostí zjistíme, že tomuto kritériu nevyhovuje vlákno s ID 5, jak ukazuje následující výňatek z uvedené tabulky (nevyhovující část je barevně zvýrazněna).

Tab. 3.4: Výňatek a zdůraznění nevyhovujícího vlákna z tab. 3.1.

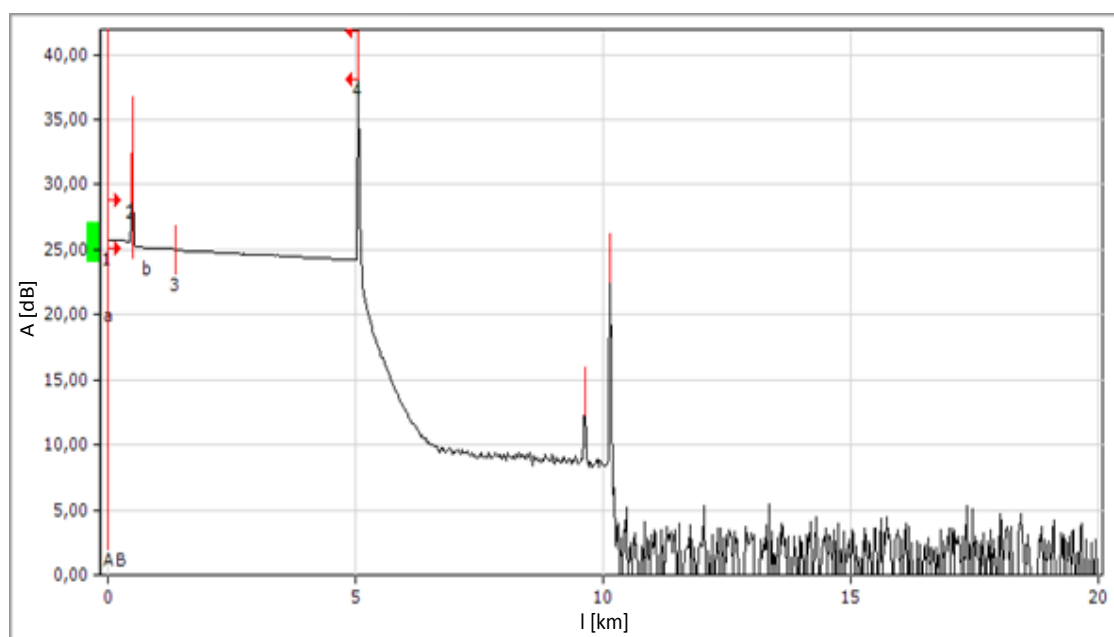
ID vlákna	λ [nm]	$\Pi_{A \rightarrow B}$ [dB]	Ref. A \rightarrow B	$\Pi_{B \rightarrow A}$ [dB]	Ref. B \rightarrow A	Průměr [dB]	ORL A [dB]	ORL B [dB]	Délka [km]
BOT_ZLKOP_05	1310	2,33	0,32	2,36	0,19	2,35	20,99	14,88	4,567
	1550	1,66	0,24	1,65	-0,02	1,66	21,26	16,66	
	1625	1,73	0,19	1,76	-0,02	1,75	21,84	17,10	

Minimální hodnota útlumu odrazu není splněna, příčinou mohou být mimo jiné nečistoty na konektoru či jeho mechanické poškození. Prozkoumáním pomocí videomikroskopu můžeme zjistit více.

Celkově vyhodnocením pomocí přímé metody vyjma vlákna č. 5 ostatní vlákna prošla a neshledali jsme na nich žádné vady v podobě zvýšeného útlumu či vysoké odrazivosti. Mírně zvýšené hodnoty vložného útlumu oproti vypočtenému teoretickému limitu mají vlákna s ID 5, 17 a 18. Vezmeme-li v úvahu, že neznáme fyzický průběh trasy (počet svárů a spojek), nelze jednoznačně při této odchylce rozhodnout, zda jde o nevyhovující přenosové parametry konektorů, nebo výskyt dalších prvků na trase, o jejichž přítomnosti nemáme informace. Pro tento účel je vhodné trasu vyhodnotit s pomocí reflektometrické metody OTDR, jež nám poskytne konkrétnější informace o událostech na trase a jejím průběhu.

3.4. Optický reflektometr

Při měření ze dne 3. 6. 2010 byl použit přístroj OTDR EXFO FTB-200 s přídatným modulem FTB-7400E. Při měření vláken na vlnových délkách 1310/1383/1550/1625 nm bylo použito předřadného vlákna délky 0,5 km s délkou impulsu 100 ns a časem průměrování 15 s. O metodě OTDR je možné se podrobněji dočíst v [19]. Její výhodou je možnost měření nejenom prvků na trase, ale i celkového průběhu optické trasy. Díky tomu máme nástroj pro přesnou lokalizaci závady, na rozdíl od předchozí transmisní metody.



Obr. 3.3: Náměr OTDR na 1310 nm vlákna s ID 05.

Na předchozím obr. 3.3 je možné vidět nevyhovující konektor vlákna s ID 5 (*událost 4*). Pomocí OTDR byl naměřen útlum odrazu na tomto konektoru 13,9 dB (na vlnové délce 1550 nm), což výrazně překračuje limitní hodnotu zmíněnou v předchozím textu a dokládá tak nevyhovující hodnoty z tab. 3.4. Útlum odrazu (z něj určený vložný útlum konektoru) na *události 2* je nepoměrně nižší, přesto je překračující mezní hodnoty uvedené v tab. 3.3. V souladu s výstupem z OTDR je nezbytné provést vyčištění čel obou konektorů a provést další měření na vlákne č. 5.

3.5. Chromatická disperze CD

3.5.1. Měření chromatické disperze vysílač → přijímač

Při tomto měření bylo nasazeno dvou přístrojů společnosti EXFO, konkrétně EXFO FTB-400 s modulem FTB-5800 a jako zdroj záření bylo nasazeno zařízení FLS-5834A. Jako referenční metoda pro měření chromatické disperze je doporučena metoda fázového posuvu, která byla pro experimentální ověření použita [21]. Naměřené hodnoty odečtené z grafů pro hodnotu 1550 nm se nacházejí v tab. 3.5 níže.

Tab. 3.5: Naměřené hodnoty chromatické disperze vysílač → přijímač.

ID vlákna	λ [nm]	$D(\lambda)$ [ps/nm·km]	$D(\lambda)_{KOE}$ [ps/nm·km]	Délka [km]	Vyhovuje
BOT_ZLKOP_05	1550	16,402	18,000	4,567	ANO
BOT_ZLKOP_06		16,450		4,568	ANO
BOT_ZLKOP_17		16,609		4,569	ANO
BOT_ZLKOP_018		16,622		4,569	ANO
BOT_ZLKOP_25		16,385		4,571	ANO
BOT_ZLKOP_026		16,371		4,571	ANO

Poznámka k tab. 3.5 – $D(\lambda)$ je koeficient chromatické disperze závislý na vlnové délce. $D(\lambda)_{KOE}$ je referenční hodnota disperzního koeficientu dle [21].

3.5.2. Zhodnocení chromatické disperze vysílač → přijímač

Porovnáním hodnot chromatické disperze získaných z měření s koeficientem udávaným v literatuře viz [21] zjistíme, že veškerá zkoumaná vlákna splňují požadavky na ně kladené. Disperzní koeficienty nepřekračují velikost referenčního limitu, a proto lze z tohoto pohledu vlákna vyhodnotit jako vyhovující. Při zjištěných hodnotách koeficientu chromatické disperze a celkové hodnoty disperze pro vlákno lze s odkazem na [21] prohlásit, že vlákna jsou z hlediska chromatické disperze nasaditelná pro přenosové systémy s provozem o rychlosti 10 Gbit/s.

3.5.3. Měření chromatické disperze jednosměrně

Při měření bylo 3. 6. 2010 využíváno přístroje EXFO FTB-200 s modulem FTB 5700, jenž umožňuje reflektometrickou metodou zjišťovat CD/PDM. Jednosměrnou metodou jsme zjisti-

li celkovou hodnotu disperze, kterou lze podělením s délkou převést na koeficient chromatické disperze.

Tab. 3.6: Naměřené hodnoty jednosměrného měření chromatické disperze.

ID vlákna	λ [nm]	$D(\lambda)$ [ps/nm]	$D(\lambda)_{REF}$ [ps/nm]	Délka [km]	Vyhovuje
BOT_ZLKOP_05	1550	78,87	1100	4,573	ANO
BOT_ZLKOP_06		76,29		4,571	ANO
BOT_ZLKOP_17		77,06		4,573	ANO
BOT_ZLKOP_018		76,22		4,575	ANO
BOT_ZLKOP_25		76,97		4,576	ANO
BOT_ZLKOP_026		76,57		4,576	ANO

Poznámka k tab. 3.6 – $D(\lambda)$ je celková chromatická disperze vlákna závislá na vlnové délce. Dle [22] je limitní hodnotou disperze $D(\lambda)_{REF}$ 1100 ps/nm, plánujeme-li na ní provoz 10 Gbit/s.

3.5.4. Zhodnocení jednosměrného měření chromatické disperze

Pohledem a porovnáním referenční hodnoty s naměřenými hodnotami celkové disperze optických vláken dojdeme k závěru, že jsou všechny hodnoty chromatické disperze v mezích, které jsou povolené pro provozování systémů s rychlostí 10 Gbit/s dle [22]. Zároveň je evidentní značná rezerva pro nasazení systémů s vyšší přenosovou rychlostí.

3.6. Polarizační vidová disperze

3.6.1. Měření polarizační vidové disperze vysílač → přijímač

Měření bylo prováděno přístrojem EXFO FTB-400 s modulem FTB 5500B. Vlivy polarizační vidové disperze nelze na rozdíl od vlivů chromatické disperze nijak kompenzovat. Jsou způsobeny mikroohyby, deformacemi, pnutím a především výrobními postupy optických vláken více v knižní publikaci [7]. Tento náhodný parametr je nutné měřit, z důvodu jeho výrazného vlivu při vyšších přenosových rychlostech. Prostřednictvím měření můžeme zjistit nevyhovující úseky a případně je vyměnit (je-li to možné).

Tab. 3.7: Naměřené hodnoty polarizační vidové disperze vysílač → přijímač.

ID vlákna	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	PMD_{REF} ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Délka [km]	Vyhovuje
BOT_ZLKOP_05	0,049	0,500	4,567	ANO
BOT_ZLKOP_018	0,045		4,569	ANO
BOT_ZLKOP_026	0,132		4,571	ANO

Poznámka k tab. 3.7 – PMD označuje hodnotu koeficientu polarizační vidové disperze, limit $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ (PMD_{REF}) platí pro přenosové rychlosti 10 Gbit/s. [22].

3.6.2. Zhodnocení polarizační vidové disperze vysílač → přijímač

Srovnáním limitní hodnoty PMD [22] s naměřenými hodnotami uvedenými v tab. 3.7 lze učinit následující závěr:

Všechna testovaná vlákna vyhovují parametrům polarizační vidové disperze pro rychlost 10 Gbit/s. Dle rezervy, která je nejnižší u vlákna s ID 26, se opíráme o tvrzení, že jsou jejich vlastnosti dostatečné i pro budoucí navýšení přenosové rychlosti na více než 10 Gbit/s. Přesnou rychlost bude poté třeba vyhodnotit na základě odpovídající hodnoty koeficientu PMD pro vyšší rychlosti přenosového systému.

3.6.3. Měření polarizační vidové disperze jednosměrně

Měření probíhalo stejným způsobem jako v bodě 3.5.3, kde je rovněž popsáno. Přejděme proto rovnou k vyhodnocení naměřených dat v tabulce.

Tab. 3.8: Naměřené hodnoty jednosměrného měření polarizační vidové disperze.

ID vlákna	PMD $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	PMD_{REF} $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	Délka [km]	Vyhovuje
BOT_ZLKOP_05	0,0285	0,500	4,567	ANO
BOT_ZLKOP_06	0,0497		4,568	ANO
BOT_ZLKOP_17	0,0391		4,573	ANO
BOT_ZLKOP_018	0,0231		4,575	ANO
BOT_ZLKOP_25	0,0379		4,576	ANO
BOT_ZLKOP_026	0,2265		4,576	ANO

Poznámka k tab. 3.8 – PMD označuje hodnotu koeficientu polarizační vidové disperze, limit $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ (PMD_{REF}) platí pro přenosové rychlosti 10 Gbit/s. [22].

3.6.4. Zhodnocení jednosměrného měření polarizační vidové disperze

Všechna vlákna vyhovují disperzním požadavkům rychlosti 10 Gbit/s, prvních pět vláken poskytuje dostatečnou rezervu i pro budoucí nasazení vyšších rychlostí (pro 40 Gbit/s se uvádí hodnota $0,2 \text{ ps}/\text{km}$ [22]). Při pohledu na naměřené hodnoty můžeme konstatovat, že z přenosových parametrů je nejméně perspektivní vlákno s ID 26, které má nejhorší parametry.

3.7. Komplexní závěr z analýzy naměřených dat

Analýzou s využitím naměřených hodnot transmisní metodou a reflektometrickou metodou bylo zjištěno, že útlumové parametry konektorových prvků sítě nejsou ideální. Blíží se limitním 0,4 dB, proto je navrženo důkladné vyčištění všech konektorů a prozkoumání pomocí videomikroskopu zda nejsou poškozeny takovým způsobem, který by vyžadoval jejich výměnu. U třech vláken (5, 17 a 18) byly zjištěny větší hodnoty vložného útlumu oproti teoretickému předpokladu. Je vhodné důkladně analyzovat naměřené hodnoty OTDR a detekovat případnou přítomnost dalších prvků v trase.

Pro provozování přenosového systému s rychlostí nejvýše 10 Gbit/s jsou všechna zkoumaná vlákna vyjma zmiňovaného vlákna s ID 5 vyhovující z pohledu hodnot vložného útlumu a útlumu odrazu. Vlákno č. 5 pro takovou rychlost není možné využít a lze jej použít pro signalizační účely či aplikace nevyžadující vysokou přenosovou rychlost, případně jej nahradit jiným vláknem.

Všechna vlákna vyhověla kritériím polarizační a chromatické disperze. Vyjma vlákna s ID 26 poskytují všechna vlákna rezervu pro nasazení systémů 40 Gbit/s. Vlákno s ID 26 limitní hodnoty nesplní, a proto na něm nebude možné systém 40 Gbit/s zavést: Z tohoto důvodu je třeba počítat s provozováním nižší přenosové rychlosti na tomto konkrétním vlákně, oproti ostatním.

Pro provozování přenosového systému s rychlostí nejvýše 10 Gbit/s jsou všechna zkoumaná vlákna vyhovující z pohledu disperzních parametrů.

Celkově můžeme konstatovat, že problematická jsou vlákna s ID 5 z pohledu útlumu odrazu a vlákno s ID 26 z pohledu polarizační disperze pro vyšší přenosové rychlosti. Z celkových šesti analyzovaných vláken jsou čtyř plně vyhovující režimu v přenosové rychlosti 10 Gbit/s a potenciálně vzhledem k určitým rezervám i vyšším šířkám pásma.

4. Návrh optické přístupové sítě

4.1. Rozbor návrhu sítě

Návrh a výstavba optické sítě je komplexní činností, při níž je nezbytné zvážit početné množství faktorů. Předmětem této podkapitoly bude shrnout podstatná kritéria, jimiž se můžeme řídit nebo spíše je musíme při výběru finálního řešení zohlednit.

Při návrhu přístupových sítí je nutné nahlížet na každý projekt individuálně. Neexistuje univerzální řešení, které by vedlo k optimálnímu výstupu projektové části. V tomto ohledu spatřujeme unikátnost každého návrhu. Z pohledu zavedených společností na telekomunikačním trhu (především v České republice) reprezentuje návrh optické přístupové sítě novou a z tohoto důvodu prakticky méně probádanou oblast působení.

Praktickou realizací dílčích projektů je možné získat zkušenosti, umožňující budoucí optimalizaci nákladů v dalších návrzích obdobných sítí, s možností využití získaných znalostí pro sestavení určitých typových řešení uplatnitelných v případě bytových a domovních rozvodů, kde se lze setkat s částečnou podobností či je empirie snáze přenositelná.

Při návrhu sítě jsme nuceni zvážit především dva zásadní činitele, jmenovitě se jedná o provozně-technologický a ekonomicko-správní.

4.1.1. Metodologie rozboru nákladů sítě

Podle literatury [23] se typický životní cyklus sítě, úzce související s rozbohem návrhu sítě, skládá z pěti etap:

1. Plánování – výběr technologie, zvolení topologie, návrh obslužných systémů atd.
2. Výstavba – vyhotovení sítě, rozvinutí stávající infrastruktury či vybudování nové.
3. Přejít zákazníků a poskytování služeb – zavedení služeb zákazníkům atp.
4. Provoz – samotný chod sítě v běžném zatížení a s požadovanou mírou údržby.
5. Vyřazení z provozu – odstranění síťové infrastruktury.

