



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ZVYŠOVÁNÍ PŘENOSOVÉ RYCHLOSTI DSL PŘÍPOJEK METODOU BONDING

BONDING, THE METHOD FOR INCREASING DSL DATA RATE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kratochvíl

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

**Student:** Tomáš Kratochvíl

**ID:** 220820

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Zvyšování přenosové rychlosti DSL přípojek metodou bonding

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte a popište metodu zvyšování přenosové rychlosti DSL technologií označovanou bonding. Realizujte potřebné konfigurace a následná měření dosažitelných přenosových rychlostí a dalších parametrů. Měření realizujte s i bez použití této metody. Pro potřeby měření vytvořte experimentální vedení o nejméně 5 vhodně zvolených úsecích zakončených na patch panelu. Měření vlastností DSL technologií realizujte s využitím testerů Exfo NetBlazer. Kromě dosažené přenosové rychlosti se zaměřte rovněž na jednosměrné zpoždění v jednotlivých směrech přenosu. Měření realizujte dle standardů RCF2544, RFC6349 a ITU-T Y.1564. Rozsah měření konzultujte s vedoucím práce. S využitím vytvořeného experimentálního vedení vytvořte laboratorní úlohu demonstrující tuto techniku zvyšování přenosové rychlosti.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] International Telecommunication Union (ITU-T). Recommendation ITU-T G.998.2: Ethernet-based multi-pair bonding. ITU-T, 2018.
- [2] International Telecommunication Union (ITU-T). Recommendation ITU-T G.993.2: Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2). ITU-T, 2019.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 31.5.2022

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi technologie DSL bondingu. V teoretické části práce jsou uvedeny základní informace o jednotlivých DSL technologiích. Většího důrazu je kladeno na technologii VDSL2, protože DSL bonding se bude testovat v rámci této práce právě na technologii VDSL2. V další kapitole teoretické části práce je popsán princip DSL bondingu. V následující kapitole jsou popsány doporučení pro testování sítí. Jde konkrétně o doporučení RFC 2544, RFC 6349 a Y 1564. V praktické části práce jsou prezentovány výsledky provedených měření. Na závěr praktické části jsou testované DSL technologie porovnány na základě získaných výsledků měření.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

DSL bonding, DSL technologie, VDSL2, RFC 2544, RFC 6349, Y 1564

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis focuses on characteristics of DSL bonding technology. The basic information about DSL technologies is described at the start of theoretical part of thesis. VDSL2 technology is described more thoroughly in comparison with other DSL technologies, because in this thesis DSL bonding is applied on VDSL2 technology. Next chapter of theoretical part of thesis describes principle of DSL bonding technology. Final chapters of theoretical part of thesis describes recommendations for testing of network characteristics. Specifically these network testing recommendations are described: RFC 2544, RFC 6349 and Y 1564. The results of performed tests are presented in practical part of thesis. Tested DSL technologies are compared based on results of performed tests at the end of practical part of thesis.

## **KEYWORDS**

DSL bonding, DSL technologies, VDSL2, RFC 2544, RFC 6349, Y 1564

KRATOCHVIL, Tomáš. Zvyšování přenosové rychlosti DSL přípojek metodou bonding [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141233>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Pavel Šilhavý.



## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Tomáš Kratochvíl  
**VUT ID autora:** 220820  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2021/2022  
**Téma závěrečné práce:** ZVYŠOVÁNÍ PŘENOSOVÉ RYCH-  
LOSTI DSL PŘÍPOJEK METODOU  
BONDING

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

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Pavlu Šilhavému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| Úvod   | 13        |
| <b>1 xDSL technologie</b>                              | <b>14</b> |
| 1.1 VDSL2  | 15        |
| 1.1.1 Aplikační modely                                 | 15        |
| 1.1.2 Frekvenční pásma                                 | 15        |
| 1.1.3 VDSL2 profily                                    | 15        |
| <b>2 xDSL bonding</b>                                  | <b>17</b> |
| 2.1 Vrstvový model xDSL bondingu                       | 17        |
| 2.2 ATM bonding  | 17        |
| 2.3 PTM bonding  | 18        |
| 2.4 Bonding aggregation control protocol               | 18        |
| 2.4.1 Identifikace sdružených linek                    | 18        |
| 2.4.2 Identifikace linek                               | 19        |
| 2.4.3 Inicializace linek a PAF                         | 19        |
| 2.4.4 Přesun linky z PAF s jednou linkou do jiného PAF | 19        |
| 2.4.5 Přesun linky z PAF do prázdného PAF              | 19        |
| 2.4.6 Atributy a proměnné BACP                         | 20        |
| 2.4.7 Opakované odesílání BACPDU                       | 21        |
| 2.4.8 Formát rámců BACP                                | 21        |
| <b>3 Normy pro měření parametrů sítě</b>               | <b>23</b> |
| 3.1 RFC 2544   | 23        |
| 3.1.1 Typy testů                                       | 23        |
| 3.2 RFC 6349   | 25        |
| 3.2.1 TCP okno   | 26        |
| 3.2.2 Struktura TCP segmentu                           | 26        |
| 3.2.3 Otevření TCP spojení                             | 26        |
| 3.2.4 Ukončení TCP spojení                             | 27        |
| 3.2.5 Postup testu                                     | 27        |
| 3.3 Y.1564   | 27        |
| <b>4 Tester EXFO NetBlazer</b>                         | <b>29</b> |
| 4.1 Druhy testů  | 29        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5 Praktická část práce</b>                       | <b>33</b> |
| 5.1 Realizace experimentálního vedení . . . . .     | 33        |
| 5.2 Zapojení pro měření pomocí testerů . . . . .    | 33        |
| 5.3 Konfigurace DSLAMU . . . . .                    | 34        |
| 5.4 Konfigurace modemu Zyxel VMG4005 . . . . .      | 35        |
| 5.5 Měření rychlostí na aplikační vrstvě . . . . .  | 35        |
| 5.6 Měření podle RFC2544 . . . . .                  | 36        |
| 5.6.1 Měření propustnosti . . . . .                 | 36        |
| 5.6.2 Měření latence . . . . .                      | 38        |
| 5.7 Měření podle RFC6349 . . . . .                  | 40        |
| 5.8 Měření podle Y1564 . . . . .                    | 43        |
| 5.9 Porovnání testovaných DSL technologií . . . . . | 46        |
| <b>Závěr</b>  | <b>48</b> |
| <b>Literatura</b>                                   | <b>50</b> |
| <b>Seznam symbolů a zkratk</b>                      | <b>52</b> |
| <b>Seznam příloh</b>                                | <b>53</b> |
| <b>A Laboratorní úloha - DSL bonding</b>            | <b>54</b> |
| A.1 Teoretický úvod . . . . .                       | 54        |
| A.2 Zadání . . . . .                                | 54        |
| A.3 Postup měření . . . . .                         | 54        |
| A.3.1 Volba simulované vzdálenosti . . . . .        | 54        |
| A.3.2 Měření přenosové rychlosti . . . . .          | 55        |
| A.4 Kontrolní otázky . . . . .                      | 56        |
| <b>B Naměřené hodnoty</b>                           | <b>57</b> |

# Seznam obrázků

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Schéma PCS . . . . .   | 18 |
| 2.2  | Struktura BACPDU rámce[4] . . . . .  | 21 |
| 2.3  | Struktura BACP PDU hlavičky[4] . . . . .   | 22 |
| 3.1  | Struktura TCP segmentu [7] . . . . .   | 26 |
| 4.1  | Konfigurace testu RFC 2544 . . . . .   | 30 |
| 4.2  | Konfigurace testu RFC 2544 . . . . .   | 30 |
| 4.3  | Konfigurace testu RFC 6349 . . . . .   | 31 |
| 4.4  | Konfigurace testu Y 1564 . . . . .   | 32 |
| 5.1  | Schéma zapojení pro měření . . . . .   | 33 |
| 5.2  | Porovnání přenosových rychlostí na aplikační vrstvě . . . . .  | 36 |
| 5.3  | Porovnání propustnosti při vzdálenosti 0 metrů . . . . .   | 37 |
| 5.4  | Porovnání propustnosti při vzdálenosti 0 metrů . . . . .   | 37 |
| 5.5  | Porovnání latence v sestupném směru při vzdálenosti 0 metrů . . . . .  | 38 |
| 5.6  | Porovnání latence ve vzestupném směru při vzdálenosti 0 metrů . . . . .  | 39 |
| 5.7  | Porovnání latence v vzestupném směru měřené při 80 % maximální přenosové rychlosti . . . . .                       | 40 |
| 5.8  | Porovnání přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na vzdálenosti . . . . .                                | 41 |
| 5.9  | Porovnání přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna . . . . .                         | 42 |
| 5.10 | Porovnání RTT zpoždění v závislosti na vzdálenosti v sestupném směru přenosu . . . . .                             | 42 |
| 5.11 | Porovnání RTT zpoždění v závislosti na vzdálenosti ve vzestupném směru přenosu . . . . .                           | 43 |
| 5.12 | Porovnání latence v sestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 0 metrů . . . . .     | 44 |
| 5.13 | Porovnání latence v sestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 500 metrů . . . . .   | 45 |
| 5.14 | Porovnání latence ve vzestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 0 metrů . . . . .   | 45 |
| 5.15 | Porovnání latence ve vzestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 500 metrů . . . . . | 46 |
| A.1  | Zapojení patch panelu pro simulaci vzdálenosti 100 metrů . . . . .   | 55 |

# Seznam tabulek

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Porovnání VDSL2 profilů [3] . . . . .  | 16 |
| 5.1  | Konfigurace služeb pro sestupný směr při měření podle doporučení Y1564 . . . . .                                 | 43 |
| 5.2  | Konfigurace služeb pro vzestupný směr při měření podle doporučení Y1564 . . . . .                                | 44 |
| B.1  | Bonding VDSL2 17a - měření na aplikační vrstvě . . . . .   | 57 |
| B.2  | VDSL2 17a - měření na aplikační vrstvě . . . . .   | 58 |
| B.3  | VDSL2 35b - měření na aplikační vrstvě . . . . .   | 58 |
| B.4  | Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .    | 59 |
| B.5  | Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .   | 59 |
| B.6  | Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .    | 59 |
| B.7  | Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . . | 59 |
| B.8  | Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .  | 60 |
| B.9  | Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . . | 60 |
| B.10 | Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .  | 60 |
| B.11 | Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . . | 60 |
| B.12 | VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .            | 61 |
| B.13 | VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .           | 61 |
| B.14 | VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .          | 61 |
| B.15 | VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .         | 61 |
| B.16 | VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .          | 62 |
| B.17 | VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .         | 62 |

|  |    |
|--|----|
| B.18 VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .           | 62 |
| B.19 VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .          | 62 |
| B.20 VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .             | 63 |
| B.21 VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .            | 63 |
| B.22 VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .           | 63 |
| B.23 VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .          | 63 |
| B.24 VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .           | 64 |
| B.25 VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .          | 64 |
| B.26 VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .           | 64 |
| B.27 VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544 . . . . .          | 64 |
| B.28 Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 0 metrů . . . . .   | 65 |
| B.29 Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 100 metrů . . . . . | 65 |
| B.30 Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 200 metrů . . . . . | 65 |
| B.31 Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 300 metrů . . . . . | 66 |
| B.32 Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 400 metrů . . . . . | 66 |
| B.33 Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 500 metrů . . . . . | 66 |
| B.34 Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 0 metrů . . . . .                        | 67 |
| B.35 Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 100 metrů . . . . .                      | 67 |
| B.36 Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 200 metrů . . . . .                      | 67 |

|   |    |
|---|----|
| B.37 Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 300 metrů . . . . . | 67 |
| B.38 Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 400 metrů . . . . . | 68 |
| B.39 Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 500 metrů . . . . . | 68 |
| B.40 Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 0 metrů - sestupný směr přenosu . . . . .      | 68 |
| B.41 Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 0 metrů - vzestupný směr přenosu . . . . .     | 68 |
| B.42 Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 500 metrů - sestupný směr přenosu . . . . .    | 69 |
| B.43 Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 500 metrů - vzestupný směr přenosu . . . . .   | 69 |



# Úvod

S neustálým rozvojem internetových služeb narůstají nároky na přenosové rychlosti připojení k internetu. xDSL bonding umožňuje zvýšit přenosové rychlosti xDSL linek jejich sdružením. Výhodou xDSL bondingu je to, že umožňuje zvýšit přenosové rychlosti u xDSL přípojek vzdálených více než 500 metrů od DSLAMU. Cílem této bakalářské práce je zjistit případné výhody a nevýhody DSL bondingu v porovnání s ostatními testovanými DSL technologiemi. V první kapitole se nachází popis xDSL technologií. Popsány jsou xDSL technologie od nejstarší xDSL technologie HDSL až po jednu z nejnovějších xDSL technologií VDSL2. Druhá kapitola se věnuje popisu xDSL bondingu. Následující kapitoly teoretické části se věnují popisu jednotlivých doporučení pro testování sítí. Jedná se konkrétně o doporučení RFC 2544, RFC 6349 a Y 1584. Veškerá měření v této bakalářské práci jsou provedena pomocí síťových testerů Exfo NetBlazer. V praktické části práce je vysvětlen postup zprovoznění xDSL bondingu na VDSL2 modemu a na DSLAMu s podporou xDSL bondingu. Následně jsou prezentovány a zhodnoceny výsledky provedených měření. Na závěr praktické části práce jsou jednotlivé testované xDSL technologie porovnány na základě výsledků provedených měření. Naměřené hodnoty z veškerých provedených měření se nachází v přílohách práce. V přílohách práce se také nachází návrh demonstrační laboratorní úlohy.