Z finančních důvodů je na místě snaha o snížení výdajů na jednotlivé etapy sítě a v současnosti o co nejnižší provozní náklady a budoucí využívání lidských zdrojů k provozu sítě. Cest k dosažení optimalizace je mnoho a jejich popis je nad rámec tohoto textu spadaje do několika technologicko-ekonomických disciplín. Poslední fáze nemusí znamenat fyzickou likvidaci zařízení, pouze její odpojení ze systému a dle vlastních zkušeností autora se k fyzickému odstranění zařízení přistupuje, především jsou-li k tomu finanční prostředky, nebo existuje-li jistý tlak na provedení této aktivity. Lze to vysvětlit zejména rozměrností, vahou původních zařízení a náklady na jejich přepravu s navazující recyklací. Pokud není tlak na odstranění kvůli nedostatku prostoru, jsou vyřazená zařízení často ponechávána na svém původním místě a odstraňují se později při vhodnějších příležitostech.

4.1.2. Ekonomicko-správní hledisko

Ekonomicko-správní aspekty se úzce dotýkají legislativních a právních náležitostí v příslušné zemi, stavu legislativních úprav, zákonů a norem, řešících danou problematiku návrhu sítě. V úvahu musíme brát činnost a nařízení regulačních úřadů v dané zemi či ve vyšším správním

a legislativním celku (nařízení EU, USA). Nejedná se pouze o zvážení aktuálně platných předpisů, ale i výhledové tendence a predikovaný ráz, kterým se odvětví s nejvyšší pravděpodobností bude ubírat. Analýza právního prostředí a určitý výhled na několik nadcházejících let musí být součástí celistvého zpracování projektu. Do tohoto segmentu patří i licenční ujednání a podmínky, které je třeba brát v potaz při koupi zařízení nebo používání licencovaných technologií a služeb. Nelze opomíjet ani místní zvyklosti a pravidla (ať již obchodní nebo kulturní). Z ekonomického hlediska je pro nás podstatná rentabilita projektu, která souvisí s náklady na jeho realizaci. Je vhodné vypracovat detailní rozbor konkurence na trhu či v dané lokalitě, s ohledem na možná rizika vyplývající z cenové politiky, kterou potřebujeme udržet v mezích podobných konkurenčních produktů. Společně s předchozí analýzou mějme na zřeteli kupní sílu obyvatelstva na vymezeném prostoru. S tím souvisí strategie investora při vstupu na trh s přihlédnutím k jeho charakteru, ekonomickým a další možnostem (tím je myšlena odlišnost ve velikosti společnosti, jejího kapitálu, investičních priorit, know-how⁵ a goodwill⁶). Souhrnně lze předchozí náklady začlenit pod CAPEX (**Capital Expenditure**) – kapitálové náklady; a pod tímto názvem vyhledávat konkrétní informace, které jsou k návrhu a výstavbě optických přístupových sítí publikovány na rozličných konferencích či v knižní podobě.

Předchozí text je možné shrnout do následujících bodů, které zvažujeme:

- Legislativa a právní regulace.
- Licence a jiná plnění práv třetích osob.
- Ostatní pracovně-právní vztahy a zvyklosti.
- Analýza cen a konkurence na trhu.
- Strategie a charakter investora.
- Finanční rozvaha nákladů.

Více informací je možné se dočíst v článku [23].

4.1.3. Provozně-technologické hledisko

Primárním úkolem je volba nejvhodnější technologie optických přístupových sítí, které jsou rozebírány v kapitole 2. Toto rozhodnutí nám v dalším projektování přináší specifické nároky a sounáležitosti, které blíže řešíme s ohledem na potenciální možnosti.

Veškeré plánování je bezpodmínečně nutné vztáhnout ke charakteru a specifičnosti dané lokality, pro níž tvoříme síť. V této fázi zvažujeme rozlehlost sítě (lokality), zda se jedná o místo, kde využijeme stávajících rozvodů strukturované kabeláže nebo jde o projekt tzv. „na zelené louce“. Určujeme, jaké služby budou poskytovány uživatelům, na jakých rozhraních a jak bude prováděno připojování účastníků – zda postupně či bude síť uvedena do provozu po připojení všech zákazníků v daném místě. Úzce s tím souvisí i rychlost připojení domácnosti (rychlost výstavby, konfigurace), kterou je jistým způsobem nutné garantovat a informovat

⁵ Know-how jsou výrobně-technické znalosti, poznatky a zkušenosti (s provozem zařízení, systémů aj.).

⁶ Goodwill je dobrá pověst společnosti, účetně vyčíslitelná ekonomická položka (aktivum) společnosti.

⁶ Goodwill je dobrá pověst společnosti, účetně vyčíslitelná ekonomická položka (aktivum) společnosti.

zákazníka o přibližné době potřebné k připojení, ve chvíli, kdy je s ním uzavírána smlouva o poskytování služeb.

Samotný výběr vhodné technologie je složitým problémem, jenž bývá zpravidla ovlivněn následujícími kritérii. Fyzickým spojením jednotlivých prvků sítě – optická vlákna, jejich typ, vlastnosti, počet, cena, kvalitou provedení propojení ve funkční celky. Rozhodujeme se mezi P2P nebo P2M, FTTx, typem PON a druhu organizace přenosu z/do sítě. Vyřešení navázání na transportní síť, zvolení aktivních prvků sítě, výběr pasivních prvků a způsob jejich koexistence. Po vybudování životaschopné sítě nastupuje fáze zavádění služeb zákazníkům, s čímž je spjata časově limitovaná rychlost zřízení samotné služby a případně náprava poruch vzniklých v síti při jejím provozu a zásahem třetích osob.

Z provozních vlastností zvažujeme organizaci provozu a údržby, identifikaci a opravu poruch, dohled nad technologií a monitoring. Zahrnujeme sem i přivedení zařízení pod dohled a monitoring, příprava na tarifkaci zákazníků a vytvoření tarifních schémat, která se mohou výrazně lišit od klasických telekomunikačních služeb. Nelze opomenout provoz a údržbu zákaznických přípojek, napájení a zálohu napájení klíčových aktivních prvků sítě. Obecně vyžaduje optická přístupová síť jiný postoj a přípravu na zřízení a poskytování připojení než klasické telekomunikační služby. Primární účelem sítě se stává datová konektivita, čemuž přizpůsobujeme procesy a systémy v rámci firemní infrastruktury.

Přestože se může jednat o drobný opomenutelný detail, je třeba s ním při plánování provozu rovněž počítat – zajištění úklidových prací v prostorách zázemí a dle osobních zkušeností je v různě přístupných prostorách nezbytné počítat s vyčleněním finančních prostředků na deratizaci škůdců. Dalším jevem bývá v zimě zhoršená, v určitých případech a lokalitách dokonce nemožná dostupnost obsluhovaných zařízení.

Předchozí diskutované investice a náklady je možné sumarizovat a vyhledávat pod pojmem OPEX (**O**perational **E**xpenditure) – operační náklady a investice. Blíže jsou tyto náklady rozebírány v ekonomické literatuře a informace o OPEX v oboru je možné získat z publikované literatury a optických (telekomunikačních příp. elektrotechnických) konferencí.

Rozebíranou problematiku je možné sumarizovat v následujících bodech:

- Výběr technologie.
- Fyzické prvky sítě a její topologie.
- Napojení na již vybudovanou síťovou infrastrukturu.
- Zřízení služby zákazníkům.
- Vyúčtování služeb zákazníkům a zákaznická podpora.
- Provoz a údržba zařízení.
- Dohled a management sítě.

4.1.4. Přidružené náklady

Nemalá složka vložených investic padne na náklady na výstavbu, kam spadají stavební práce, vytyčení trasování jednotlivých částí sítě a jejich povolení příslušnými úřady. Získání souhlasného stanoviska instalace od vlastníků objektů, pozemků a dalších staveb, do kterých realizace sítě nějakým způsobem zasahuje. Nejedná se o zanedbatelné položky a v současnosti jsou

považovány za hlavní překážku v budování optických přístupových sítí. Dle [23] se celkové náklady na výstavbu např. pro FTTH sítě pohybují mezi šedesáti až sedmdesáti procenty celkových investovaných nákladů. Do nákladových složek se započítává vyhotovení projektové a stavební dokumentace, montážní a stavební práce spojené s vybudováním trasy.

Potřebujeme zřídit zázemí pro zařízení v cestě (vyčlenění a úprava vlastněných prostor, nájem či novostavba). Alternativně je možné vybudovat zázemí v rámci prostor, které nejsou vlastněny investorem, což přináší další náklady v podobě nájmu a pokud není uzavřen dlouhodobě je zde riziko vzniku problémů se změnou vlastníka nemovitosti nebo objektu. Další komplikace se vyskytuje u řešení práv vjezdu, parkování u obsluhovaných objektů, povolení vstupu do střežených objektů a obecně pohyb osob spojený s pracovní činností v nevlastněných prostorech.

Připojení aktivních prvků k energetické síti a zajištění napájení, kontrola elektroinstalace a splnění bezpečnostních předpisů patří i z právního hlediska k nezbytným úkonům spojených se zprovozněním sítě. Jelikož je drtivá většina elektrotechnických a telekomunikačních zařízení náchylná na změnu provozní teploty, především na extrémní výkyvy musíme zabezpečit vyhotovení klimatizace – instalaci klimatizačních jednotek či systému jako takového.

Mezi přidružené náklady bude jistě patřit mnoho dalších, které nebyly jmenovány, ale následující seznam zdůrazňuje nejpodstatnější z nich:

- Vypracování projektové a stavební dokumentace.
- Schválení a povolení projektu dotčenými subjekty.
- Náklady na zhotovení.
- Připojení k energetické síti a řešení záložních zdrojů.
- Vytvoření patřičného zázemí dle určitých parametrů.
- Zajištění přístupu k objektu za všech okolností.

Podkapitoly 4.1.2, 4.1.3 a 4.1.4 jsou detailněji rozebrány v literaturách [10] a [23]. Autor dále čerpal z osobních zkušeností s výstavbou a provozem sítí ve společnosti Telefónica O2 Czech Republic, a.s.

5. Technologie výstavby optických vláken

Výstavba optických vláken a sítí jako takových se značně liší dle lokality, protože je třeba přizpůsobit parametry a použitou technologii ke specifikám lokality. Jinak řečeno – je značný rozdíl mezi výstavbou sítě na prázdných pozemcích nově budované rodinné zástavby (satelitní městečka) a výstavbou v prostředí hustě zastavěném uvnitř velkého města, tím spíše středů měst s významnou historickou anebo architektonickou hodnotou.

Druhým aspektem vyvstávajícím z prostředí instalace jsou konkrétní fyzikální podmínky a ostatní vlivy, které budou, případně mohou na optickou kabeláž působit nebo ty, jež lze v budoucnu predikovat. O nestandardních vlivech či výjimečných událostech se nebudeme zmiňovat, protože v převážné většině případů je před jejich nastáním nelze předvídat.

5.1. Klasické instalace

Původní způsob výstavby optických sítí a pokládky kabelů spočíval ve výkopu prostoru pro optický kabel v zemi. V předem definované hloubce se položí optické kabely a označí se folií pro lokalizaci a zabezpečení proti možnému budoucímu překopnutí. Protože optický kabel pro přímé uložení do země byl značně nákladný, přešlo se na ekonomicky výhodnější technologie pokládky popsané níže.

5.1.1. HDPE trubky

Použití HDPE (High-Density Polyethylen) trubek představuje v našich podmínkách nejběžnější a nejpoužívanější metodu instalace optických kabelů. Toto provedení nabízí úsporu a především ochranu kabelu proti vnějším vlivům a poškozením, za předpokladu dokonalého hermetického uzavření všech HDPE chrániček, s tím, že bude dodrženo ochranné pásmo a trubky budou řádně označeny v zemi a dojde k jejich zaznačení do map inženýrských sítí lokality. Při instalaci se u nás nejčastěji nasazují silnostěnné HDPE trubky s vnějším průměrem 40 mm a vnitřním 33 mm. Pro snazší zavádění kabelu jsou trubky opatřeny vnitřní vrstvou s nižším koeficientem tření (hladkou, lubrikovanou olejem, popř. zvláštními polymery). Po zavedení trubky na místo určení je vyzkoušena její průchodnost speciálním kolíkem, čímž dojde zároveň k ověření dodržení stanovených limitů pro ohyb. Optický kabel je do HDPE chráničky následně zafukován vysokým tlakem vzduchu. Poté je třeba trubku opatřit zakončením zabraňujícím vniknutí cizích těles a vody do vnitřku chráničky.

Samotné výkopové práce přinášejí značná omezení a rizika. V případě omezení se jedná zhoršení dopravní obslužnosti a průchodnosti komunikace, uzávěrky, objížďky, čímž dojde ke zhoršení životních podmínek obyvatel v dané oblasti. Rizika jsou spojena se samotným výkopem a možným narušením jiných inženýrských sítí (časté narušení vodovodního řádu apod.). Podstatnou nevýhodou je i velká finanční nákladnost na přípravné práce a uvedení komunikace do původního stavu v městské aglomeraci. Nicméně instalace pomocí HDPE trubek nepřináší pouze nevýhody, ale má i svá pozitiva v podobě známe technologie, se kterou mají montážní skupiny dlouholeté zkušenosti, což se příznivě projevuje na kvalitě a praktické realizaci montážní práce, oproti nejnovějším technologiím, které se teprve postupně zavádějí. Informační zdroje: [7], [24], [25].

5.2. Kabelovody a multikanály

Částečně snižují uvedené problémy HDPE trubek v předcházejícím textu. Jejich úkolem je nabídnout a poskytnout alternativu k opakovanému rozkopávání komunikace při dodatečné instalaci inženýrských sítí, tak aby se v ideálním případě při prvním výkopu umístil kabelovod, který umožní budoucí instalaci kabelu s minimem výkopových prací. Princip spočívá v zasazení multifukčního multikanálu ve výkopu (udává se hloubka jednoho metru). Plastová vícekomorová ochrana umožní snadnou identifikaci v ní uložených chrániček a kabelů. Nejčastější provedení je čtyř, šesti a devíti otvorový kabelovod, který má otvory čtvercového průřezu a umožňuje suchou instalaci. Výhodou tohoto způsobu pokládky je zajištění ochrany kabelů a fixaci na místě (nedojde k vertikálnímu posunu a pohybu vrstev v zemi). Kabelovod poskytuje tlakovou ochranu kabelů a jeho snadnou instalaci – máme na mysli vlastní položení a spojování jednotlivých dílů, které jsou opatřeny těsněním a pevně spojeny ocelovými spoji (sponami). Podrobnější informace lze získat u výrobce – viz [26].

Samotná finanční efektivita spočívá ve vytvoření přístupových šachet (komor), pomocí nichž je možné zavést do multikanálu další kabeláž s minimem výkopových a dalších prací, tím pádem i omezení obyvatelstva v oblasti. Navíc získáme přehledné uložení kabeláže a prostupnější okolí v místě instalace pro případné další výkopové a stavební práce. [7]

5.2.1. Samonosné kabely

Nadzemní kabely jsou jistou alternativou klasických instalací a přinášejí výhody rychlé a snadné výstavby uvnitř městské zástavby. Umožňují zavedení optického vlákna v místech, kde se jedná o jediné možné východisko.

Při výstavbě je třeba zvolit vhodný způsob napínání kabelu, přičemž je třeba dodržet hodnoty maximálního působení tažné síly a nesmíme opomenout ani limity minimálního poloměru ohybu. Je důležité zajistit, aby nedošlo k pohybu prvků, ke kterým jsou připevněny kotvy, úchyty, držáky a průběžné závěsy optického kabelu. Délka mezi kotvicími body (maximální průvěs) se může pohybovat v řádech několika stovek metrů a je plně závislá na vlastní konstrukci optického kabelu tj. počtu a kvalitě nosných lan. Konstrukce kabelu je obvykle řešena oddělením samotného optického kabelu s průběžným tažným prvkem od nosného pevnostního prvku (ocel, aramid aj.). Jádra jsou vzájemně propojena venkovním ochranným pláštěm (např. z polyoefinu) a tvoří tak podélně souběžně probíhající pár vedení (optické a nosné). V případě potřeby může být vlastní optický kabel doplněn ještě armováním jako ochrana proti škůdcům. Ostatní parametry a přesné provedení kabelu závisí na použití a požadované maximální délce průvěsu. [7]

Je zcela zřejmé, že venkovní kabely jsou vystaveny působení vnějších klimatických vlivů, zejména pak větru, dešti, sněhu a mrazu. Rovněž vysoké teploty a výkyvy teplot působí značné změny v podobě objemové teplotní roztažnosti. Doporučuje se, aby byl samonosný kabel ukotven ve vyšších vertikálních polohách ulice (mezi sloupy) tak, aby nedošlo k jeho poškození běžnou údržbou a pracemi na pozemní komunikaci.

5.3. Progresivní a moderní trendy

Mikrokabelážní systémy (MCS – Micro Cabling Systems) našly své uplatnění jako inovativní technologie snižující finanční a časovou nákladnost výstavby optické kabeláže. Jejich hlavní výhodou je nasazení bezvýkopové technologie pro instalaci metropolitních (distribučních) sítí či přístupové optické infrastruktury. Toto řešení v mnoha případech umožňuje vyhnout se stavebním uzávěrám ve městech, či u konkrétních silnic nebo ulic. Popřípadě se vypořádává s problémem značného množství již instalovaných sítí, které s sebou přináší stavební komplikace a omezení pro každého dalšího investora, který se snaží umístit inženýrskou síť libovolného druhu. Mikrokabelážní systémy lze kombinovat s konvenčními optickými sítěmi a klasickým způsobem výstavby a pro doplnění je nezbytné uvést, že se používají standardní optická vlákna s typickými průměry jader a plášťů. [27]

5.3.1. MCS Road

Mikrokabelážní systém MCS Road je, jak napovídá anglický název, speciální technologií vyvinutou pro instalaci optických kabelů do pozemních komunikací. Pro instalaci se využívá zpevněných ploch (asfaltových, betonových) a chodníků, do kterých je vyřezána drážka. Poté je vyčištěna proudem vody a následně vysokotlakově vysušena. Do drážky ve vozovce, případně chodníku, se umístí v hloubce 0,6 – 1,2 m kabeláž. Jedná se o svazek 12 až 144 vláken sdružených do barevně odlišených skupin (obvykle po 12 vláknech), který je zapouzdřen v pevné, kovové ochranné trubičce z mědi. Vlastní tlustostěnná trubička je navíc chráněna polyethylenovým pláštěm (popř. jinou směsí plastu) s celkovým průměrem kabelu do kolem 9 mm. V drážce připravený kabel se opatří pěnovou tepelnou izolací a přitlačí se pryžovým prvkem pro minimalizaci pohybu a dokonalejší utěsnění. Výřez se opět zalije směsí odpovídající původnímu povrchu komunikace a vznikne tak dilatační spára instalace je dokončena. Bližší informace v literatuře [28].

5.3.2. MCS Drain

MCS Drain neboli instalace mikrokabelu v kanalizačním řádu. Na rozdíl od MCS Road technologie, kdy se kabel uloží na dno vertikální drážky, jsou kabely při instalaci v rozvodech kanalizace přichyceny ke stropu odpadního řádu, z čehož vyplývají i odlišné požadavky na konstrukci kabelů pro tento účel určených. Počet vláken a jejich rozmezí se oproti MCS Road neliší, u kabelů je vyměněna měděná trubička za silnostěnnou hliníkovou, u níž je třeba zajistit vodotěsnost a voděodolnost. Pro potřeby splnění požadavků namáhání v tahu je tato trubička navíc po obvodu opatřena ocelovými dráty. Kromě toho toto opláštění slouží jako ochrana proti škůdcům obývajícím toto prostředí. Takto opancéřovaná trubička je opět potažena polyethylenovým či obdobným pláštěm a naplněna tixotropním gelem zabraňujícím šíření vlhkosti vláknem. Při samotné instalaci musí nejprve dojít k očištění potrubí a šachet odpadního řádu vysokotlakově pomocí vody a poté připevnění ocelových kotevních ok a navijecích zařízení v horních částech šachet a kluzných oblouků (plastových vodítek) u ústí šachty do kanálu odpadních vod. Samotný kabel se zatahuje s využitím zpětného navíjení čistící hadice, která byla předtím protažena mezi dvěma šachtami při čištění. Po zpětném navínutí je mikrokabel protažen mezi šachtami a provlékne se ocelovými oky a napne se na předepsanou hodnotu tahu (až 15000 N) a tímto způsobem se pokračuje dále. Vytvoří se rezervy, případně

spojky a dojde k jeho pevnému zafixování. Instalace MCS Drain může probíhat ve všech typech vodovodních a kanalizačních řádů – tj. kanály na dešťovou vodu, odpadní vodu či jejich kombinaci. Podrobněji je problematika rozebrána v [29].

5.3.3. Mikrotrubičkování

Primárním úkolem této technologie je zkapacitnění a zefektivnění využití HDPE trubky, která se běžně používá pro zafukování optických kabelů a jejich ochranu. Mikrotrubičkování umožňuje zvýšit přenosovou kapacitu. Do HDPE trubky se zafouknou mikrotrubičky a do nich samotná mikrovláčna. Tento způsob vybudování optické sítě přináší několik výhod. Prvním je prostorová úspora uvnitř HDPE trubek, díky menšímu rozměru mikrotrubiček oproti klasickým optickým kabelům. Další výhodou s tímto spojená je umožnění vedení více tras takovouto HDPE trubkou. Poskytovatelům či pronajímatelům optických vláken tento způsob instalace umožní zafouknout si vlastní optické mikrokabely a nemusí se mezi ně dělit vlákna v jednom optickém kabelu při použití konvenční technologie. Podstatným rozdílem umožňujícím optimalizaci nákladů na vybudování optické sítě v jejích počátcích je snazší usměrnění vstupních nákladů. U klasické technologie s jedním optickým kabelem, je třeba předem naplánovat požadovaný počet optických vláken, který bude dostatečný nejen v daný okamžik, ale i s výhledem do budoucna. Tento fakt sebou přináší vyšší náklady – instalujeme přenosovou kapacitu vyšší než je nezbytná a v prvotním okamžiku naprosto nevyužitou. Oproti tomu technologie mikrotrubičkování umožňuje zafukování jednotlivých mikrokabelů s ohledem na jejich aktuálně potřebný počet (rozložit výdaje do delšího časového horizontu). Můžeme snížit prvotní náklady projektu tím, že si předpřipravíme mikrotrubičky, ale samotné mikrokabely zafukujeme postupně s tím, jak roste poptávka po službách. Pro zafukování se používají odlišná speciální zařízení např. SuperJET pro zafukování mikrotrubiček a MicroJET pro zafukování samotných mikrokabelů. Vlastní mikrokabely se vyrábějí v mnoha rozličných variantách s běžnými počty od 2 po 96 optických vláken. Jednotlivé provedení a uspořádání mikrotrubiček a mikrokabelů se liší dle výrobce a nebudeme je dále rozvádět. Více je možné se dočíst v [24] a [27].

5.4. Vnitřní instalace

Instalace vnitřních optických kabelů může nabídnout několik odlišných přístupů a ve většině případů je volba vhodného typu provedení plně závislá na konkrétním objektu, jeho stavebně-technickém stavu, stáří a okamžiku, kdy se v rámci budovy či domu přistupuje k pokládce. Je značný rozdíl, zda řešíme optické rozvody ve stádiu projektové přípravy, v průběhu započaté výstavby objektu či v zavádění optických vláken v již postaveném domě. V případě již dokončeného objektu velmi závisí na jeho stáří, jelikož musíme zvolit odlišné postupy u objektů mladších a domů se starším datem výstavby, které nejsou uzpůsobeny pro dodatečné instalace kabelových a jiných rozvodů, což u moderních, či v poslední době postavených domů nemusí být neřešitelná komplikace přinášející vysoké náklady.

Výběr vhodné metody vytvoření optické kabeláže v objektu je posléze primárně ovlivněn rozhodnutím investora a případně rozhodnutím majitele budovy. Hledá se proto optimální a finančně přijatelné řešení pro obě strany, které nelze zobecnit a vytvořit závěr, že jistá technologie vnitřní instalace je ta nejlepší.

Nyní budou uvedeny nejběžnější technologie bez jakéhokoliv vztahu k výrobci – Riser kabely, Low-Friction kabely, páskové kabely a jiné další. [30]

Obecně je nezbytné mít na zřeteli při pokládce optických kabelů a vláken fyzikální parametry vláken jako takových. Zejména aby došlo k dodržení minimálních poloměrů ohybu a nebyly překročeny tažné vlastnosti vláken a kabelů, čímž by došlo k jejich poškození, případně degradaci sítě. Dalším podstatným aspektem, kterému je třeba věnovat pozornost, je co nejdokonalejší tepelná a především voděodolná izolace kabeláže a všech jejích prvků.

Jednotlivé způsoby instalace a jejich faktické realizace se můžou lišit a záviset na nabídce a provedení určitou společností, nicméně základní idea byla nastíněna v předchozím textu. Výběr vhodného typu výstavby pochopitelně závisí na situaci a rozhodnutí investora.

6. Vlastní návrh přístupové sítě

6.1. Zaměření projektu

Návrh optické přístupové sítě v tomto projektu řeší připojení části rezidenčních objektů na pomezí Masarykovy čtvrti (městská část Brno – Stránice) a městské části Brno – Pisárky. Jedná se o území s vilovou zástavbou a činžovními domy. Zajištění konektivity bude řešeno prostřednictvím pasivní optické sítě PON s uspořádáním optických přípojek strukturou FTTH.

Vlastní síť bude navazovat na stávající metropolitní síť vedoucí na Žlutý kopec do areálu Masarykova onkologického ústavu v Brně, kde je ukončena.

Optická přístupová síť Preslova – Žlutý kopec bude výstavbou navazovat na současnou optickou kabeláž odbočením z kabelové trasy v ulici Lipová. Úkolem projektu je navrhnout připojení části rezidenční čtvrti a optimalizovat náklady na výstavbu optické sítě s potenciální možností výhledové modernizace a především případného zkapacitnění kompletního celku s ohledem na budoucí rozvoj území.

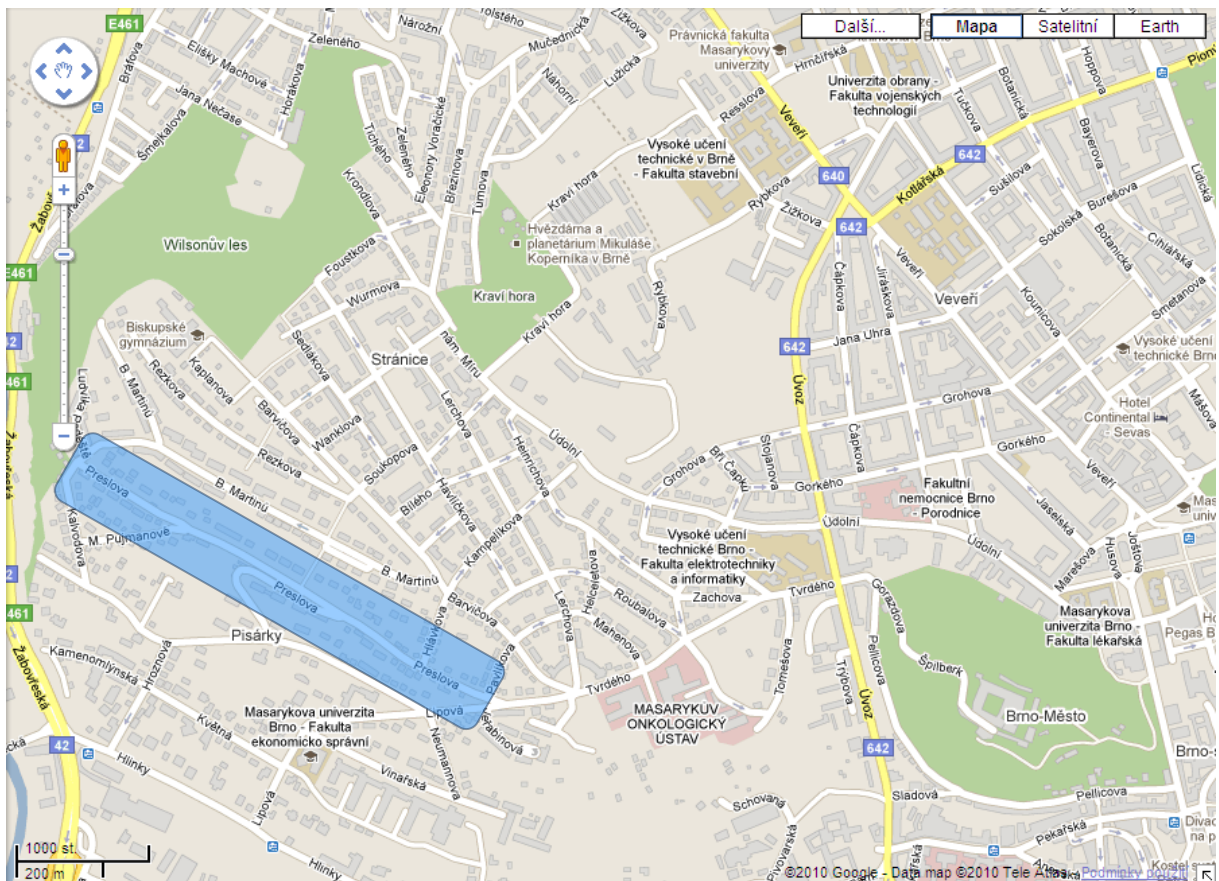
6.2. Lokalita

Jak již bylo popsáno v předchozím textu, lokalita pro plánovanou pasivní optickou síť je rezidentního charakteru, z čehož vyplývá i převážná struktura zákazníků. Jedná se o nevelké území městské části Brno – Stránice (částečně Pisárky). Uvažovaná lokalita se nachází v blízkosti centra Brna a Brněnského veletržního výstaviště. Je velmi dobře dopravně přístupná, na druhou stranu je považována za jednu z nejkliďnějších adres v Brně, jakožto žádaná adresa bydlení. Území je téměř zcela zaplněné stávající zástavbou a vyjma několika volných stavebních parcel nelze v budoucnu očekávat intenzivní výstavbu.

Projekt cílí především na ulici Preslovu (viz obr. 6.1), která je dopravně obsluhována městskou hromadnou dopravou. V ulici se nachází přibližně 60 obytných objektů, z toho 10 nízkopodlažních budov, odhadovaný počet zákazníků v ulici činí zhruba 2000.

Kromě běžných obyvatel sídlí v ulici dva podnikající subjekty – firma Famko spol, s.r.o (dealer vozů Peugeot) a Penzion Eugenie. Tuto informaci uvádíme z důvodu potenciálně odlišného zákaznického řešení s rozdílnou cenovou kategorií oproti běžným zákazníkům v dané lokalitě.

Celková délka ulice je 1100 metrů a je od hranice areálu Masarykova onkologického ústavu svým počátkem vzdálena přibližně 400 metrů. Součtem těchto distancí (1100 metrů a 400 metrů) získáme maximální potřebnou délku vlákna pro připojení zákazníků na nejbližším bodu sítě.



Obr. 6.1: Zakreslení zamýšleného prostoru budoucí přístupové sítě. [31]

Poznámka k obr. 6.1 – modře znázorněná oblast pokrývá objekty, tedy zákazníky, kteří jsou uvažováni pro začlenění do optické přístupové sítě Žlutý kopec – Preslova.

6.3. Situační plán lokality

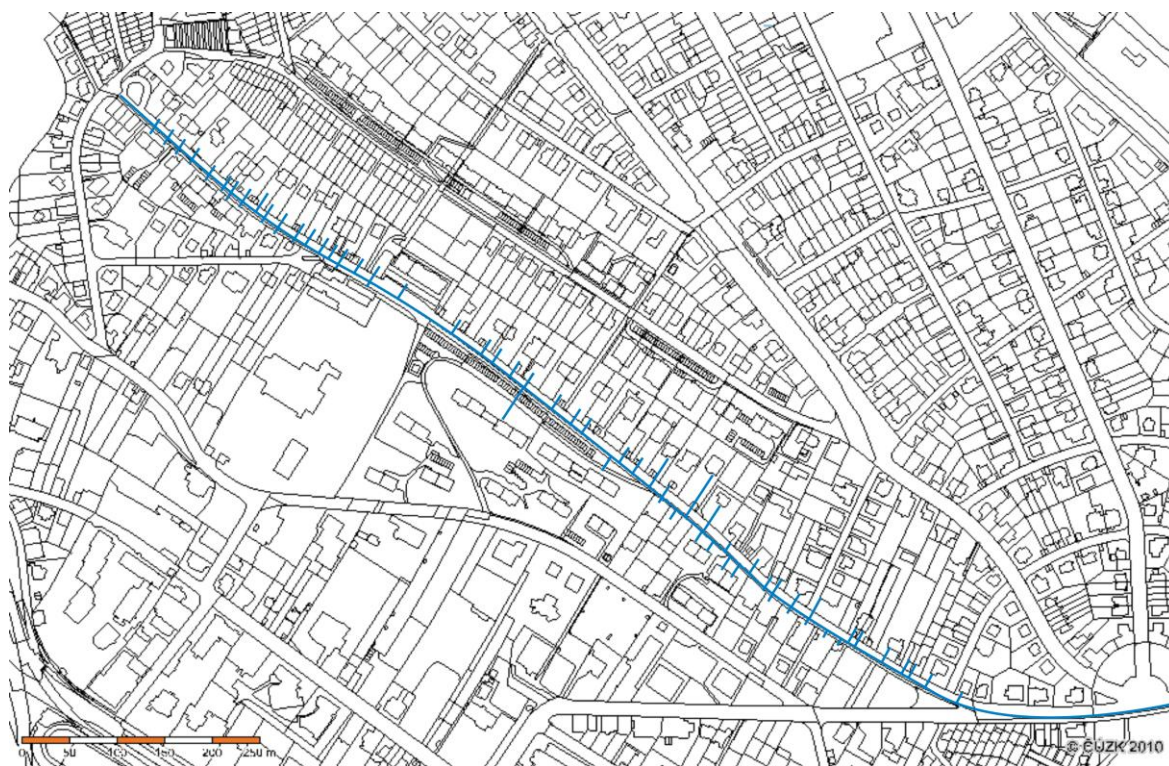
V místě je nabízeno připojení k internetu od několika poskytovatelů ADSL a Wi-Fi přístupových služeb. Dle statistik umístěných na serveru www.rychlost.cz se lze dozvědět, že maximální poskytovaná rychlost v lokalitě se pohybuje do 10 Mbit/s. Jedná se převážně o připojení pomocí technologie ADSL nabízené nejmenovanými poskytovateli připojení.

Cílem projektu je zvýšit přenosovou kapacitu a nabídnout zákazníkům skutečně vysokorychlostní připojení rychlostmi až 100 Mbit/s (do budoucna i vyšší).