# 1 xDSL technologie

xDSL technologie umožňují přenos digitálních dat po telefonním vedení. Jednou z prvních xDSL technologií byla technologie HDSL, která byla standardizována v roce 1998. HDSL umožňuje obousměrný přenos dat s rychlostí až 2048 kb/s. Frekvenční pásmo technologie HDSL se překrývá s frekvenčním pásmem telefonní služby, takže není možné provozovat HDSL a telefonní službu na jednom vedení zároveň. Pro přenos se v technologii HDSL používají rámce o konstantní velikosti 144 bajtů. [1] Další xDSL technologií standardizovanou v roce 2003 je technologie SHDSL. Umožňuje obousměrný přenos dat po jednom páru telefonního vedení. Pro zlepšení dosahu umožňuje SHDSL použití dvou párů telefonního vedení. Při použití jednoho párů vedení dosahuje maximální přenosové rychlosti 2312 kb/s. Použitím dvou párů vedení se maximální přenosová rychlost navýší na 4624 kb/s. Technologie Asymmetric digital subscriber line (ADSL) jak již název napovídá používá asymetrické přenosové rychlosti. Velikost přenosové rychlosti sestupného směru přenosu (od poskytovatele ke koncovému uživateli) je násobně větší než přenosová rychlost vzestupného směru přenosu (od uživatele k poskytovateli). Asymetrické rychlosti jsou vhodnější pro většinu koncových uživatelů, protože většina uživatelů používá internet pro prohlížení obsahu na internetu, nikoliv k odesílání dat. Přenosová rychlost ADSL dosahuje 6,144 Mb/s pro sestupný směr přenosu a 640 Kb/s pro vzestupný směr přenosu. Vylepšenou verzí ADSL je ADSL2. ADSL2 dosahuje přenosové rychlosti 8 Mb/s v sestupném směru přenosu a 800 Kb/s ve vzestupném směru přenosu. ADSL2 používá stejná frekvenční pásma jako technologie ADSL. Navýšení přenosové rychlosti bylo dosaženo zlepšením modulace. Technologie ADSL2+ vychází z ADSL2. ADSL2+ používá dvojnásobné frekvenční pásmo pro přenos v sestupném směru přenosu. Tím je dosaženo přenosové rychlosti 25 Mb/s pro sestupný směr přenosu, rychlost pro vzestupný směr přenosu se nemění a zůstává na 800 Kb/s. Razantní navýšení přenosové rychlosti DSL technologií přinesla technologie VDSL. VDSL narozdíl od ADSL, který používá frekvence do 1,1 MHz, používá frekvence do 12 MHz. Zvýšením použitých frekvenčních pásem se dosahuje přenosových rychlostí až několika desítek Mb/s. [2]

## 1.1 VDSL2

VDSL2 je druhou verzí technologie VDSL. VDSL2 používá frekvence až 35 MHz. Při použití profilu VDSL2 35b dosahuje celkové obousměrné přenosové rychlosti až 400 Mb/s. Narozdíl od ADSL technologie, ve které se používaly buňky stejné velikosti pro přenos, používá VDSL2 PTM způsob přenosu. PTM způsob přenosu používá pro přenos dat rámce různých velikostí. Pokud se frekvenční pásmo žádné ze služeb provozovaných na telefonním vedení nepřekrývá s frekvenčním pásmem technologie VDSL2, tak je možné provozovat tyto služby současně s VDSL2. [3]

### 1.1.1 Aplikační modely

VDSL2 má tři možné aplikační modely:

1. Pouze datová služba
2. Datová služba s POTS službou
3. Datová služba s ISDN službou

Při současném provozu datové služby a POTS či ISDN služby se musí použít splitter, který dané služby oddělí, aby se vzájemně nerušily. Datové služby fungují na frekvencích řádově jednotek MHz až desítek MHz. Pro oddělení datové služby od telefonní služby se používají filtry typu dolní propust a horní propust. Filtr horní propust se používá pro vyfiltrování datové služby a filtr dolní propust se používá pro vyfiltrování telefonní služby. Při provozu pouze datové služby je celé frekvenční spektrum použité pro datový přenos. Žádné frekvenční pásmo není rezervováno telefonní službě.

### 1.1.2 Frekvenční pásma

Datový přenos je rozdělen do několika frekvenčních pásem. U VDSL2 profilů, které používají frekvence do 12 MHz, se celkové frekvenční pásmo dělí na pět vzájemně oddělených frekvenčních pásem. Tři frekvenční pásma jsou používána pro sestupný směr přenosu dat (downstream) a dvě frekvenční pásma jsou používána pro vzestupný směr přenosu dat (upstream). Přenosu v sestupném směru je vyhrazeno více frekvenčních pásem, proto je přenosová rychlost pro tento směr vyšší, než pro přenos ve vzestupném směru přenosu. U VDSL2 profilů používajících frekvence vyšší než 12 MHz se používá minimálně jedno další frekvenční pásmo, které začíná nad frekvencí 12 MHz. Celkový počet frekvenčních pásem závisí na použitém VDSL2 profilu. [3]

### 1.1.3 VDSL2 profily

V následující tabulce jsou uvedeny informace o jednotlivých VDSL2 profilech. Jednotlivé VDSL2 profily se liší výhradně v šířce frekvenčního pásma. Profily s širším

frekvenčním pásmem používají vyšší frekvence. Tím je dosaženo vyšších přenosových rychlostí v porovnání s VDSL2 profily používající nižší frekvence. [3]

| VDSL2 profil   | 8a     | 8b     | 8c     | 8d     | 12a    | 12b    | 17a    | 30a   | 35b    |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Minimální obousměrná přenosová rychlost [Mb/s]       | 50     | 50     | 50     | 50     | 68     | 68     | 100    | 200   | 400    |
| Šířka kanálu [kHz]                                   | 4,3125 | 4,3125 | 4,3125 | 4,3125 | 4,3125 | 4,3125 | 4,3125 | 8,625 | 4,3125 |
| Horní mez frekvence pro sestupný směr přenosu [MHz]  | 8,5    | 8,5    | 8,5    | 8,5    | 8,5    | 8,5    | 17,66  | 30    | 35,324 |
| Horní mez frekvence pro vzestupný směr přenosu [MHz] | 5,2    | 5,2    | 5,2    | 5,2    | 12     | 12     | 14     | 24,89 | 12     |

Tab. 1.1: Porovnání VDSL2 profilů [3]

## 2 xDSL bonding

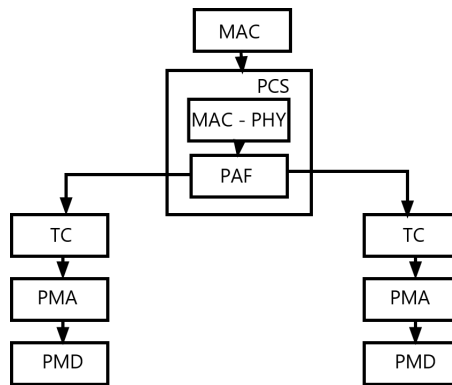
xDSL bonding vychází z principu ethernet bondingu. Doporučení G.998.2 popisující xDSL bonding bylo vydáno v roce 2018. xDSL bonding umožňuje použít pro přenos dat více xDSL linek zároveň. Přenosem dat po několika sdružených xDSL linkách zároveň je dosaženo až násobně vyšších přenosových rychlostí a delšího dosahu xDSL připojení. Výhodou xDSL bondingu je zvýšení přenosové rychlosti xDSL připojení i při delších vzdálenostech xDSL přípojky od DSLAMu. Princip DSL bondingu spočívá ve fragmentaci přenášených rámců a následném přenosu těchto fragmentů jednotlivými sdruženými DSL linkami zapojenými do DSL bondingu. Koncová zařízení používající DSL bonding si mezi sebou vyměňují informace o DSL linkách zapojených do DSL bondingu. Mezi tyto informace patří především informace o tom, jestli je daná linka schopná přenosu, či nikoliv. Při výpadku jedné z DSL linek zapojených do DSL bondingu musí být koncová zařízení schopna tuto skutečnost detekovat, přerušit přenos po vypadené DSL lince a soustředit přenos dat do zbylých funkčních DSL linek zapojených do DSL bondingu. [4]