S ohledem na předchozí znázornění potenciální zákaznické základny navazujeme zakreslením budoucího vedení optické trasy společně s vizualizací ostatní kabelových tras nacházejících se v oblasti – podrobně na obr. 6.2.

Červeně je zvýrazněno primární vedení budoucí přístupové sítě. Zelená linka značí přívodní kabely z centrálního bodu ÚVT MU Brno (Ústav výpočetní techniky Masarykovy Univerzity Brno) do ukončujícího místa v areálu Masarykova onkologického ústavu (dále jen MOÚ Brno). Oranžovými čarami jsou značeny ostatní stávající trasy optických kabelů BAPS (Brněnské akademické počítačové sítě). Severním směrem jdoucí k biskupskému gymnáziu a jihozápadním směrem ke kolejím Masarykovy univerzity.

Orientační zakreslení přípojných vláken k budoucí trase optického vlákna je znázorněno graficky na obr. 6.4. Jedná se o prvotní zákres, který bude dále upravován a zpřesňován vzhledem ke konkretizaci celého projektu a složí tak k přiblížení rozmístění jednotlivých objektů v lokalitě a ukazuje jednu z možných variant realizace připojení zákazníků v dané ulici.



Obr. 6.4: Zakreslení vedení nových vláken do kartografické mapy [32].

6.4. Použitá technologie

Organizace optických přípojek v síti je typu FTTH, protože se jedná převážně o připojení rodinných domků a vil.

Síť se bude skládat z pasivních optických rozvaděčů, neboli půjde o pasivní optickou síť PON. Ze zvažovaných standardů – EPON a GPON byla vybrána technologie GPON, která je pro naše účely vhodnější, neboť poskytuje vyšší přenosovou rychlost, svým charakterem více vyhovuje přenosům služeb Triple Play⁷ a snáze dojde k jejímu začlenění do stávající distribuční sítě. Výhodou technologie GPON je vyšší rozbočovací poměr, který umožní připojení většího počtu zákazníků.

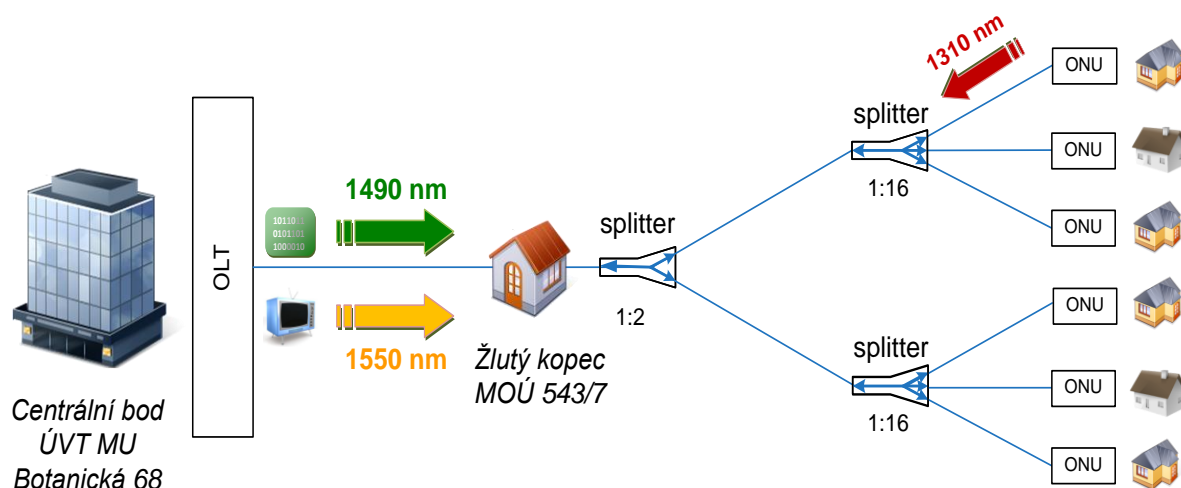
Připojení ulice Preslova bude řešeno pomocí dvou přívodních vláken z centrálního bodu. Pro odlišení připojení přední a zadní části ulice bude přístupová síť rozdělena do dvou větví A (přední část) a B (zadní část), čemuž odpovídá i využití dvou přívodních vláken. Každé vlákno slouží k připojení jedné z větví samostatně k centrálnímu bodu sítě. Navrhovaný dělicí

⁷ Triple Play je označení souhrnného balíčku poskytovaných služeb – internetové televize, připojení k internetu a hlasových služeb přenášených datovou sítí.

poměr se v primárním rozvaděči rovná 1:2 s optimalizací potřebných délek vláken (platí na obou vláknech). Mezilehlý rozvaděč je navržen s vydělovacím poměrem 1:16.

6.5. Vlnový plán

V souladu se standardy uvedenými v kapitole 2.3, přesněji se standardem GPON v podkapitole 2.3.3, bude v této části uveden vlnový plán přístupové sítě Preslova – Žlutý kopec. Pro sestupný směr je zvolena a bude využívána vlnová délka 1490 nm. Ve vzestupném směru bude signál přenášěn na vlnové délce 1310 nm. Televizní signál bude sítí vysílán na speciálně vyhrazené vlnové délce 1550 nm. Názorně je vše zakresleno na obr. 6.5.



Obr. 6.5: Znázornění zvolených vlnových délek přístupové sítě.

6.6. Útlumová bilance přístupové sítě

V kapitole 3 jsme se věnovali analyzování naměřených dat a v podkapitole 3.7 bylo provedeno zhodnocení těchto výsledků vyplývajících z měření. Ziskáním a prozkoumáním zmíněných hodnot jsme si vytvořili představu, která vlákna jsou vhodná k začlenění do optické přístupové sítě Preslova – Žlutý kopec. Bylo zjištěno, že nejperspektivněji se jeví, i s výhledem do budoucna, zakomponování vláken s identifikačními čísly ID 6 a ID 25. Jejich přenosové vlastnosti lze nalézt ve zmíněné části práce výše, ale v tab. 6.1 si zopakujeme nejdůležitější parametry, se kterými budeme pracovat v dalších kalkulacích.

Tab. 6.1: Nejdůležitější parametry zvolených vláken.

ID vlákna	λ [nm]	IL [dB]	Délka [km]
BOT_ZLKOP_06	1310	1,76	4,568
	1550	1,15	
BOT_ZLKOP_25	1310	1,74	4,571
	1550	1,17	

Ostatní údaje lze vyvodit z předchozích uvedených informací o chystané přístupové síti.

Na základě předchozích informací se nyní dostáváme ke konkrétnímu předběžnému vyčíslení hodnot útlumové bilance sítě. Základní prvky vnašející útlum do trasy jsou následující:

- **Vlákna:**
 - Přívodní vlákno – délka 4,57 km, vložný útlum přibližně 1,75 dB.
 - Mezilehlé vlákno – délka 0,7 km, vložný útlum přibližně 0,245 dB.
 - Přívodní vlákno – délka do 0,3 km, vložný útlum přibližně 0,11 dB.
- **Konektory [33]:**
 - SC/PC konektor na straně OLT v CO – vložný útlum 0,2 dB.
 - SC/APC konektor na straně ONU u zákazníků – vložný útlum 0,2 dB.
- **Optické rozbočovače [33]:**
 - Primární rozbočovače 1:2 – vložný útlum 3,9 dB.
 - Sekundární rozbočovače 1:16 – vložný útlum 14,1 dB.

Tab. 6.2: Rozpis prvků trasy s kalkulací jejich útlumu pro větev A.

Prvek	Počet [ks]	Délka [km]	Útlum [dB]	Celkový útlum [dB]
Konektory	2,000		0,200	0,400
Přívodní vlákno		4,571	1,750	1,750
Mezilehlé vlákno		0,700	0,245	0,245
Přípojné vlákno		0,300	0,105	0,105
Rozbočovač 1:2	1,000		3,900	3,900
Rozbočovač 1:16	1,000		14,100	14,100
Systémová rezerva	1,000		2,000	2,000
Výsledný očekávaný útlum				22,705

Údaje o hodnotách útlumu jednotlivých prvků jsou čerpány z [33] nebo z předchozího textu a citované literatury u daných částí práce.

Tab. 6.2 udává rozložení útlumu pro větev A. Pro větev B je situace obdobná, mění se pouze délka mezilehlého vlákna, jež vzroste o 500 metrů, čímž se hodnota celkového útlumu pro celou větev zvýší na 22,880 dB včetně systémové rezervy. Celkový útlum optické trasy lze spočítat ze znalosti celkového útlumu optického vlákna α_c a počtu pasivních součástek a svárů vláken dle [19] takto (logické rozšíření rovnice 3.1):

$$A_{\text{celk}}(\lambda) = L \alpha(\lambda) + N_s A_S(\lambda) + N_{\text{kon}} A_{\text{konektor}} + A_{\text{pasivní}}, \quad (6.1)$$

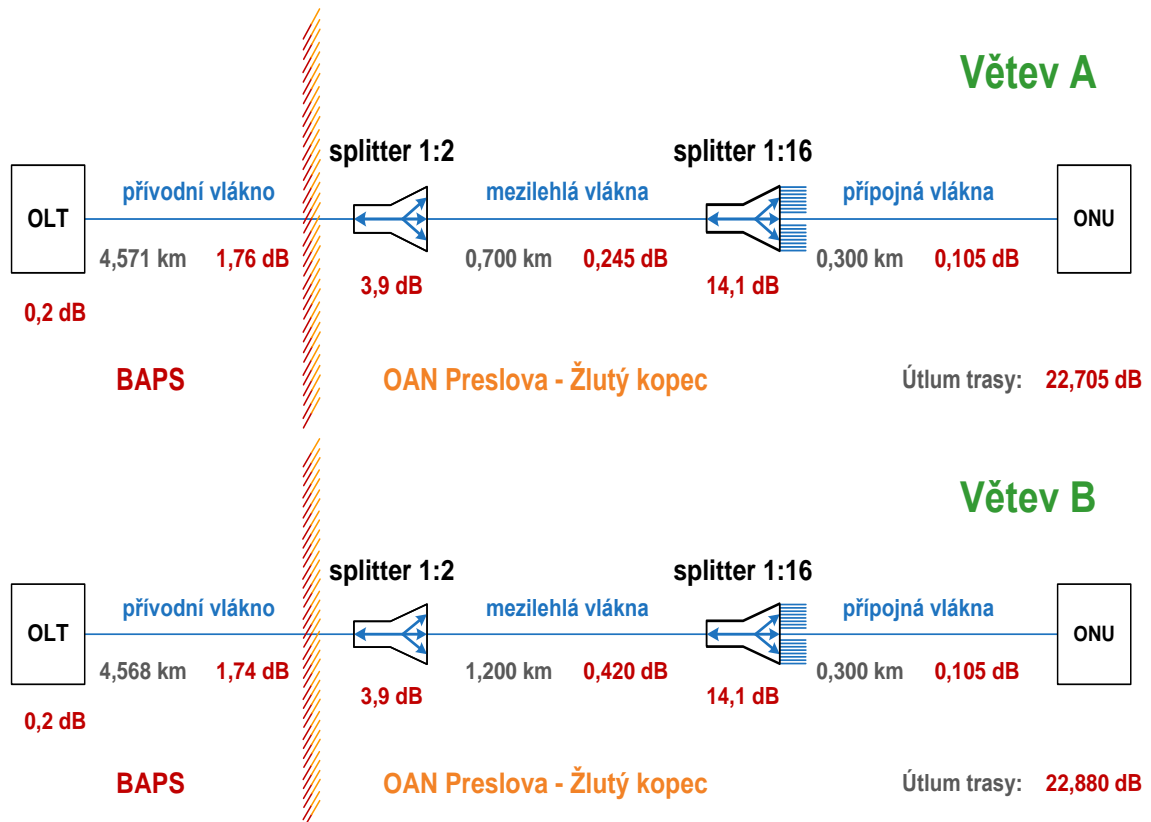
kde L je délka celé kabelové trasy, N_s počet svárů nebo spojek vláken, $A_S(\lambda)$ je útlum svárů, N_{kon} počet konektorů, A_{konektor} limitní útlum konektoru, $A_{\text{pasivní}}$ vložný útlum pasivních prvků zařazených do trasy.

Pokud je vlákno v kabelové trase rozloženo do několika částí, jako je tomu v našem případě, rozepíšeme celkový útlum kabelové trasy $A_{kab}(\lambda)$ takto [33]:

$$A_{kab}(\lambda) = l_{přív} \alpha_1(\lambda) + l_{mez} \alpha_1(\lambda) + l_{příp} \alpha_1(\lambda) + \dots + l_x \alpha_n(\lambda), \quad (6.2)$$

kde $l_{přív}$ je délka přívodního vlákna, l_{mez} je délka mezilehlého vlákna, $l_{příp}$ je délka přípojného vlákna a l_x představuje obecně délku každého dalšího vlákna v kabelové trase, $\alpha_n(\lambda)$ je obecně koeficient útlumu jednotlivých vláken.

Graficky hodnoty útlumu a jejich rozčlenění na jednotlivé prvky včetně potřebných délek optických vláken na trase ukazuje obr. 6.6.



Obr. 6.6: Rozložení útlumu v jednotlivých větvích sítě.

Předběžnou kalkulací byl stanoven útlum úseku sítě v přední části ulice se sekundárním rozbočovačem na úrovni Hlávkovy ulice. Celkovým útlumem 22,705 dB včetně systémové rezervy se tato přístupová síť řadí do třídy B pasivní optické sítě typu GPON jak dokládá následující tab. 6.3:

Tab. 6.3: Útlumové třídy PON dle [33].

Varianta PON		Útlum ODN [dB]
GPON	Třída A	5 – 20
	Třída B	10 – 25
	Třída C	15 – 30
EPON	Typ 1	5 – 20
	Typ 2	10 – 24

Větev B rovněž splňuje požadavky na začlenění do útlumové třídy B varianty pasivní optické sítě GPON s nominálním útlumem 22,88 dB.

Typy sítě a rozsah jejich útlumu v ODN jsou definovány v doporučení IEEE 802.3ah a doporučení ITU-T G.984.2 vymezuje tři třídy rozsahu útlumu GPON. Podstatné na rozčlenění do těchto tříd je odlišnost finanční náročnosti a požadavky na zařízení patřících do tříd daného typu. Zároveň se u nich liší energetické nároky (nižší třída požaduje výkonnější a dražší optické zdroje), z čehož jasně vyplývá snaha o navržení přístupové sítě v co nejvyšší třídě pro úsporu ekonomických a provozních nákladů. Mimoto se jednotlivé třídy odlišují i maximálním rozbočovacím poměrem v rámci jedné sítě. V našem případě není bez výměny již položených přívodních vláken možné dosáhnout GPON třídy A, nicméně v třídě B se návrh umístí bez komplikací včetně systémové rezervy.

7. Simulace přístupové sítě

Dle vlastního návrhu, který byl popsán v předchozí kapitole 6, byla provedena simulace navržené sítě v programu OptiSystem společnosti Optiwave Inc., jenž slouží k návrhu, testování a simulování optických linek v přenosové vrstvě moderních optických sítí.

Program umožňuje návrh a odsimulování optických linek fyzické vrstvy různých optických přístupových sítí a pasivních variant BPON, EPON či GPON. Obsahuje základní bloky vysílacích a přijímacích částí přenosového systému ať již elektrického či optického charakteru nebo převaděčů signálu mezi nimi. Zároveň přináší řadu diagnostických nástrojů pro analyzování stavu linky a jejích přenosových vlastností. Jedná se o robustní simulační prostředí obsahující mnoho nástrojů pro návrh a ověření funkce fyzické vrstvy sítě před jejím vybudováním.

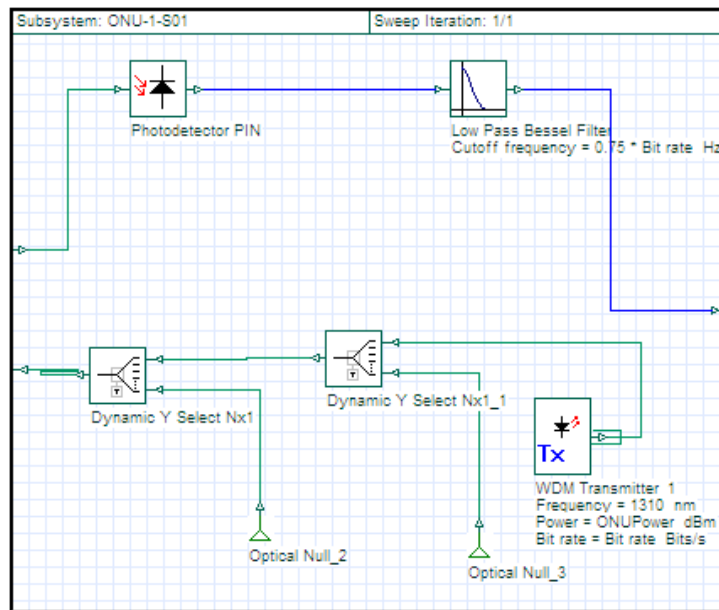
Aplikace jeho uživatelům poslouží k vyhodnocení funkčnosti a vhodnosti navrhovaných entit fyzické vrstvy – vysílačů, přijímačů či zesilovačů nabízí analýzu současných optických sítí, sítí typu SONET/SDH a dalších. Přidáním položek cen k jednotlivým prvkům simulované sítě lze v programu získat i výpočet přibližných výsledných nákladů na vyhotovení optické sítě.

7.1. Převedení projektu do simulace

Optické linkové zakončení je realizováno rozdělením přijímací a vysílací části. Vysílací část je provedena blokem *WDM Transmitter*, který vysílá posloupnost bitů linkovým kódem bez návratu k nule (NRZ – Non Return to Zero Level) s rychlostí 2,5 Gbit/s. Tento blok generuje posloupnost dat a vytváří optický signál, který je přenášen přímo připojeným vláknem. Sdružuje tak funkci generátoru dat se zdrojem záření. Signál je přenášen v sestupném směru na vlnové délce 1490 nm, která je nastavena na vysílači. Pro oddělení sestupného a vzestupného směru je použit blok *Bidirectional Coupler*. Přijímací část OLT je složena z bloků PIN diody jako fotodetektoru – *Photodetector PIN 1*, Besselova filtru dolní propusti – *LowPass Bessel Filter 1*, výběru bufferu – *Buffer Selector*, za nímž následuje regenerace signálu *3R Regenerator* a analyzátor chybovosti se zobrazením diagramu oka *BER Analyzer*. Řešení prvku optického linkového zakončení OLT je zdokumentováno na obr. 7.2.

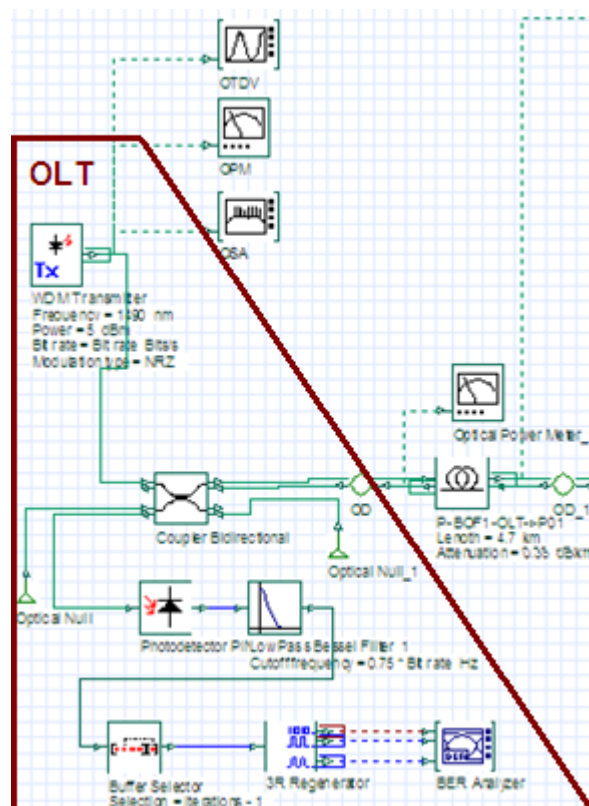
OLT je připojeno vláknem *Bidirectional Optic Fibre P-BOF1-OLT→P01* (parametry vlákna vycházejí z kap 3) k optickému rozbočovači *Splitter P01-OLT*, který provede rozbočení 1:2 a mezilehlým vláknem *M-BOF2-P02→S01* je signál přiveden na sekundární rozbočovače 1:16 *Splitter S01-P01-1* a *Splitter S01-P01-2*, kde dochází k rozbočení k jednotlivým stanicím *ONU-(1 až 16)-S01* respektive *ONU-(1 až 16)-S02*.

Síťové optické jednotky ONU mají podobné složení jako jednotka OLT – skládají se z bloku vysílače *WDM Transmitter*, jenž vysílá data na vlnové délce 1310 nm (dříve určené pro vzestupný směr). Dva bloky *Dynamic Y Selector* zajišťují vysílání stanice ve vyhrazeném časovém intervalu (time slotu), který je stanici v nastavení přidělen. Přijímací část je shodná jako u OLT – tj. fotodetektor *Photodetector PIN* a Besselův filtr dolní propust *Low Pass Bessel Filter*, jak je patrné z příkladu zapojení jednotky ONU na obr. 7.1.



Obr. 7.1: Rozkreslení zapojení jednotky ONU – konkrétně ONU-1-S01.

V průběhu trasy jsou na zvolených místech umístěny měřiče výkonu *OPM* – *Optical Power Meter*, spektrální analyzátoři *OSA* – *Optical Spectral Analyzer* a jednotky určené k zobrazení časového průběhu přijímaných dat *OTDV* – *Optical Time Domain Visualiser*. Jejich ikonografie je ukázána na obr. 7.2.



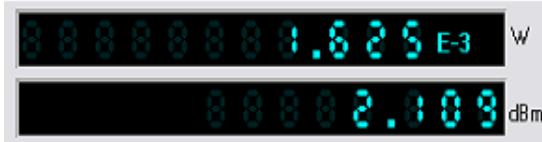
Obr. 7.2: Zobrazení jednotky OLT a měřicích přístrojů.

Podrobnější schéma zapojení sítě Žlutý kopec – Preslova v programu je ukázáno v příloze B.

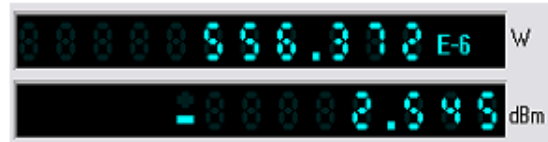
7.2. Výstupy simulace

7.2.1. Měření výkonu

Za vysílačem (výkon 5 dBm)



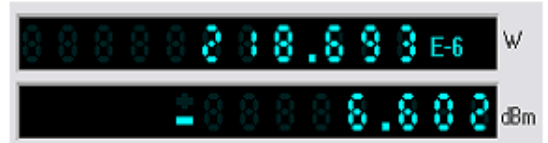
Za přívodním vláknem:



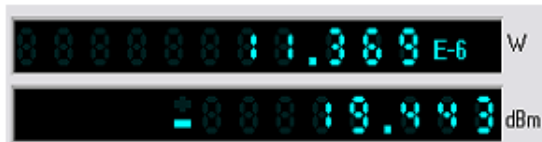
Za primárním rozbočovačem:



Za mezilehlým vláknem



Za sekundárním rozbočovačem:



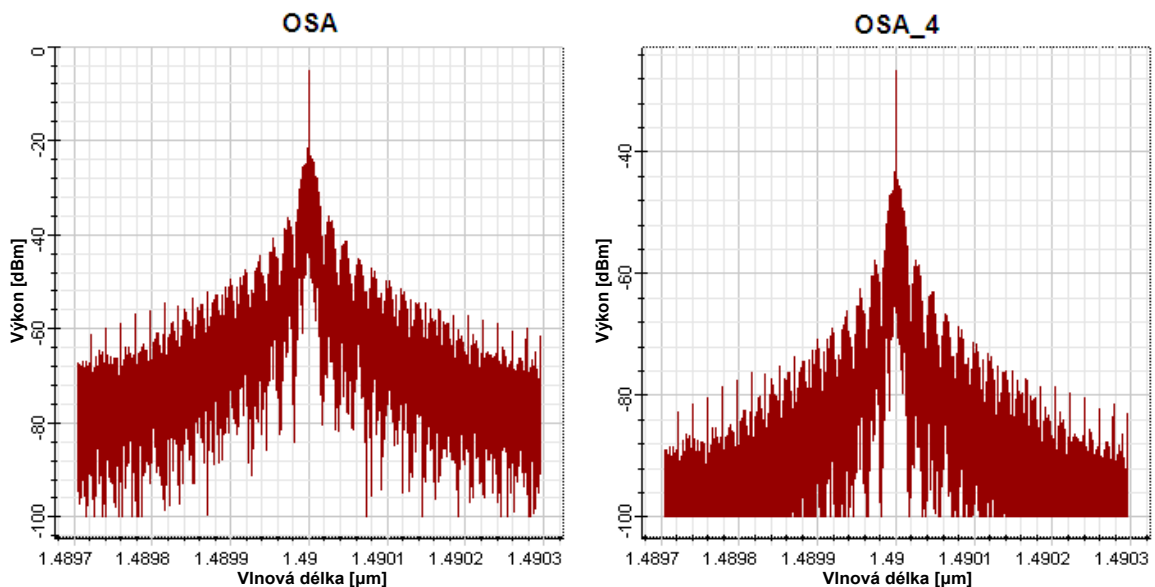
Za přípojným vláknem:



Obr. 7.3: Výsledky měření výkonu na trase

Výsledná data jsou sbírána z optických měřičů útlumu na trase – Optical Power Meter 1 až 6.

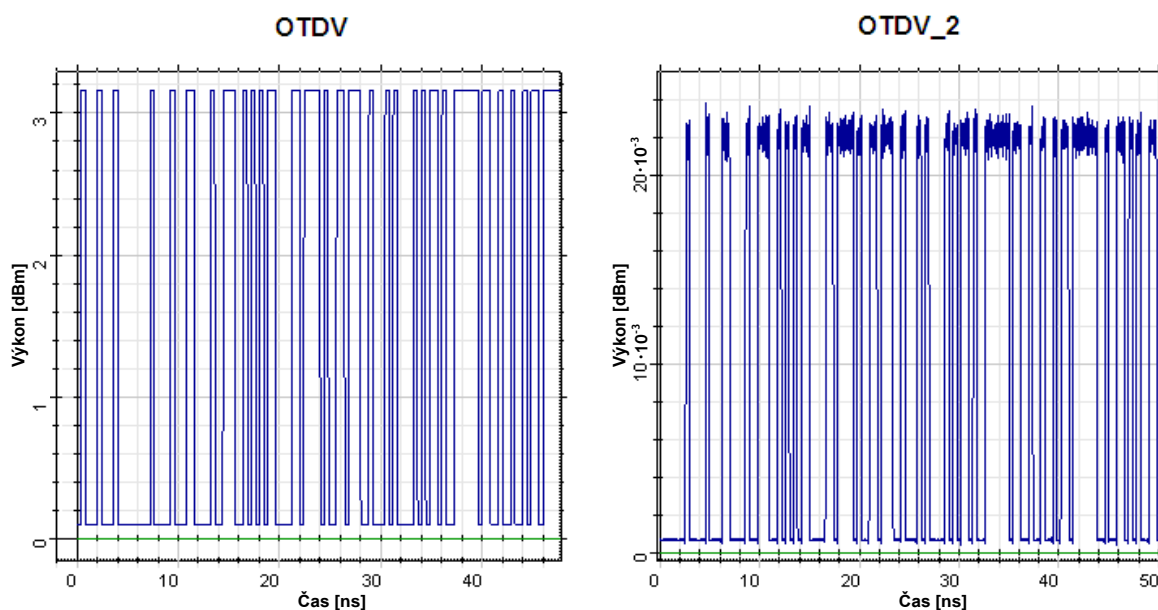
7.2.2. Spektrum signálu



Obr. 7.4: Spektrum vysílaného (vlevo) a přijímaného signálu (vpravo).

Obr. 7.4 dokládá spektrum signálu na vstupu do přenosového systému a na jeho výstupu. Na zachyceném obrázku je patrný vliv přenosu signálu vlákny a dále pasivními prvky sítě.

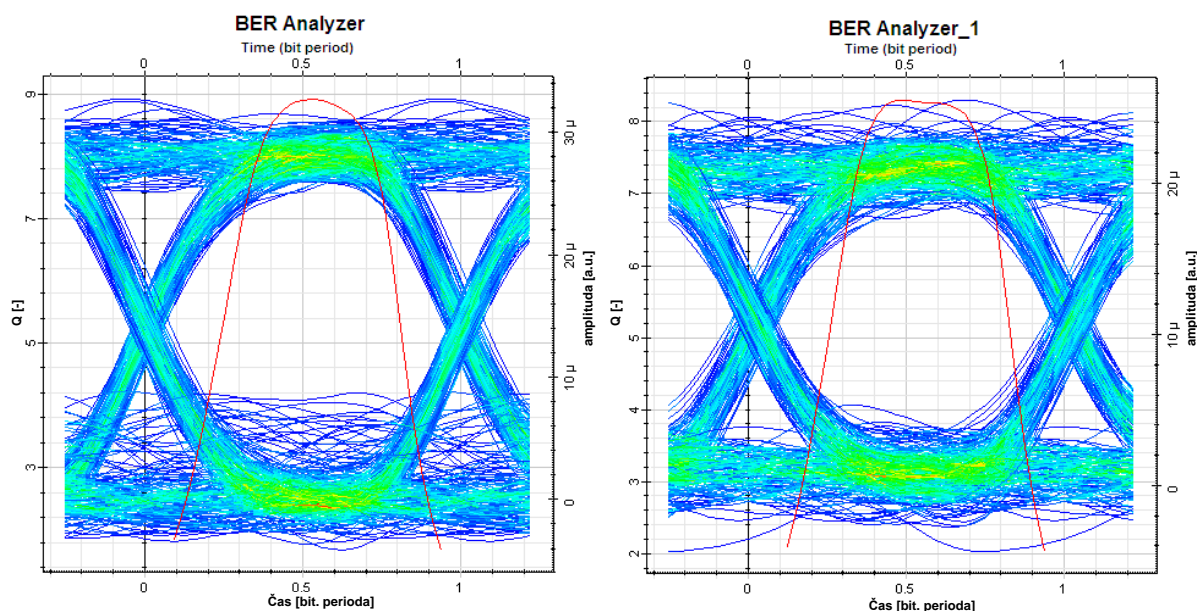
7.2.3. Zjištění časového průběhu signálu



Obr. 7.5: Časový průběh signálu.

Na předchozím obrázku jsou patrné změny, kterými působí přenosová média v cestě signálu k jeho cíli (zpoždění, zkreslení a útlum přenášeného signálu). Jsou změřeny pomocí dvojice optických časových zobrazovacích jednotek OTDV a OTDV_2.

7.2.4. Měření chybovosti přenosové trasy



Max Q faktor: 8,964 [-].
Min BER: $1,561 \cdot 10^{-19}$ [-].

Max Q faktor: 11,352 [-].
Min BER: $3,594 \cdot 10^{-30}$ [-].

Obr. 7.6: Diagram oka rozhodnutí po příjmu na ONU (vlevo), na příjmu OLT (vpravo).

Zhodnocení chybovosti trasy je provedeno v další textu práce v rámci zhodnocení simulace.

7.3. Zhodnocení simulace

Výkon na trase byl měřen za prvky, od nichž bylo očekáváno zanesení útlumu do trasy. S ohledem na předpokládanou útlumovou bilanci trasy a její kalkulaci provedenou v podkapitole 6.6 můžeme prohlásit, že výstup ze simulace se přibližuje očekávaným hodnotám. U pasivní odbočnice 1:2 jsou mírně nižší (3,81 dB oproti 3,9 dB) stejně jako u rozbočovače 1:16 (hodnota v simulaci 12,84 dB vůči 14,1 v naší kalkulaci). Útlumy odbočnic se liší díky jeho výpočtu softwarem, který automaticky dopočítává útlum všech prvků, přestože jej lze manuálně vložit. Tato korekce byla použita pouze pro mírné upravení výsledných hodnot útlumu jednotlivých prvků.

Vzhledem k teoretickým předpokladům se útlum na trase měnil v jejím průběhu, jelikož závisí na počtu a typu jednotlivých součástí trasy – tj. délce a koeficientu útlumu vlákna, počtu konektorů, spojek, svárů. Markantní je zejména dopad pasivních odbočnic, u nichž významným způsobem záleží poměru dělení do jednotlivých směrů, které provádějí.

Měření chybovosti ukázalo, že oko rozhodnutí je zkreslené, což je způsobeno přítomností pasivních součástí v cestě, jejich vložitelným útlumem a přenosovou charakteristikou optických vláken v cestě (zejména disperzní vlivy a veškeré nelinearity vlákna). Další vliv na výsledný průběh diagramu oka mají tepelné a jiné šумы, v simulaci pak především tepelný šum fotodetektorů na přijímacích stranách. Požadovaná chybovost v datových sítích se pohybuje od 10^{-9} po 10^{-12} [6]. Z naměřených údajů lze vyvodit závěr, že námi navrhovaná síť splňuje požadavky chybovosti a pro datové přenosy by měla být zcela vyhovující.

Vlastním nastavením výkonových úrovní a dělicích poměrů, délek vláken a parametrů sítě jsme ověřili, že plánovaná přístupová síť OAN Žlutý kopec – Preslova je připravena na provoz rychlostí 2,5 Gbit/s standardem GPON.

Simulace programem OptiSystem je hodnotná z pohledu množství nastavitelných faktorů a možností vyzkoušet si budoucí chování sítě před jejím vlastním vybudováním a uvedením do provozu. Software se zaměřuje na fyzickou vrstvu sítě, což pro návrh moderní sítě nemusí být dostačující, protože nezahrnuje a není možné v něm simulovat funkci a fungování dalších služeb. Z tohoto důvodu mimo jiné nezískáme představu o budoucím provozu na lince vzhledem k provozu náročných služeb přenosu televizního signálu a přenosu hlasu VoIP. Absencí přenosu služeb linkou se nedozvíme nic o zatížení linek a aktivních prvků, neodhalíme úzká místa sítě, která by mohla být zatěžována nadměrným provozem.

Protiváhou komplexnosti simulačního prostředí fyzické vrstvy je vysoká náročnost a dlouhá doba výpočtů, která velmi rychle vstupuje s nárůstem velikosti sítě a znemožňuje tak práci v reálném čase. U velkých sítí nastává s každou úpravou testované sítě značná prodleva před přípravou výsledků simulace.