### 2.1 Vrstvový model xDSL bondingu

Vrstvový model xDSL bondingu je vidět na obrázku 2.1. xDSL bonding pracuje v kódové podvrstvě fyzické síťové vrstvy (PCS). PCS se skládá ze dvou funkčních bloků: MAC-PHY (media access control rate matching) a PAF (physical media entity aggregation). Hlavní funkcí PCS je kódování a dekodování dat. Data jsou do PCS předávány z linkové vrstvy. PAF fragmentuje rámce předané z linkové vrstvy (MAC) a předává je do přenosové vrstvy (TC) jednotlivých sdružených linek pomocí cross-connectu. Obdobně PAF pracuje také v opačném směru. Přijímané fragmenty z přenosové vrstvy jednotlivých sdružených linek jsou převedeny do rámců, které jsou následně předány do linkové vrstvy. PMD se stará o modulaci a demulaci signálu pro přenos po fyzickém médiu. [4]

### 2.2 ATM bonding

ATM bonding sdružuje maximálně dvě linky, které požívají asynchronní způsob přenosu (ATM). Sdružené linky mohou mít rozdílnou přenosovou rychlost. Takže pořadí vyslaných a přijmutých ATM buněk se může lišit. Přenášeným ATM buňkám musí být přiřazeno sekvenční číslo, aby bylo možné detekovat správné pořadí přenášených ATM buněk.



Obr. 2.1: Schéma PCS

## 2.3 PTM bonding

PTM bonding sdružuje až osm linek, které používají PTM způsob přenosu. Sdružené linky mohou mít stejnou nebo rozdílnou rychlost přenosu. Přenášeným rámcům jsou přidány sekvenční čísla. Obdobně jako u ATM bondingu sekvenční číslo slouží k identifikaci pořadí přenášených rámců.

## 2.4 Bonding aggregation control protocol

Bonding aggregation control protocol (BACP) zajišťuje výměnu informací mezi lokálním a koncovým zařízením. Zařízení se pomocí BACP domlouvají na tom, které linky budou namapovány k danému PMA Aggregation Function (PAF). PAF se stará o rozdělení ethernetových rámců do linek, které jsou k danému PAF připojeny. Hlavní součástí BACP je bonding control engine (BCE), který se stará o mapování konkrétních linek ke konkrétním PAF. Přenos informací mezi lokálním BCE a koncovým BCE je umožněn pomocí takzvaných bonding aggregation control protocol data units (BACPDUs). BACPDUs jsou ethernetové rámce a přenášejí se pomocí PAF. [4]

### 2.4.1 Identifikace sdružených linek

K identifikaci linek, které mohou být sdruženy dohromady slouží group ID (GID). Linky se mohou sdružit, pokud mají stejné group ID na lokálním a koncovém zařízení, ke kterým jsou připojeny. Linky s rozdílným group ID nesmí být připojeny ke stejnému PAF. Linky se stejným group ID mohou být připojeny k různým PAF. [4]

## 2.4.2 Identifikace linek

Každé lince jsou přiřazeny 2 identifikátory. Prvním identifikátorem je číslo linky (PME ID). Číslo linky je přiřazeno danou PAF, ke které je linka připojena. Číslo linky je integer s rozsahem 0-31. Druhým identifikátorem linky je stream ID. Každé lince v sdružené skupině linek je přidělen unikátní stream ID.[4]

## 2.4.3 Inicializace linek a PAF

Při inicializaci linek je ke každé lince inicializován PAF. Bonding control engine (BCE) začne přenášet BACPDUs do PAF hned, co je PAF schopný přenášet data po lince. BCE oznámí (pomocí BACPDUs) každému PAF group ID, číslo linky a stream ID dané linky. Následně BCE začne analyzovat, které linky by mohly být přiřazeny k stejnému PAF. Po zjištění, že by některé linky mohly být přiřazeny k jinému PAF, se vyšle příkaz k přesunutí linky do BCE koncového zařízení. BCE koncového zařízení není povinen přijmout příkaz k přesunutí linky pod jiný PAF.[4]

## 2.4.4 Přesun linky z PAF s jednou linkou do jiného PAF

Přesun linky z PAF s pouze jednou linkou do jiného PAF je proces, při kterém seneztrácí žádná data.

### Postup přesunutí linky

1. BCE se rozhodne zahájit přesun linky
2. BCE oznámí číslo přesouvané linky do nového PAF a čeká na odpověď. PAF potvrdí selekci linky. V tento moment obě strany vědí číslo linky, které se týka přesun.
3. BCE odpojí linku ze současného PAF. Tento PAF již nemůže přenášet žádné rámce. Odpojení PAF je oznámeno vzdálenému BCE pomocí jiného PAF. Lokální BCE čeká na potvrzení, že vzdálené BCE také odpojilo linku ze současného PAF
4. Linka je na obou stranách odpojena od PAF. BCE připojí linku k novému PAF. BCE oznámí připojení linky vzdálenému BCE a čeká na potvrzení.
5. Přenos po lince může začít hned potom, co vzdálené BCE potvrdí, že připojilo linku k novému PAF.

## 2.4.5 Přesun linky z PAF do prázdného PAF

Přesunem linky z PAF s více linkami do PAF s jedinou linkou nedochází k ztrátě dat, pokud zbylé linky v původním PAF zvládají přenést stejný datový tok.

### Postup přesunutí linky

1. BCE se rozhodne přesunout linku z PAF s více linkami do prázdného PAF.
2. BCE odpojí linku z původního PAF a oznámí odpojení linky vzdálenému BCE.
3. Po přijmutí potvrzení, že vzdálený BCE také odpojil linku od PAF, se linka přepojí k prázdnému PAF.
4. Přepojení linky k prázdnému PAF se oznámí vzdálenému BCE
5. Po přijmutí oznámení o přepojení linky vzdálený BCE také přepojí linku do prázdného PAF

## 2.4.6 Atributy a proměnné BACP

Následující atributy a proměnné zaručují funkčnost BACP protokolu. Tyto parametry jsou používány pouze v BACP. Takže v linkách, které nejsou nakonfigurovány pro bonding, se tyto parametry nepřenáší a neurčují.

### GROUP ID (GID)

Group ID slouží k identifikaci linek, které se budou sdružovat. Linky se sdružují, když mají stejné Group ID. Group ID by se nemělo měnit poté, co je linka v sdružené skupině linek. Group ID by se mělo měnit pouze, když je linka připojena do PAF s jedinou linkou.