Uváděny jsou výsledky simulací pouze pro větev A. Opodstatněním pro tento krok je fakt, že u větve B dojde vzhledem k delšímu mezilehlému vláknu k odpovídajícímu nárůstu útlumu trasy, ale ostatní přenosové vlastnosti systému zůstávají řádově stejné (ověřeno uskutečněním druhé simulace s parametry sítě ve větvi B), a proto není nutné je zde uvádět a opakovat podobné výsledky měření a závěry z nich vyplývající. Obě simulace jsou uloženy na příloženém kompaktním disku.

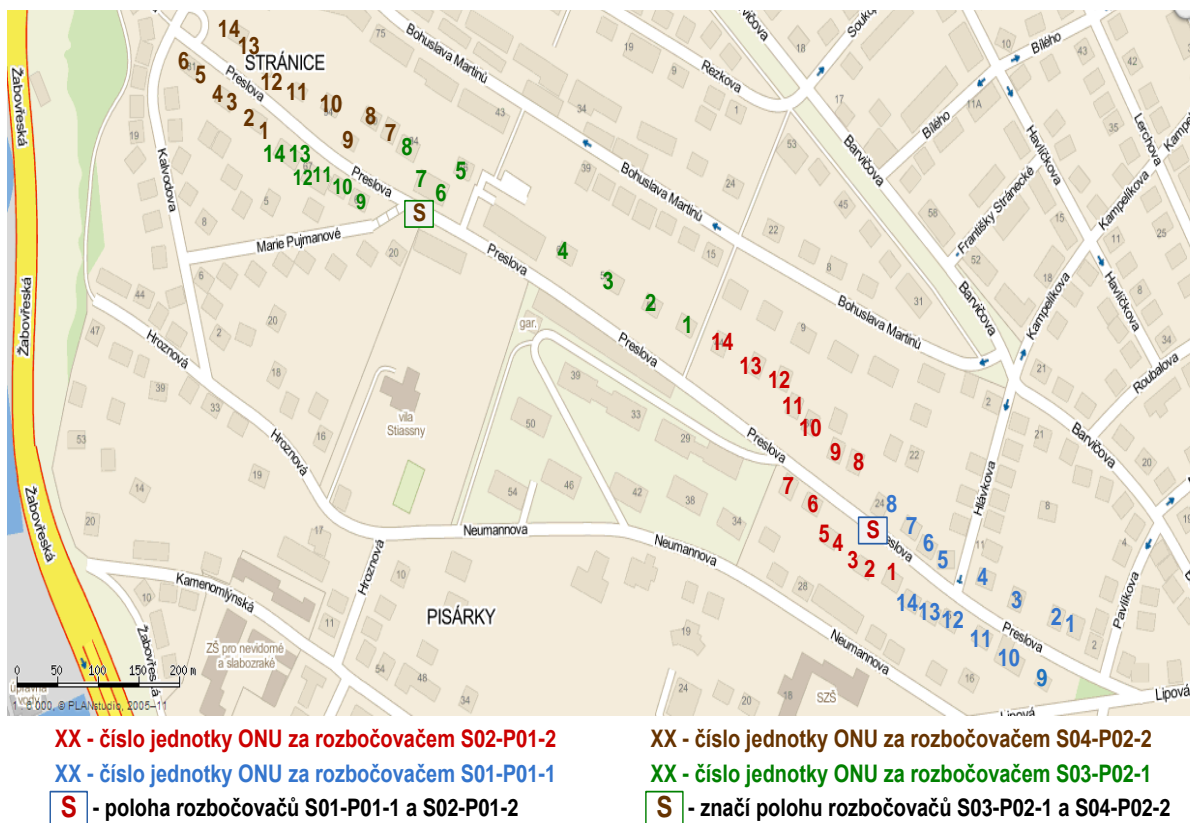
8. Dokumentace projektu

V kapitole 6 jsou uvedeny základní informace týkající se zaměření projektu, popisu lokality, použitých technologií a předpokládaná útlumová bilance optické přístupové sítě. V této části se zaměříme detailně na konkrétní rozvržení sítě, rozkreslení jejích částí technologické detaily výstavby a provozu sítě. Tento úsek práce si klade za cíl vytvoření podkladů potřebných k faktické realizaci sítě včetně nezbytných podrobností jednotlivých prvků a zařízení instalovaných v síti. Veškeré následující informace a skutečnosti vycházejí z návrhu sítě uvedeným ve výše zmíněné kapitole, kterou tak převážně doplňují a zpřesňují.

8.1. Realizace připojení přípojek FTTH

V souladu s předchozím textem uvedme shrnutí návrhu sítě. Optická síť bude realizována jako pasivní dle standardu GPON v nesymetrické variantě 2,5 Gbit/s ve směru sestupném a 1,25 Gbit/s ve směru vzestupném. Tímto bude zákazníkům nabízena přenosová rychlost asymetricky 80/40 Mbit/s (sestupný/vzestupný směr). Reálná rychlost je nižší, nabízená rychlost byla pro přehlednost zaokrouhlena na celé desítky. Poskytovaná rychlost je dostatečná pro nasazení služeb Triple Play.

Následující obr. 8.1 znázorňuje rozmístění jednotlivých jednotek ONU, které jsou pro přehlednost barevně odlišeny. Každý optický rozbočovač je označen jinou barvou, která odpovídá barvě k němu připojených očíslovaných jednotek ONU. Červené a modré prvky odpovídají větví A, zelené a hnědé pak větví B. Čísla korespondují s ID jednotek ONU, více v dalším textu a příloze C. Rozbočovače jsou umístěny po dvojicích na pozicích písmen S.



Obr. 8.1: Situační schéma rozložení jednotek ONU. [34]

8.2. Zavedení a popis trasy

Z centrálního bodu sítě ÚVT MU je přívodním kabelem na Žlutý kopec přiveden svazek vláken, z nichž dvě budou začleněna do projektované sítě. Vlákna jsou ukončena v technologická místnosti MOÚ Žlutý kopec. Zde dojde k připojení optické odbočnice 1:2 následované přívodními vlákny. Tato vlákna ve dvou mikrokabelech pro připojení přední a zadní části ulice Preslova budou zafouknuta do dvou mikrotrubiček 7/5,5 mm. Tyto mikrotrubičky se zavedou do již položené HDPE trubky jdoucí ulicí Tvrdého směrem k Lipové ulici viz obr. 6.2. Tím dojde ke snížení nákladů na zemní práce, které se zmenší o 400 metrů z celkové délky 700 metrů v případě mezilehlého vlákna. Na křížení ulic Lipové s Preslovou budou z HDPE chráničky vybočeny vodotěsnou spojkou Y a budou dále pokračovat HDPE trubkou 40/33 mm k sloupkovému rozvaděči ORM 16 SIS. Společně s rozvaděčem bude v úložném prostoru ponechána rezerva 15 m. Tato nově budovaná část sítě, stejně jako ostatní její sektory, bude umístěna v hloubce 75 cm a ulicí Preslovou bude probíhat na vnitřní straně chodníku. V případě nutnosti přechodu vozovky (celkem třikrát – u č. p. 24; 46 a 61) jsou zvažovány dvě alternativy – provedení řízeného protlaku pod vozovkou (čímž by nedošlo k omezení provozu v Preslově ulici) nebo klasická technologie instalace. Rozhodnutí o konkrétní variantě bude záležet na cenové náročnosti řešení a dohodě s vlastníkem komunikace. [30]

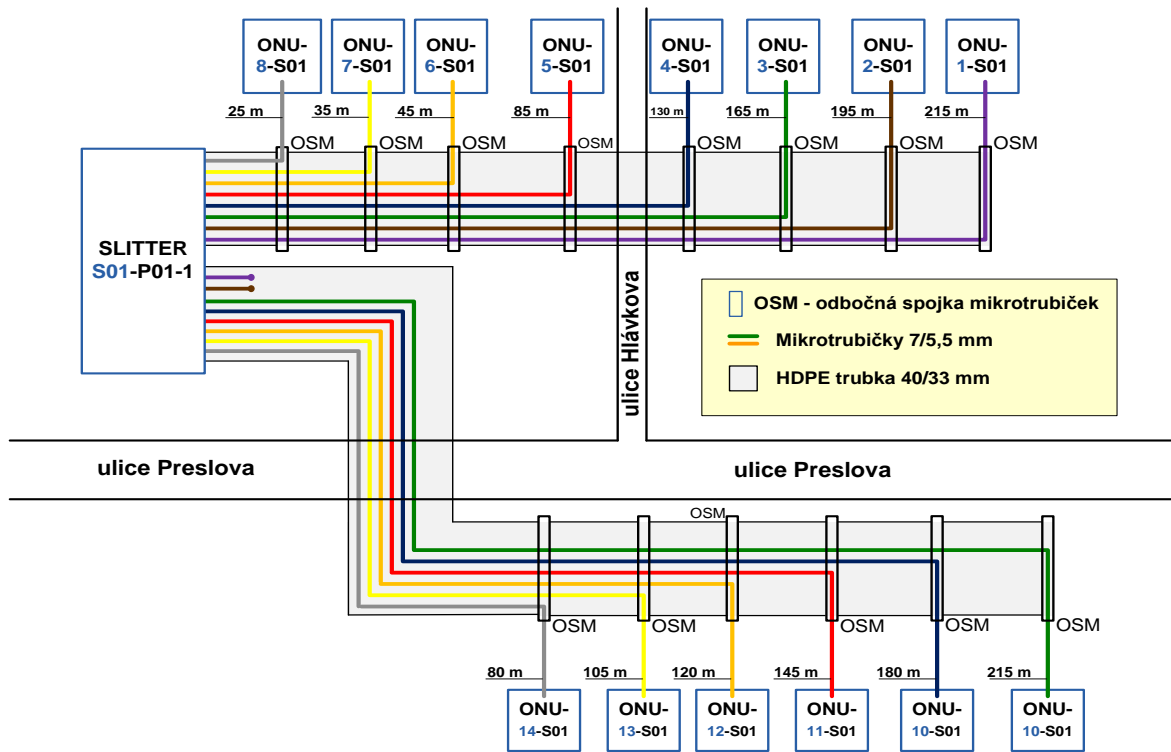
Z venkovních optických rozvaděčů u č. p. 24 a 46 (po dvou rozvaděčích 1:16) budou v HDPE trubkách 40/33 mm vedeny daný směry mikrotrubičky 7/5,5 mm. V každé HDPE trubce bude zafouknut svazek 10 mikrotrubiček s výše uvedeným průměrem, do nichž se následně uloží optický mikrokabel Prysmian s 6 jednovidovými vlákny G.652.D, z nichž jedno bude aktivně připojeno na optický rozbočovač, jedno bude plnit funkci záložního a ostatní slouží jako rezervní vlákna. [35]

Vláknové rozbočovače od 1:16 budou konektorované – opatřeny konektory SC, čímž získáme možnost měření, řešení problémů, případně snadné rekonfigurace sítě a jejího uspořádání. S útlumem konektorů je počínáno v kalkulaci útlumové bilance (podkapitole 6.6), kde je již zahrnut v hodnotě útlumu pasivních rozbočovačů.

Mikrotrubičky budou vedeny průběžně HDPE chráničkou a ke každému objektu bude vybočena jedna z nich pomocí vodotěsné T-Matrix spojky, která umožní odbočení jedné mikrotrubičky a spojení průběžných HDPE trubek přenášejících ostatní mikrotrubičky. K jednotlivým domům budou přivedeny samostatné mikrotrubičky shodnými trubkami jako celé trase. [24], [25]

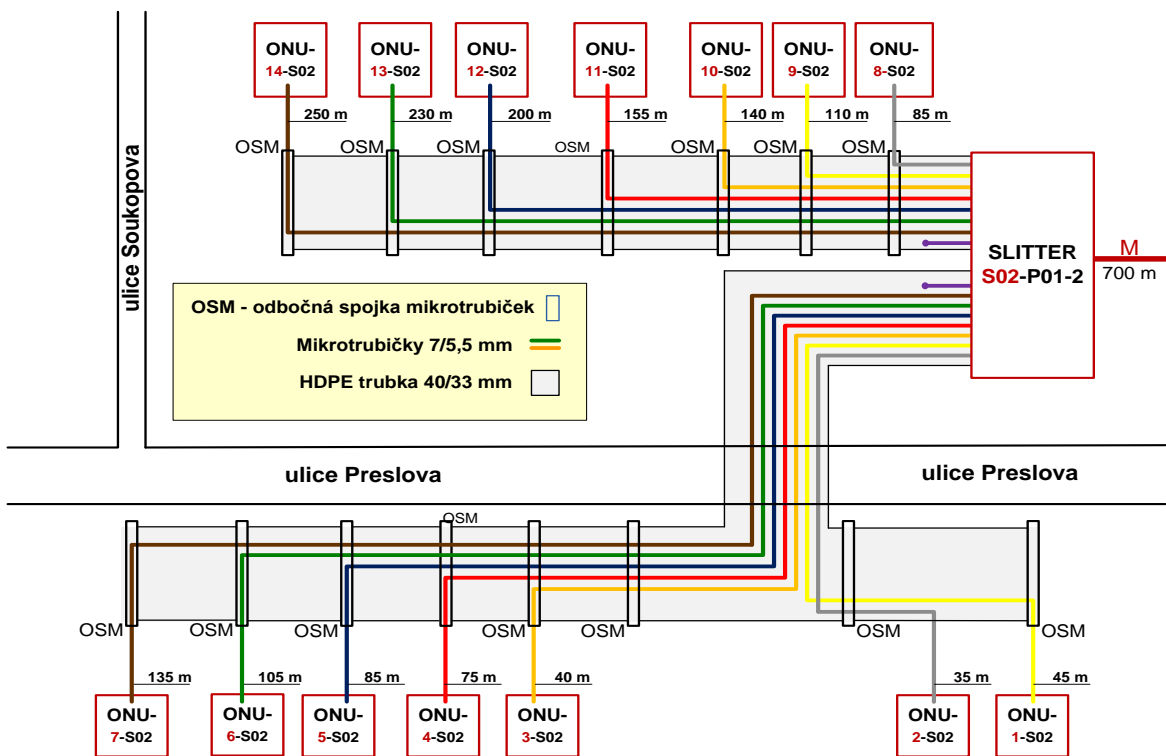
Mikrotrubičky budou vyhotoveny v odlišných barvách s připojenou popiskou, tak aby nedošlo k jejich záměně. Vzhledem k nabízené barevné škále jsou zvoleny odstíny, které jsou od sebe navzájem snáze odlišitelné. Veškeré v zemi položené HDPE chráničky budou opatřeny výstražnou folií oranžové barvy se jménem investora sítě.

Znázornění vedení mikrotrubiček je pro přední část větve A zachyceno na obr. 8.2 pro zadní část na obr. 8.3. Vyobrazení informuje o ID číslech jednotek ONU (v souladu s obr. 8.1), dále je možné z něj vyčíst konkrétní délku přípojných mikrokabelů, resp. mikrotrubiček, v nichž jsou uloženy (včetně rozměru). Zároveň schematicky ukazuje polohu v rámci ulice Preslovy.



Obr. 8.2: Vedení mikrotrubiček a HDPE chrániček v přední části větve A.

Zakreslení vedení mikrotrubiček v zadní části větve A je na obr. 8.3 níže.



Obr. 8.3: Vedení mikrotrubiček a HDPE chrániček v zadní části větve A.

Poznámka: Rozkreslení mikrotrubiček pro větev B je uvedeno v příloze D.

Optické mikrotrubičky budou zakončeny buď zvenčí na stěně objektu v ORM 4 rozvaděči a optickým kabelem připojeny k ONU nebo dojde přívodu mikrokabelu skrze těsnící element přímo do budovy a zakončení v FTTH zásuvce. Venkovní ukončení má výhodu v možnosti přístupu pracovníků vlastníka sítě bez nutnosti přítomnosti majitele objektu, ale přináší zvýšené nároky na ukončovací prvek a propojení skrze obvodové zdi do budovy. V případě instalace uvnitř budovy se nepřístupí k navaření pigtailu, ale použije se mechanická optická spojka Fibrlok s vyšším útlumem 0,1 dB (přijatelné zvýšení hodnoty útlumu vzhledem k rychlosti a snadnosti nasazení spojky). [36]

8.3. Nasazená technologie

V centrálním bodě sítě na ulici Botanická 7 bude instalováno zařízení společnosti Alcatel-Lucent – FTTU ISAM 7342. Jedná se o robustní a komplexní zařízení podporující snadnou rozšiřitelnost pomocí modul, čímž zvyšuje svou škálovatelnost a flexibilitu. Zařízení pracuje na technologii GPON s přenosovými rychlostmi 2,488/1,25 Gbit/s ve směru sestupném/vzestupném. Sestupný směr je přenášen na námi zvolené vlnové délce 1490 nm, vzestupný směr je řešen pomocí vlnové délky 1310 nm. V základní nabídce jsou zahrnuty služby Triple Play (data, video, hlas) v digitální podobě. Přídavným modulem V-OLT je možné přenášet televizní rádio-frekvenční (RF) signál na vlnové délce 1550 nm. Každá PON linková karta, kterými je jednotka OLT modulárně osazována obsahuje čtyřportovou kartu osazenou konektory typu SC. Ke každému portu je umožněno připojit rozbočovače s dělením 1:64, z čehož vyplývá celkový počet 256 připojitelných jednotek ONU na jednu zásuvnou kartu. Je možné zakoupit karty podporující i vyšší rozbočovací poměr (1:128). Celkově je zařízení rozšiřitelné 16 kartami k podpoře až 4096 optických síťových jednotek. Citlivost jednotky je v rozsahu 28 dB (až do třídy GPON B+). [37]

Přenosový protokol je typu GPON zapouzdřovací protokol používaný k přenosu provozu IP/Ethernet a jeho služeb. Jednotky umožňují šifrování datových toků pomocí šifrovacího algoritmu AES (Advanced Encryption Standard) v obou směrech. Dále je začleněna dopředná chybová korekce (FEC – Forward Error Correction). Pro podporu VoIP je používán protokol SIP (Session Initiation Protocol).

V domech zákazníků budou jednotky ONU řešeny pomocí zařízení Alcatel-Lucent 7342 O-Series, které jim umožní bezproblémový přenos nejen vysokorychlostního internetu, ale zejména pak internetové televize ve vysokém rozlišení a hlasových služeb přenášených digitálními datovými sítěmi. Jednotka ONU je opatřena 2 porty Ethernetu 100/1000 Mbit/s (RJ-45). K připojení telefonů podporujících VoIP služby slouží až 4 RJ-11 porty. Doplnkově bude vybavena portem pro příjem RF video rozhraním.

Všechny prvky na trase, resp. zařízení, jednotlivá přípojná, mezilehlá a přívodní vlákna budou opatřeny konektory SC/APC, které jsou podporovány jak jednotlivými zařízeními ONU, tak jednotkami OLT, navíc jsou kompatibilní pro instalaci v optických rozvaděčích firmy Micos, které budou umístěny v pasivní části trasy.

Optické jednotky na obou stranách sítě jsou kompatibilní se standardy ITU-T pro vzdálenou správu ONT skrze rozhraní kontroly a správy – OMCI (Operation Maintenance Control Interface).

Při zavádění optických mikrokabelů je počítáno s rezervou délky 15 metrů. Přehled použitého materiálu a jednotlivých součástí sítě, jejich počtu, popřípadě délky udává tab. 8.1. [36], [38], [39]

Tab. 8.1: Přehled použitých součástí optické přístupové sítě OAN Žlutý kopec – Preslova.

Počet	Název	Výrobce	Typ	Doplňující informace
CO - centrální bod sítě				
1	Optické linkové zakončení (OLT)	Alcatel-Lucent	7342-ISAM	GPON OLT 2,5/1,25 Gbit/s
2	Pigtail k OLT	H+S	HAZDAB-1M0	SM 9/125, E2000/UPC 1 m
Pasivní část sítě				
7735	Tenkostěnné mikrotrubičky	Sitel	různé barvy	průměr 7/5,5 mm
8575	Mikrokabel	Prysmian	ZEPHYRD6E9	SM 9/125; 6 vláken; 2,2 mm
1	Y spojka	Sitel	vodotěsná	odbočení mezilehlých vl.
2	Primární rozbočovač 1:2	SQS	1x2 PLC splitter HDB	konektory SC/APC
4	Sekundární rozbočovač 1:16	SQS	1x16 PLC splitter HDB	konektory SC/APC
6	Pigtail do/z prim. rozbočovače (2x1/2x2)	H+S	HIZDAB-1M0	SM 9/125, SC/APC 1 m
68	Pigtail do/z sek. rozbočovače (4x1/4x16)	H+S	HBZDAB-1M0	SM 9/125, SC/APC 1 m
56	Optická spojka	Sitel	T-Matrix	rozbočení 40/40/40 mm
4	Optický rozvaděč ORM 16	Micos	8588.70//0000F	box na sekundární rozv.
2	Optický sloupkový rozvaděč ORM 16 SIS	Micos	8588.90/0000F	uložení boxu
ONU				
64	ORM 4 nástěnný rozvaděč	Micos	8520.00/0000NBQ0125P	ukončení mikrotrubičky
64	Těsnící element s vymezořovačem ohybu	OFA	600008270	vstup trubky do objektu
64	Držák svárů	Micos	491481/491527	uchycení až svárů/spojek
64	Spojka FIBRLOK	3M	Fibrlok II 2529	mechanický spoj pigtailů
64	Cívka na rezervy kabelů	Micos		uložení rezerv kabelů
64	Zakončení mikrotrubiček	Sitel	průhledné s pojistkou	průměr 7 mm
64	ONU jednotka	Alcatel-Lucent	O-421/I-421	domácí brána zákazníků
64	Pigtail k ONU	H+S	HIZDAB-1M0	SM 9/125, SC/APC 1 m

Závěr

Kontinuální vývoj optických sítí přinesl v průběhu desetiletí mnoho změn, které jsme se snažili v úvodní kapitole vystihnout. Popis těchto změn je podstatný, protože ukazuje jakým směrem a jakou rychlostí se bude vývoj přístupových sítí dále ubírat. Podrobnější pohled na členění přístupových sítí, přiblížení jejich nejdůležitějších vlastností a potenciálních možností nám vytváří prostor pro zhodnocení, jakou orientaci a řešení bychom měli při návrhu optické přístupové sítě zvolit, aby byla tato síť provozu a konkurence schopná nejen po jejím zbudování, ale i v průběhu následujících let či v určitém časovém horizontu.

Toho lze dosáhnout podrobnou analýzou dat naměřených na stávající metropolitní trase a následnou selekcí odpovídajících přenosových technologií v navazující přístupové síti. K tomuto účelu jsou v práci rozebírány typické topologie přístupových sítí a jejich standardizace. Podrobným rozбором se věnujeme charakteristickým vlastnostem přístupových sítí jako celku, rovněž i elementárním prvkům sítě, které dle zjištěných informací zásadním způsobem ovlivňují potenciál celého přenosového systému a značně limitují jeho schopnosti vysokokapacitních přenosů v podobě omezení jeho rychlosti a překlenutelné vzdálenosti přenášených dat.

Výstupem této činnosti je shrnutí, že je možné využít současná instalovaná vlákna pro systémy se šířkou pásma 10 Gbit/s a výhledově nasazení vyšších přenosových rychlostí, čímž získáme prostor pro budoucí rozšíření sítě či zkvalitnění služeb s ohledem na požadavky zákazníků v námi zvolené lokalitě.

Diplomová práce se věnovala rozboru návrhu optické sítě a okolnostem, které jej ovlivňují. Mimo jiné působením jednotlivých parametrů sítě na přenos dat a jeho rychlost. Dále byla vyhodnocena lokalita, pro niž bylo následně detailně navrženo vlastní řešení přístupu zákazníků k datovým a multimediálním službám poskytovatele.

Diplomová práce se věnuje vlastnímu návrhu přístupové sítě, včetně její simulace a otestování pomocí programu OptiSystem od společnosti Optiwave Inc. Vzhledem k charakteru simulačního prostředí bylo provedeno ověření provozu fyzické vrstvy a vhodnosti návrhu parametrů jednotlivých prvků sítě. Simulací bylo prokázáno, že navržený přenosový systém je schopen provozu ve standardu pasivní optické sítě GPON třídy B s přenosovými rychlostmi 2,5 Gbit/s ve vzestupném směru respektive 1,25 Gbit/s v sestupném směru. Souběžně s analýzou lokality a provedením předběžného návrhu jsme se dále věnovali popisu fyzické výstavby sítě a její realizace s ohledem na efektivitu vložených nákladů. Došlo k výběru technologického řešení optické přístupové sítě pro lokalitu Žlutý kopec – Preslova, jejímu zakreslení do mapových podkladů a naplánování rozvržení elementárních prvků sítě. Diplomová práce poté hlouběji konkretizuje elementy použité na fyzické vrstvě, jejich propojení a technologii výstavby celé sítě až do jejího uvedení do provozu. Přináší podrobný popis optické trasy, v ní začleněných prvků a postupu instalace optické přístupové sítě včetně soupisu k tomu potřebných prvků.

Síť je navržena s důrazem na co nejjednodušší způsob výstavby a efektivnost využití instalovaných prvků na trase s možností rozšíření a dalšího zkvalitnění sítě do budoucna. Zároveň je plánována tak, aby byly sníženy náklady na její provoz, ale v případě nutnosti zásahu do uspořádání sítě byl usnadněn přístup k jednotlivým prvkům pro možnost potřeby rekonfigurace topologie či entit trasy. S ohledem na použití pokročilých optických jednotek je umožněna vzdálená správa a dohled jednotlivých prvků zařízení na trase včetně možnosti změny jejich nastavení dle aktuálního stavu a potřeb sítě, mimo jiné skrze webové rozhraní.

Diplomová práce obsahuje kompletní dokumentaci navrhované sítě potřebnou k získání detailních informací o vedení kabelů a mikrotrubiček, jednotlivých zařízeních a jejich uložení, nezbytnou pro vybudování optické přístupové sítě. V průběhu výstavby a po jejím dokončení je doporučeno provést měření vlastností optické přístupové sítě pro ověření kvality a správnosti instalace jednotlivých prvků s orientací na měření vložného útlumu, útlumu odrazu a délky jednotlivých částí a tras sítě. Samotný popis monitoringu a měření je nad rámec práce vymezeného jejím zadáním práce, a proto v ní není zahrnut.

Seznam literatury

- [1] KAPOUN, Vladimír. *Přístupové a transportní sítě*. 1.vydání. Brno: VUT FEI Ústav telekomunikací v Brně, 1999. 77 s. ISBN 80-214-1465.
- [2] PUŽMANOVÁ, Rita. *Moderní komunikační sítě od A do Z*. 2. aktualizované vydání. Brno: Computer Press, a.s., 2006. 430 s. ISBN 80-251-1278-0.
- [3] ŠKORPIL, Vladislav – KAPOUN, Vladimír. *Přístupové a transportní sítě*. Brno: VUT Brno, 2002. 160 s. ISBN TKO018.
- [4] VODRÁŽKA, Jiří. *Přenosové systémy v přístupové síti*. 2. vydání, prep. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. 189 s. ISBN 80-01-03386-4.
- [5] ŠEBESTA, Vladimír. *Teorie sdělování*. Brno: VUTIUM, 2001. 92 s. ISBN 80-214-1843-5.
- [6] PUŽMANOVÁ, Rita. *Širokopásmový Internet: Přístupové a domácí sítě*. 1. vydání. Brno: Computer Press, 2004. 377 s. ISBN 80-251-0139-8.
- [7] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: Miloslav Filka, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [8] BOHÁČ, Leoš – LUCKI, Michal. *Optické komunikační systémy*. 1. vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010 165 s. ISBN 978-80-01-04484-1.
- [9] LAFATA, Pavel – VODRÁŽKA, Jiří. Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online] 26. 7. 2009 [cit. 10-21-2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/soucasne-a-budouci-varianty-pasivnich-optickych-pristupovych-siti>>. ISSN 1213-1539.
- [10] PAROLEK, Martin – PUDIL, Roman – RYBÁŘ, Bedřich. FTTx. *Telekomunikace & ICT*. 2007, roč. 44, č. 4, s. 11-15. ISSN 0040-2591.
- [11] VODRÁŽKA, Jiří. Optické přístupové sítě EPON a CWDM. *Access server* [online] 27. 7. 2005 [cit. 28-10-2010]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=opticke-pristupove-site-epon-a-cwmdm&cisloclanku=2005070401>>. ISSN 1214-9675.
- [12] LAFATA, Pavel – VODRÁŽKA, Jiří. Pasivní optická síť GPON. *Access server* [online] 23. 5. 2009 [cit. 11-17-2010]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticka-sit-gpon&cisloclanku=2009050002>>. ISSN 1214-9675.
- [13] LAFATA, Pavel. Pasivní optická přístupová síť EPON. *Access server* [online] 23. 5 2009 [cit. 11-11 -2010]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticka-pristupova-sit-epon&cisloclanku=2009050003>>. ISSN 1214-9675.
- [14] LAFATA, Pavel. Pasivní optické sítě s rychlostí 10 Gbit/s. *Access server* [online] 10. 03. 2011 [cit. 03-27-2011]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-s-rychlosti-10-gbits&cisloclanku=2011030001>>. ISSN 1214-9675.

- [15] LAFATA, Pavel. Pasivní optické sítě WDM-PON. *Access server* [online] 24. 05 2009. [cit. 04-13-2011]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-wdm-pon&cisloclanku=2009050004>>. ISSN 1214-9675.
- [16] VODRÁŽKA, Jiří. Základy FTTx. *Access server* [online] 22. 5 2006 [cit. 11-23-2010]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=zaklady-fttx&cisloclanku=2006051702>>. ISSN 1214-9675.
- [17] LAFATA, Pavel – VODRÁŽKA, Jiří. Rozvoj přípojek FTTx. *Elektrorevue* [online] 31. 3. 2010 [cit. 03-12-2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/rozvoj-pripojek-fttx/>>. ISSN 1213-1539.
- [18] DOSTÁL Otto – FILKA Miloslav. Brněnská akademická počítačová síť - vývoj, využití a perspektivy. In *Proceedings of the 36th conference on Measurement and maintenance of the telecommunications cables, České Budějovice*. [online] 2006 [cit. 11-27-2010]. Dostupné z WWW: <http://www.ufe.cz/events/cablex2006/sbornik/08_Filka_BAPS.pdf>.
- [19] DUBSKÝ, Pavel – KUCHARSKI, Maciej. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha: MIKROKOM, 1994. 132 s.
- [20] TEJKAL Vladimír – FILKA Miloslav – REICHERT Pavel – ŠPORIK Jan. Měření pasivních optických sítí. *Elektrorevue* [online] 4. 3. 2010 [cit. 10-30-2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/mereni-pasivnich-optickych-siti/>>. ISSN 1213-1539.
- [21] REICHERT Pavel – FILKA Miloslav – TEJKAL Vladimír – ŠPORIK Jan. Měření optických přenosových parametrů brněnské akademické počítačové sítě. *Elektrorevue*. [online] 31. 8. 2010 [cit. 11-11-2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/mereni-optickych-prenosovych-parametru-brnenske-akademicke-pocitacove-site/>>. ISSN 1213-1539.
- [22] KYSELÁK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy*. CSc. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Miloslav Filka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 110 s..
- [23] KŘEPELKA, Václav. Podrobný pohled na investice do FTTH sítí. *Telekomunikace & ICT*. 2009, roč. 46, č. 4, s. 10-13. ISSN 0040-2591.
- [24] SITEL, spol. s.r.o. *Mikrotrubičkování s optickými mikrokabely* [online] 2003 [cit. 03-14-2011]. Dostupné z WWW: <http://www.sitel.cz/prod_ost_sluzby2_podkat.php?podkat=1&jazid=-3&jazyk=cz>.
- [25] SITEL, spol. s.r.o. *HDPE trubky pro ochranu kabelů standardní* [online] 2003 [cit. 03-21-2011]. Dostupné z WWW: <http://www.sitel.cz/prod_vyrob2.php?jazid=7&gid=8>.
- [26] SITEL, spol. s.r.o. *Multikanály* [online] 07. 04. 2010 [cit. 03-17-2011]. Dostupné z WWW: <http://www.sitel.cz/public/upload/other/Multikanaly_2010pdf>.