### STREAM ID

Stream ID identifikuje linky se stejným Group ID. To znamená, že každé lince v dané skupině je přiřazeno unikátní Stream ID pro danou linku. Linky s jiným Group ID mohou mít stejný Stream ID jako linky s jiným Group ID. Proto k identifikaci linky se používá kombinace Group ID + Stream ID. Stream ID by se obdobně jako Group ID nemělo měnit, když je linka v sdružené skupině. Mělo by se měnit pouze když je linka připojena do PAF s jedinou linkou. Tento stav je buď při inicializaci BACP nebo po odebrání linky ze sdružené skupiny linek.

### PME ID

PME ID je číslo v rozsahu 0-31. Slouží k identifikaci linek v daném PAF. Z toho vyplývá, že podle normy se k jednomu PAF může připojit maximálně 32 linek.

### PME status

Každá linka z 32 možných linek připojených k PAF má přiřazen PME status. PME status je přenášen pomocí 4 bitů. Například status TxRx(5) je označen 0101. Statusy všech linek pro daný PAF jsou uloženy v PME status poli. Toto pole má 32 buněk o velikosti 4 bitů. PME ID se používá jako index buňky v PME status poli.

### Přehled PME statusů

- Unknown (0) - Informace o této lince ještě nebyly zjištěny
- Unassigned (1) - PAF nemá připojenou linku v této pozici
- Assigned (2) - Lince bylo přiřazeno PME ID, ale není připojena k PAF buď v přenosovém, nebo přijímacím směru.



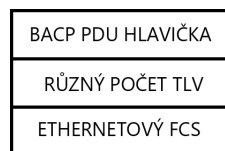
- Moving (3) - Linka je v procesu přesunu do tohoto PAF. Momentálně není linka připojena do žádného PAF z lokální strany. BCE čeká na potvrzení od vzdálené strany, že linka je odpojena od PAF.
- RxOnly (4) - Linka je schopná pouze přijímat data ze vzdáleného PAF. Po lince nejsou přenášeny data z lokálního PAF.
- TxRx (5) - Linka je plně připojena k PAF. Je schopná přenášet data v obou směrech přenosu.

### 2.4.7 Opakované odesílání BACPDU

BCE má na starost, aby všechny změny v lokálním BCE byly oznámeny vzdálenému BCE. Lokální BCE opakovaně posílá oznámení o změnách do vzdáleného BCE, dokud lokální BCE nedostane potvrzení o dorazení oznámení do vzdáleného BCE. Podle doporučení se BCE pokouší poslat oznámení třikrát s jednosekundovým zpožděním. BACPDU by se měly přenášet pouze když nastane nějaká změna.

### 2.4.8 Formát rámců BACP

Rámce BACP mají strukturu Ethernetových rámců. BACPDUs jsou odvozeny z IEEE 802.3 slow protokolu. BCE má na starost, aby rychlost přenosu BACPDUs odpovídala přenosovým požadavkům slow protokolů. Nelze přenést přes PAF více než 10 BACPDUs za jednu vteřinu. BACP PDU hlavička obsahuje informace o zdrojové



Obr. 2.2: Struktura BACPDU rámce[4]

MAC adrese, cílové MAC adrese, verzi BACP protokolu a informaci o času (BACP timestamp). Každý type-length-value (TLV) se skládá ze tří částí: typ, délka a hodnota. Zpracovávání jednotlivých TLV se řídí několika pravidly.

#### Pravidla zpracování TLV

1. Pokud pole typu daného TLV obsahuje hodnotu null, tak to signalizuje, že TLV je prázdné.
2. TLV s neznámými typy jsou ignorovány
3. Pokud je délka TLV kratší než předpokládaná délka TLV daného typu, tak takové TLV je ignorováno
4. Pokud je délka TLV znatelně delší než předpokládaná délka TLV daného typu, tak se předpokládá, že TLV bylo prodlouženo.

|                               |
|-------------------------------|
| CÍLOVÁ MAC ADRESA             |
| ZDROJOVÁ MAC ADRESA           |
| SLOW PROTOCOL ETHERTYPE       |
| ORGANIZATION SPECIFIC SUBTYPE |
| ITU OUI                       |
| ITU SUBTYPE                   |
| BACP VERSION                  |
| BACP TIMESTAMP                |

Obr. 2.3: Struktura BACP PDU hlavičky[4]

5. Pokud délka TLV je delší než délka celkového rámce, tak se celý rámec zahodí.  
V přenosu musela nastat chyba.

#### **TLV s informacemi**

Obsahuje Group ID a pole s PME statusy všech linek v daném PAF. Tyto informace jsou vyměňovány mezi lokálním a vzdáleným BCE.

#### **Přiřazovací TLV**

Obsahuje Stream ID a PME ID linky. Přiřazovací TLV se používá při přiřazení Stream ID a PME ID lince. Takže přiřazovací TLV jsou posílány pouze při inicializaci linky nebo při přesunu linky do nového PAF.

## 3 Normy pro měření parametrů sítě

### 3.1 RFC 2544

RFC 2544 je doporučení, které bylo vydáno v roce 1999 organizací IETT. Udává postup, jak porovnat jednotlivá síťová zařízení, kterými jsou třeba modemy, huby, switche, routery, z hlediska přenosu dat. Obsahuje několik měření, ze kterých jsou vytvořeny charakteristiky. Pomocí těchto charakteristik se prezentuje výkonnost daného síťového zařízení. Doporučení také obsahuje návrhy, jak by výsledky měření měly být prezentovány. Na daném síťovém zařízení by měly být provedeny pouze ty testy, které je dané zařízení schopné vykonat. Pro nejpřesnější výsledky testů je potřeba používat tester s vysílacím a přijímacím portem, či dva testery (jeden použit pro vysílání dat a druhý pro přijímání dat). Při použití dvou oddělených testerů musí být tyto testery sesynchronizovány pomocí přesného generátoru. Data jsou tedy posílána vysílacím portem do přijímacího portu testovaného zařízení a následně síťové zařízení pošle data vysílacím portem do přijímacího portu testeru. Tester následně zpracuje přijmutá data ze síťového zařízení a porovná je s daty vyslanými. Při vykonávání kteréhokoliv z testů se nesmí zasahovat do konfigurace síťového zařízení. Přesná konfigurace síťového zařízení musí být obsažena ve výsledcích testů. Všechny provedené testy se musí provést pro několik různých velikostí rámců. Doporučuje se provést každý test pro pět různých velikostí rámců. [5]

#### Doporučené velikosti rámců pro Ethernet

- 64 B
- 128 B
- 256 B
- 512 B
- 1024 B
- 1280 B
- 1518 B

Tyto velikosti obsahují maximální a minimální možné velikosti pro přenos podle Ethernet standardu.

#### 3.1.1 Typy testů

##### Test propustnosti

Test propustnosti spočívá v postupném snižování rychlosti odesílání rámců testovacím zařízením, dokud se počet odeslaných a přijmutých rámců za daný časový úsek nerovná. Tímto se zjistí takzvaná propustnost. Propustnost vyjadřuje maximální

přenosovou rychlost síťového zařízení při určitých podmínkách. Výsledky testů propustnosti pro různé velikosti rámců se doporučuje zpracovat do grafu.

### **Test odezvy**

Před provedením testu odezvy musí být zjištěna propustnost síťového zařízení pro dané velikosti rámců. Následně jsou tyto velikosti propustnosti použity při testech odezvy. Test odezvy spočívá v odesílání rámců určité velikosti po dobu minimálně 120 sekund. Jeden rámeček, který bude přenesen uprostřed přenosu, se označí tagem v hlavičce. Testovací zařízení si uloží čas, kdy byl tento označený rámeček odeslán do testovaného síťového zařízení. Po zpracování označeného rámce síťovým zařízením si testovací zařízení uloží čas, při kterém označený rámeček dorazil zpět do testovacího zařízení. Rozdílem těchto dvou časů se získá odezva síťového zařízení při daných podmínkách. Tento test musí být proveden aspoň dvakrát. Výsledná odezva se určí aritmetickým průměrem. Výsledky testů odezvy se doporučuje zpracovat do tabulky.

### **Test ztrátovosti rámců**

Porovnáním počtu odeslaných rámců do síťového zařízení s přijatými rámci ze síťového zařízení se zjistí počet ztracených rámců. Ztrátovost se udává v procentech. Vyjadřuje tedy kolik procent vyslaných rámců do síťového zařízení se ztratilo při zpracování síťovým zařízením. Výsledky testů ztrátovosti se doporučuje zpracovat do grafu.

### **Test back-to-back rámce**

Tento test zjišťuje počet po sobě jdoucích rámců, které je síťové zařízení schopné zpracovat bez jediné ztráty rámce. Přenos musí trvat nejméně dvě sekundy a pro nej přesnější výsledky se doporučuje opakovat test padesátkrát. Výsledná hodnota se určí průměrem dílčích hodnot měření. Test je také vhodné provést pro různé velikosti rámců. Výsledky testů se doporučuje prezentovat v tabulce.

### **Test zotavení**

Test zotavení zjistí, za jak dlouho se síťové zařízení zotaví po přetížení. Na začátku testu se začne posílat tok rámců rychlostí 1,1 násobku propustnosti síťového zařízení. To se provádí po dobu minimálně 60 sekund. Následně se sníží přenosová rychlost na polovinu a tester si zaznamená čas, kdy došlo k snížení přenosové rychlosti. Poté si tester zapamatuje čas, kdy se naposled ztratil přenášený rámeček. Rozdílem těchto časů se získá čas zotavení. Výsledky testů zotavení se doporučuje zpracovat do tabulky.

## Test resetu

Test resetu spočívá v určení doby, za kterou se síťové zařízení zotaví po systémovém resetu. Na začátku testu se posílá tok rámců při maximální rychlosti daného síťového zařízení. V průběhu přenosu vypojíme testované síťové zařízení z napájení nebo vyvoláme systémový reset pomocí webové aplikace, která je určena ke správě zařízení. Testovací zařízení si zaznamená čas, kdy byl přenesen poslední rámeček, než došlo k resetu síťového zařízení. Po zotavení síťového zařízení si testovací zařízení zaznamená čas, při kterém byl přenesen první rámeček. Rozdíl těchto zaznamenaných časů udává dobu resetu síťového zařízení.

## 3.2 RFC 6349

RFC 6349 je doporučení pro testování propustnosti TCP protokolu. Zhruba 90% veškerého datového přenosu na internetu používá TCP protokol. TCP protokol je transportní protokol, který se přenáší nad IP protokolem. TCP poskytuje spolehlivý přenos dat mezi aplikacemi komunikujícími v síti. Komunikující strany si navzájem posílají potvrzení o přijetí rámeček. Tím je docíleno spolehlivé komunikace. Chyba v přenosu se detekuje, pokud jedna z komunikujících stran nedostane potvrzení o zpracování rámeček druhou stranou. Následně se chybné rámeček znovu odesílají. K zvýšení propustnosti TCP protokolu se používají takzvaná okna. Pro každé navázané TCP spojení se udržuje okno. Okno limituje počet nepotvrzených rámeček, které mohou být přeneseny v daný moment. Po vyčerpání TCP okna musí odesílací strana čekat na potvrzení o zpracování rámeček protistranou. Následně má okno nenulovou hodnotu a mohou se opět přenášet data. Pokud je velikost okna moc vysoká, může dojít k přenosu více dat, než může síť zvládnout. Dojde k ztrátě některých dat a následně k jejich opakovanému přenesení. To zapříčiní snížení propustnosti TCP protokolu. Určení správné velikosti okna spočívá v zvyšování velikosti okna, dokud se neztratí první pakety. Následně se okno sníží a tato hodnota okna se může použít pro spojení. V rámci přenosu dat TCP protokolem se také přenáší množství takzvaných režijních dat. Jedná se především o hlavičky IP protokolu a TCP protokolu. V důsledku přenosu těchto režijních dat se může přenosová rychlost naměřená podle doporučení RFC 6349 výrazně lišit s naměřenou přenosovou rychlostí podle doporučení RFC 2544. RFC 6349 se mimo jiné používá k testování firemních sítí. Mezi poskytovateli síťových služeb a firmami se uzavírají takzvané Service level agreement (SLA). SLA obsahuje parametry, které firemní síť musí splňovat. Mezi tyto parametry patří propustnost, odezva, jitter, ztrátovost, dostupnost sítě a ostatní parametry sítě. [6] [7]

### 3.2.1 TCP okno

TCP okno určuje, kolik dat je příjemce dat schopný přijmout v daný moment. Informace o velikosti okna se odesílateli dat předávají v TCP segmentech s příznakem ACK. Po vyčerpání okna musí odesílací strana čekat na ACK segment s potvrzením o zpracování dat a novou aktuální velikostí okna. [7]

### 3.2.2 Struktura TCP segmentu

|                       |              |                       |          |
|-----------------------|--------------|-----------------------|----------|
| ZDROJOVÝ PORT 16b     |              | CÍLOVÝ PORT 16b       |          |
| SEKVENČNÍ ČÍSLO 32b   |              |                       |          |
| POTVRZOVACÍ ČÍSLO 32b |              |                       |          |
| OFFSET 4b             | REZERVACE 6b | KONTROL. BITY         | OKNO 16b |
| KONTROLNÍ SOUČET 16b  |              | URGENTNÍ UKAZATEL 16b |          |
| MOŽNOSTI              |              | PADDING               |          |
| DATA                  |              |                       |          |

Obr. 3.1: Struktura TCP segmentu [7]

- ZDROJOVÝ PORT - 16 bitové číslo se zdrojovým portem
- CÍLOVÝ PORT - 16 bitové číslo s cílovým portem
- SEKVENČNÍ ČÍSLO - 32 bitové číslo sloužící k identifikaci pořadí segmentu.
- POTVRZOVACÍ ČÍSLO - 32 bitové číslo obsahující sekvenční číslo dalšího segmentu, který odesílatel předpokládá přijmout.
- DATA OFFSET - 4 bity určující začátek datové části segmentu.
- REZERVACE - 6 nevyužitých bitů - obsahuje nulové bity
- KONTROLNÍ BITY - 6 bitů, které určují příznaky segmentu
- OKNO - 16 bitů určujících počet dat, které je odesílatel segmentu schopný přijmout
- KONTROLNÍ SOUČET - 16 bitů
- URGENTNÍ UKAZATEL - 16 bitů - použité pouze při příznaku URG, ukazuje na sekvenční číslo segmentu, který přenáší urgentní data
- MOŽNOSTI - variabilní délka
- PADDING - skládá se z nul, určuje konec hlavičky TCP protokolu
- DATA - obsahuje přenášená data TCP protokolem

### 3.2.3 Otevření TCP spojení

Otevření nového TCP spojení probíhá ve třech krocích. Pro jednoduchost bude níže vysvětleno otevření TCP spojení mezi stranou A a stranou B.

1. Strana A odešle TCP segment s příznakem SYN
2. Strana B odpoví TCP segmentem s příznaky SYN a ACK
3. Strana A odešle TCP segment s příznakem ACK

### 3.2.4 Ukončení TCP spojení

Ukončení TCP spojení pracuje na stejném principu jako otevření nového spojení. Jediným rozdílem je, že se používají TCP segmenty s příznaky FIN a ACK. Ukončení spojení probíhá ve čtyřech krocích.

1. Strana A pošle TCP segment s příznakem FIN
2. Strana B odpoví TCP segmentem s příznakem ACK
3. Strana B pošle TCP segment s příznakem FIN
4. Strana B odpoví TCP segmentem s příznakem ACK

### 3.2.5 Postup testu

Test se provádí ve třech krocích. Nejdříve se zjišťuje Maximum Transmission Unit (MTU). MTU udává maximální velikost rámce, který je schopna testovaná síť přenést bez použití fragmentace rámců. Následovně se změří Baseline Roundtrip Time (RTT) a Bottleneck Bandwidth (BB). RTT udává dobu od vyslání rámce do přijetí potvrzení o zpracování rámce z protější strany. BB udává maximální propustnost mezi komunikujícími stranami. V posledním kroku se změří propustnost TCP protokolu. Před zahájením testování propustnosti TCP protokolu se doporučuje otestovat propustnost a další parametry sítě pomocí doporučení RFC 2544. Z velikostí RTT a BB se vypočte velikost okna použitého při TCP spojení. Měření propustnosti TCP protokolu by se mělo provádět jak při jediném TCP spojení, tak i při několika TCP spojeních zároveň. [6]

## 3.3 Y.1564

Y1564 je doporučení pro testování Ethernetových služeb. Bylo vydáno v roce 2016. Y.1564 vychází z RFC 2544 a doplňuje jeho nedostatky. Mezi hlavní nedostatek RFC 2544 patří měření odezvy pouze jednou za dvě minuty a pouze při maximální přenosové rychlosti. V doporučení jsou definovány takzvané testovací datové toky, které jsou odesílány do testované sítě. Tyto testovací datové toky mají specifické atributy podle toho, jaké služby tyto toky představují. Jednotlivé služby se mezi sebou liší hlavně ve velikostech rámců a rychlosti přenosu. Testovací datový tok se skládá z rámců různých velikostí a různých priorit. Pokud je síť správně nakonfigurována, tak by měla upřednostňovat rámce služeb s vyšší prioritou. Pro správnou funkci musí

být vyšší priorita nastavena pouze u některých služeb. Vyšší priorita se většinou přiděluje službám, co pracují v přítomnosti a jsou choulostivé na odezvu. Jde o služby jako je hovor, videohovor, streamování videa a zvuku. Nízká priorita se přiděluje službám, co nejsou choulostivé na zhoršení latence. [8]



## 4 Tester EXFO NetBlazer

Exfo NetBlazer je multifunkční síťový tester. Funguje na bázi operačního systému Windows. Podporuje takzvaný dual test, ve kterém komunikuje s dalším testerem Exfo NetBlazer. Mimo klasického 1 Gb/s ethernetu podporuje také 10 Gb/s optické vlákno. V rámci této bakalářské práce budou použity testery Exfo NetBlazer pro několik druhů testů. V každém testu se dají nakonfigurovat různé parametry.

### 4.1 Druhy testů

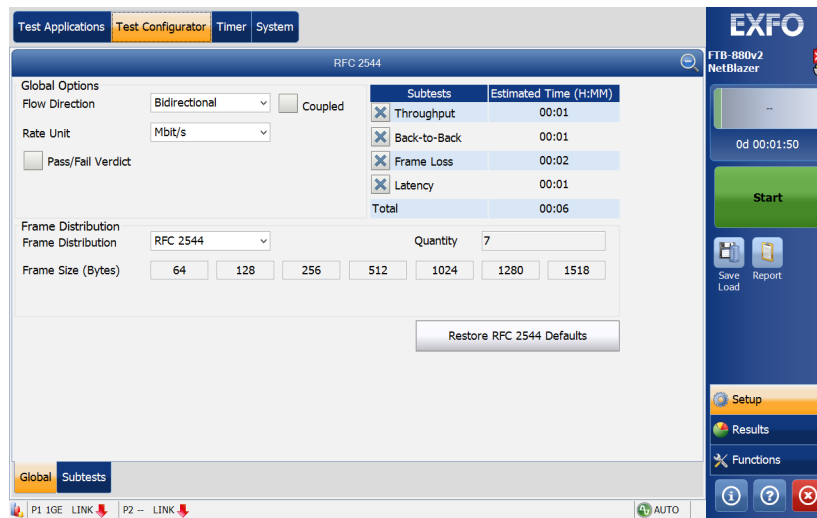
#### RFC 2544

Tento test umožňuje provést měření dle doporučení RFC 2544. Doporučení RFC 2544 bylo již popsáno v kapitole Normy pro měření parametrů sítě. Měření může být provedeno buď pomocí dvou testerů a nebo pomocí pouze jednoho testeru, který má více než jeden vstupní port pro připojení do sítě. Tester s jedním portem pro připojení do sítě se musí použít v kombinaci s dalším testerem. Druhý tester může být spuštěn buď v takzvané smyčce nebo v módu umožňujícím vzdálené připojení testeru. V případě smyčky pracuje tester tak, že všechny přijímaná data odesílá zpátky k zdroji těchto dat. Nevýhodou použití smyčky je možnost měření pouze jednoho směru. Není možné měřit obousměrný provoz. Při použití jednoho testeru s více porty či při použití vzdáleného připojení k druhému testeru je možné měřit obousměrný provoz.

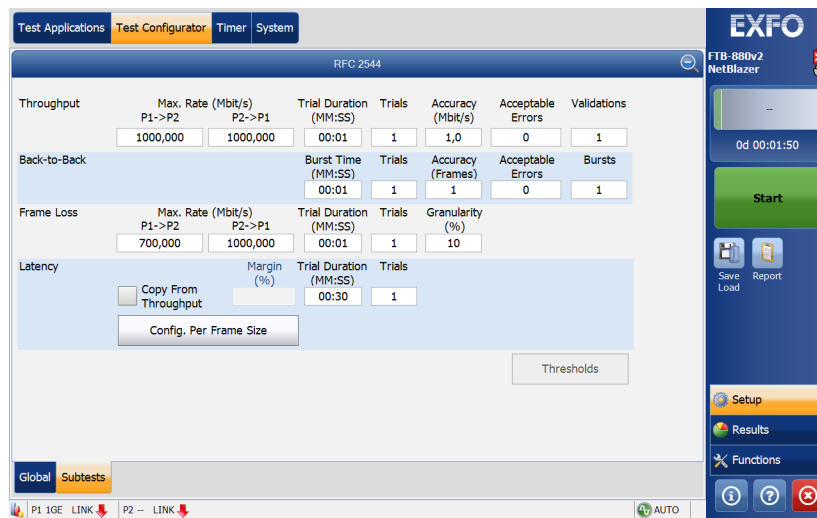
#### Konfigurace testu

Kliknutím na RFC 2544 v hlavním menu aplikace NetBlazer se spustí konfigurační okno testu RFC 2544. Jako první je potřeba zvolit, jestli se bude používat jeden tester a nebo dva testery. V případě použití dvou testerů je potřeba druhý tester vyhledat pomocí jeho IP adresy. Dále je potřeba nakonfigurovat použité síťové porty pro měření. Nejdříve se zvolí, o jaký typ přenosového média se jedná a následně se nastaví připojení k síti v záložce network pro daný port. V záložce flow direction se nastaví směr síťového provozu při testu. Jde buď o jednosměrný provoz nebo obousměrný. V případě obousměrného provozu je možné měřit parametry pro směr uplink a downlink zároveň. Velikost použitých rámců při měření lze nastavit v záložce frame distribution. Ve výchozím stavu se používají velikosti rámců definovaných doporučením RFC 2544. V případě nastavení vlastní velikosti rámců lze nastavit až deset různých velikostí rámců v rozsahu od 64 bajtů do 16000 bajtů. Záložka subtests umožňuje konfiguraci jednotlivých testů v rámci RFC 2544. Jedná se o test měření propustnosti, back-to-back rychlosti, ztrátovosti a latence. Pro zvýšení přesnosti výsledků je možné provádět každý test vícekrát. V konfiguraci každého

testu lze nastavit délku trvání daného testu, počet opakování testu a požadovanou přesnost výsledků. Test propustnosti zjišťuje maximální možnou přenosovou rychlost, při které nenastává ke ztrátě přenášených rámců.



Obr. 4.1: Konfigurace testu RFC 2544



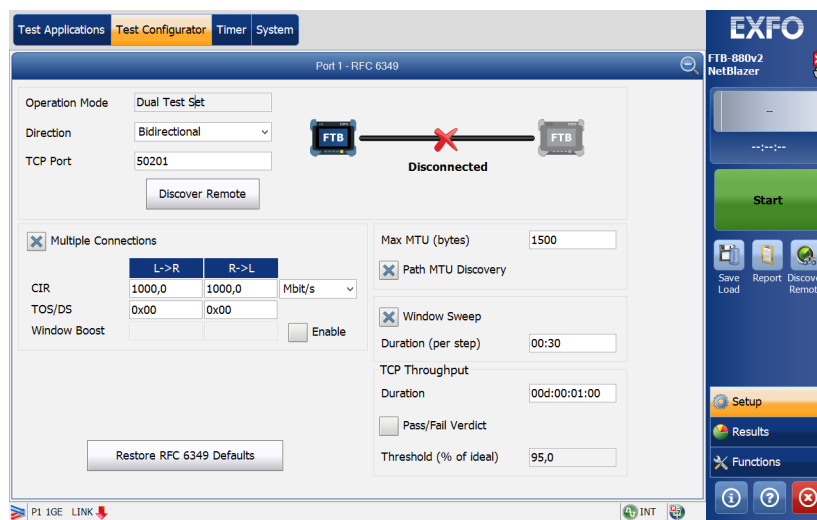
Obr. 4.2: Konfigurace testu RFC 2544

## RFC 6349

Tento test umožňuje provést měření podle doporučení RFC 6349. Obdobně jako u testu RFC 2544 je možné použít dva testery pro měření v takzvaném dual test módu.

### Konfigurace testu

Po otevření aplikace RFC 6349 v hlavním menu aplikace NetBlazer se kliknutím na záložku Test configurator dostaneme do konfiguračního okna testu RFC 6349. Zde se dá nastavit, na jakém portu budou TCP spojení navázány. Konfigurační okna se také ptá na předpokládanou přenosovou rychlost pro oba směry přenosu. Tento údaj slouží pouze pro rozhodnutí, jestli testovaná síť splňuje tyto rychlosti. Další konfigurovatelnou funkcí je window sweep. Window sweep spočívá v měření přenosové rychlosti TCP protokolu při různých velikostech TCP okna.



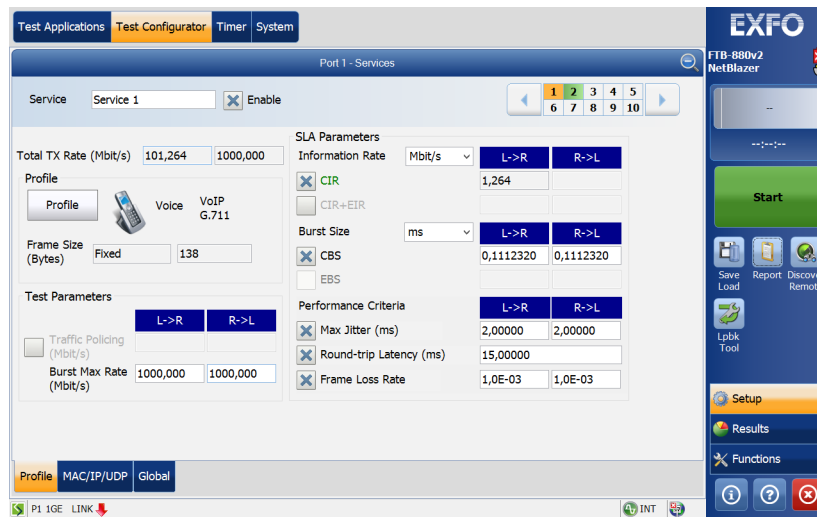
Obr. 4.3: Konfigurace testu RFC 6349

## Y 1584

Tento test slouží k měření definované doporučením Y 1584. V rámci testu se konfiguruje služby s různými požadavky na přenosovou rychlost, maximální latenci a ztrátovost. Pomocí tohoto testu lze také ověřit správnou funkčnost QoS (Quality of Service), pokud je tato funkcionality správně nakonfigurována v testované síti. Výsledkem testu je soupis jednotlivých testovaných služeb. Výsledkem testu je soupis dosažených přenosových rychlostí, latencí a ztrátovostí jednotlivých testovaných služeb.

### Konfigurace testu

Na obrázku 4.4 lze vidět konfigurační okno, které slouží pro nastavení parametrů jednotlivých služeb. Lze nastavit přenosovou rychlost služby, velikost použitých rámců službou a prioritu dané služby.



Obr. 4.4: Konfigurace testu Y 1564

## 5 Praktická část práce

### 5.1 Realizace experimentálního vedení