- [27] SITEL, spol. s.r.o. *Mikrotrubičkování* [online] 2005 [cit. 03-07-2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.mikrotrubickovani.cz>>.
- [28] SITEL, spol. s.r.o. *Systém MCS-ROAD* [online] 2005 [cit. 03-15-2011]. Dostupné z WWW: <http://www.sitel.cz/prod_ost_sluzby2_podkat.php?podkat=3&jazid=-3&jazyk=cz>.
- [29] SCHLITTER, Pavel. Mikrokabelážní systémy. *Access server* [online] 28. 07. 2004 [cit. 02-24-2011]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=mikrokabelazni-systemy&cisloclanku=2004072806>>. ISSN 1214-9675
- [30] MICOS, s.r.o. Řešení pro optické a metalické sítě. *Micos divize TELCOM* [online] 28. 04 2011 [cit. 05-15-2011]. Dostupné z WWW: <<http://telcom.micos.cz/>>.
- [31] Google Inc. Preslova, Brno - Mapy Google. *Mapy Google* [online] 2010 [cit. 12-12-2010] Dostupné z WWW: <<http://maps.google.com>>.
- [32] Český úřad zeměměřický a katastrální. Publikace dat ISKN. *Nahlížení do KN* [online] 26. 10 2010 [cit. 11-25-2010]. Dostupné z WWW: <<http://nahlizeniidokn.cuzk.cz/>>.
- [33] LAFATA, Pavel. Útlumová bilance pasivních optických přístupových sítí. *Access server* [online] 26. 06. 2009 [cit. 04-19-2011]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=utlumova-bilance-pasivnich-opticky-ch-pristupovych-siti&cisloclanku=2009060002>>. ISSN 1214-9675.
- [34] Seznam.cz, a.s. *Mapy.cz.* [online] PLANStudio, 2011 [cit. 05-21-2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.mapy.cz/#x=16.579688&y=49.196516&z=15&c=2-8-3-15-14-x>>.
- [35] Prismian, S.p.A. *Prismian Cable & Systems* [online] 17. 05 2011 [cit. 05-23-2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.prysmian.com>>.
- [36] 3M. Elektrotechnický a elektronický průmysl a telekomunikace. *3M - Česká republika* [online] 03. 05. 2011 [cit. 05-06-2011]. Dostupné z WWW: <http://solutions.3mcesko.cz/wps/portal/3M/cs_CZ>.
- [37] Alcatel-Lucent. *Product A-Z listing* [online] 2011 [cit. 05-22-2011] Dostupné z WWW: <<http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/Products/productsaz#tabAnchor2>>.
- [38] SQS Vláknová optika a.s. PLC Splitters. *SQS Vláknová optika* [online] 12. 11. 2008. [cit. 05-18-2011]. Dostupné z WWW: <http://www.sqs-fiber.cz/new_htm/passive_components.htm>.
- [39] OFA - Optical Fiber Apparatus, s.r.o. Katalog pasivních produktů. *Stránky OFA - Optical Fiber Apparatus* [online] 02. 02. 2005 [cit. 05-19-2011]. Dostupné z WWW: <http://www.ofacom.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=48>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

AES	...	Advanced Encryption Standard – kryptografický šifrovací standard
AON	...	Active Optical Network – aktivní optické přístupové sítě
APON	...	ATM-based Passive Optical Network – pasivní optická síť na bázi ATM
ATM	...	Asynchronous Transfer Mode – asynchronní transportní mód
AWG	...	Arrayed Waveguide Grating – vlnovod uspořádaný do mřížky
BAPS	...	Brněnská akademická počítačová síť
BPON	...	Broadband Passive Optical Network – širokopásmová pasivní optická síť
CAPEX	...	Capital Expenditure – kapitálové náklady
CO	...	Central Office – centrální bod připojení
CWDM	...	Coarse Wavelength Division Multiplexing – hrubě vlnově dělený multiplex
DSLAM	...	Digital Subscriber Line Access Multiplexer – digitální multiplexor
DWA	...	Dynamic Wavelength Assignment – dynamické přidělování vlnové délky
DWDM	...	Dense Wavelength Division Multiplexing – hustě vlnově dělený multiplex
EPON	...	Ethernet-based Passive Optical Network – pasivní optická síť na bázi Ethernetu
EFM	...	Ethernet in the First Mile – Ethernet v první míli
FDM	...	Frequency Division Multiplexing – frekvenčně dělený multiplex
FEC	...	Forward Error Correction – dopředná chybová korekce
FTTB	...	Fiber to the Building – vlákno „do budovy“
FTTC	...	Fiber to the Curb – vlákno „k hraně chodníku“
FTTCab	...	Fiber to the Cabinet – vlákno „do kabinetu“
FTTEx	...	Fiber to the Exchange – vlákno do „výměníku“
FTTH	...	Fiber to the Home – vlákno „do domu“
FTTN	...	Fiber to the Node – vlákno „do uzlu“
FTTO	...	Fiber to the Office – vlákno „do kanceláře“
FTTP	...	Fiber to the Premises – vlákno „do provozovny“
FTTx	...	Fiber to the X – koncepce optických přípojek
FSO	...	Free Space Optics – optický přenos volným prostorem
GFC	...	Generic Framing Protocol – generický protokol pro tvorbu rámců
GEM	...	GPON Encapsulation Method – zapouzdřovací metoda v GPON sítích
GPON	...	Gigabit-capable Passive Optical Network – gigabitová pasivní optická síť
HDPE	...	High-Density Polyethylen – polyethylenový materiál s vysokou hustotou
IEEE	...	Institute of Electrical and Electronic Engineers – Institut pro elektrické a elektrotechnické inženýrství
IEC	...	International Electrotechnical Commission – Mezinárodní elektrotechnická komise
IL	...	Insertion Loss – vložený útlum
IP	...	Internet Protocol – internet protokol
IPC	...	Association Connecting Electronic Industries – Asociace sdružující elektronický průmysl
IPTV	...	Internet Protocol Television – digitální televize přenášená IP protokolem
IrDA	...	Infrared Data Access – infračervený port

ISDN	...	Integrated Services Digital Network – digitální síť integrovaných služeb
ISO	...	International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro standardizaci
ITU-T	...	International Telecommunication Union – Telecommunication standardization sector – Mezinárodní telekomunikační unie, telekomunikační standardizační sektor
MU	...	Masarykova univerzita
MOÚ	...	Masarykův onkologický ústav
MCS	...	Micro Cabling Systems – mikrokabelážní systémy
NRZ	...	Non Return to Zero Level – linkový kód bez návratu k nule
NT	...	Network Termination – zakončení sítě
OAN	...	Optical Access Network – optická přístupová síť
OLT	...	Optical Line Termination – optické linkové zakončení
OLTS	...	Optical Loss Test Set – optická souprava pro měření útlumu a odrazivosti
ONT	...	Optical Network Termination – optické síťové zakončení
ONU	...	Optical Network Unit – optická síťová jednotka
ODN	...	Optical Distribution Network – optická distribuční síť
OMCI	...	Operation Maintenance Control Interface – rozhraní kontroly a správy
OPEX	...	Operational Expenditure – operační náklady
ORL	...	Optical Return Loss – útlum odrazu
OSI	...	Open System Interconnection – standard propojování otevřených systémů
PON	...	Passive Optical Network – pasivní optické přístupové sítě
P2P	...	Point-to-Point – spojení bod-bod
P2M	...	Point-to-Multipoint – spojení bod-více bodů
QoS	...	Quality of Service – kvalita služeb (třídy kvality služeb)
RF	...	Rádiové frekvence
RSU	...	Remote Subscriber Unit – vzdálená účastnická jednotka
SDH	...	Synchronous Digital Hierarchy – synchronní digitální hierarchie
SDM	...	Space Division Multiplexing – prostorově dělený multiplex
SIP	...	Session Initiation Protocol – protokol pro hlasovou komunikaci v IP sítích
SONET	...	Synchronous Optical Network – synchronní optické sítě
TDM	...	Time Division Multiplexing – časově dělený multiplex
TDMA	...	Time Division Multiple Access – vícenásobný přístup s časovým dělením
UTP	...	Unshielded Twisted Pair – nestíněný kroucený pár (dvojlinka)
ÚVT	...	Ústav výpočetní techniky
VoIP	...	Voice over IP – přenos hlasu IP sítěmi
WDM	...	Wavelength Division Multiplexing – vlnově dělený multiplex
WDM-PON...	...	Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network)
Wi-Fi	...	Wireless Fidelity – standart pro bezdrátové lokální sítě
WiMAX	...	World Wide Interoperability for Microwave Access – standart pro bezdrátové metropolitní sítě
xDSL	...	Digital Subscriber Line – značení přístupových sítí využívajících metalických médií
XGEM	...	XG-PON Encapsulation Method – zapouzdřovací metoda XG-PON sítě

10G-EPON ...	10 Gigabit Ethernet-based Passive Optical Network – deseti gigabitová pasivní optická síť na bázi Ethernetu
Triple Play ...	Kombinace nabídky služeb datových, hlasových a televizních služeb po přenášeniých po datovou síť
λ ...	vlnová délka
$\alpha_n(\lambda)$...	koeficient útlumu vláken
α_{kon} ...	útlum konektoru
l_x ...	délka vlákna obecně
l_{mez} ...	délka mezilehlého vlákna
$l_{přív}$...	délka přívodního vlákna
$l_{příp}$...	délka přípojného vlákna
A_{celk} ...	celkový útlum trasy
$A_{kab}(\lambda)$...	celkový útlum kabelové trasy
$A_{pasivní}$...	vložný útlum pasivních prvků zařazených do trasy
$A_S(\lambda)$...	útlum svárů
$D(\lambda)$...	koeficient chromatické disperze
$D(\lambda)_{KOE}$...	referenční hodnota disperzního koeficientu
$D(\lambda)_{REF}$...	referenční hodnota disperze vlákna pro provoz 10 Gbit/s
L ...	délka celé kabelové trasy
N_S ...	počet svárů nebo spojek vláken
N_{kon} ...	počet konektorů
PMD ...	Polarisation Mode Dispersion – polarizační vidová disperze
PDM_{REF} ...	referenční hodnota polarizační vidové disperze vlákna pro provoz 10 Gbit/s

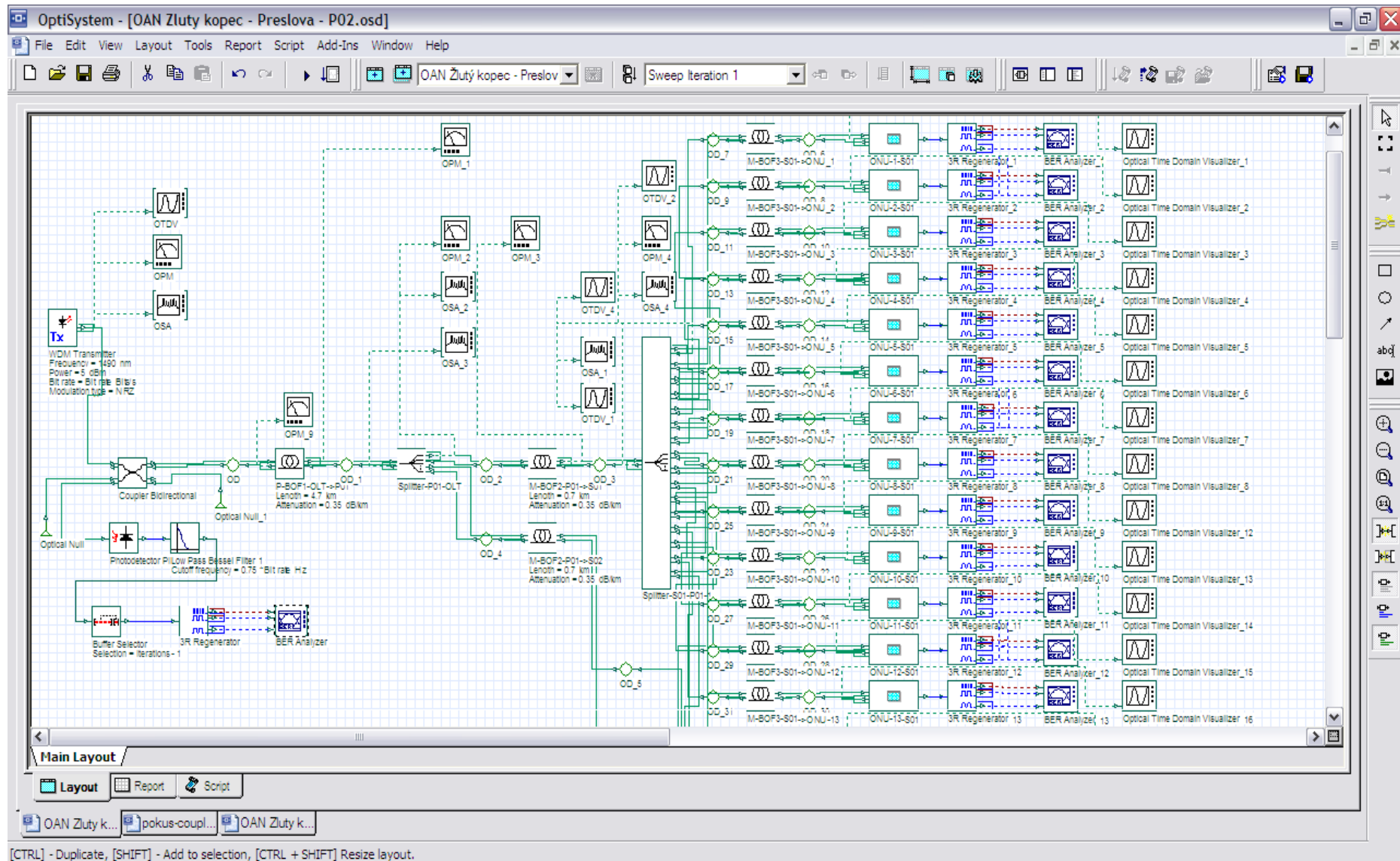
Seznam příloh

- A. Obsah přiloženého média
- B. Schéma sítě v programu OptiSystem
- C. Identifikace prvků optické sítě
 - C.1 Identifikace vláken
 - C.2 Identifikace rozbočovačů
 - C.3 Identifikace optických jednotek
- D. Rozkreslení mikrotrubiček větve B
 - D.1 Vedení mikrotrubiček a HDPE trubek v přední části větve B
 - D.2 Vedení mikrotrubiček a HDPE trubek v zadní části větve B

A. Obsah příloženého média

- Elektronická verze práce.
- Měření BAPS
 - Jednosměrné měření CD a PMD.
 - Měření CD – vysílač přijímač
 - Měření PMD – vysílač přijímač
 - OLTS
 - OTDR
 - Videomikroskop
- Simulace v programu OptiSystem
 - Simulace větve A
 - Simulace větve B

B. Schéma sítě v programu OptiSystem



C. Identifikace prvků optické sítě:

System identifikace prvků byl zaveden pro snadnou a rychlou orientaci mezi jednotlivými částmi sítě, pro snadné rozpoznání jednotlivých entit fyzické vrstvy pro potřeby údržby, správy, měření a vzdáleného dohledu.

Každý prvek bude opatřen výrazným barevným štítkem s identifikačním kódem, který předá základní informaci o konkrétním prvku, jeho nadřazeném případně podřízeném prvku nebo směru, do něž prvek náleží. Čárový kód slouží pro rychlé načtení informací do zobrazovacího zařízení. Okamžité zjištění podrobných informací o prvku z databáze.

C.1 Identifikace vláken

TYP (P/M/C) VLÁKNA-ID VLÁKNA-SMĚR (X##→Y##)

P – přírodní vlákno, **M** – mezilehlé vlákno, **C** – přípojné vlákno;

X## – zdrojový prvek, **Y##** – cílový prvek.

Příklad:



M-BOF1-P01→S01 (mezilehlé vlákno, ID **BOF1**, jdoucí z primárního splitteru **P01** k sekundárnímu **S01**)

C.2 Identifikace rozbočovačů

SPLITTER JMÉNO-PRVEK PŘIPOJENÍ-VĚTEV SPLITTERU)

P – primární **S** – sekundární **T** - terciální

Příklad:



SPLITTER_S01-P01-2 (sekundární splitter **S01** připojený k primárnímu splitteru **P01** k jeho **2.** větvi)

C.3 Identifikace optických jednotek

TYP JEDNOTKY-ID JEDNOTKY-SPLITTER

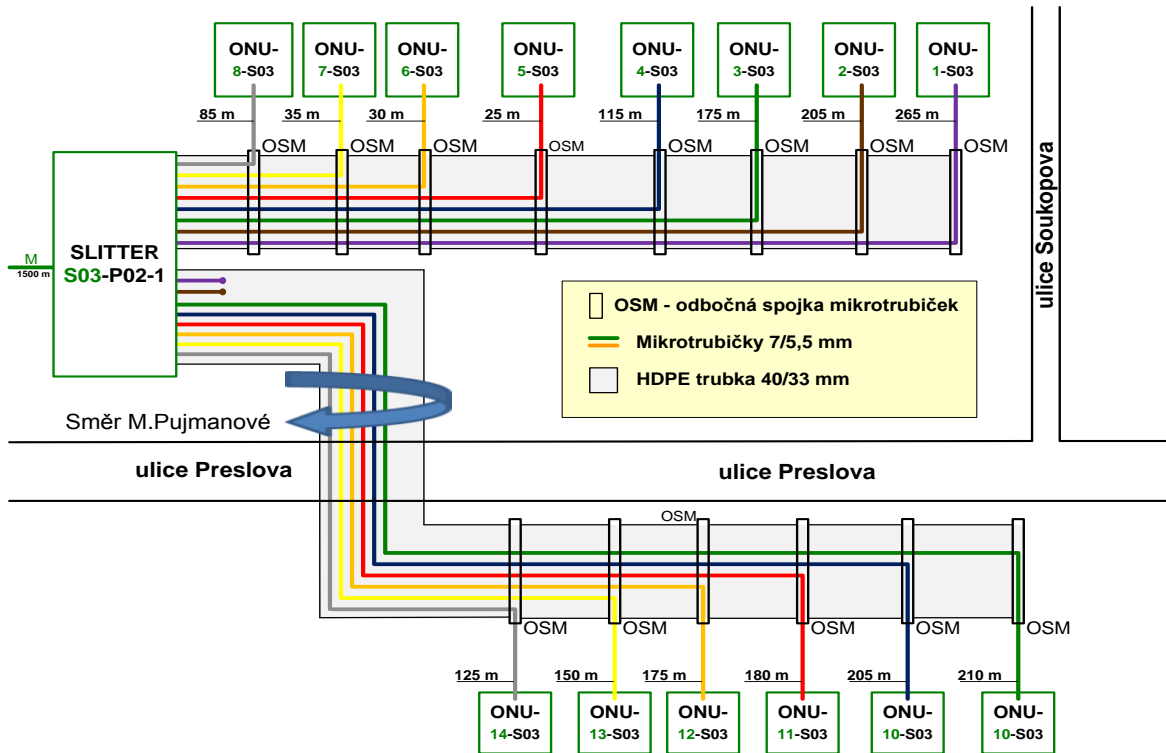
Příklad:

ONU-1-S01 (optická síťová jednotka s ID **1** připojená k sekundárnímu spliteru **S01**)



D. Rozkreslení mikrotrubiček větve B

D.1 Vedení mikrotrubiček a HDPE trubek v přední části větve B:



Poznámka k předchozímu obrázku – spodní HDPE chránička má ve skutečnosti opačný směr a vede podélně západním směrem ulicí Preslovou. Zakreslení je úsporných důvodů zjednodušeno. V kontextu s obr. 8.1 je vedení HDPE trubky k ONU 10 až 14 zřejmé.

D.2 Vedení mikrotrubiček a HDPE trubek v zadní části větve B:

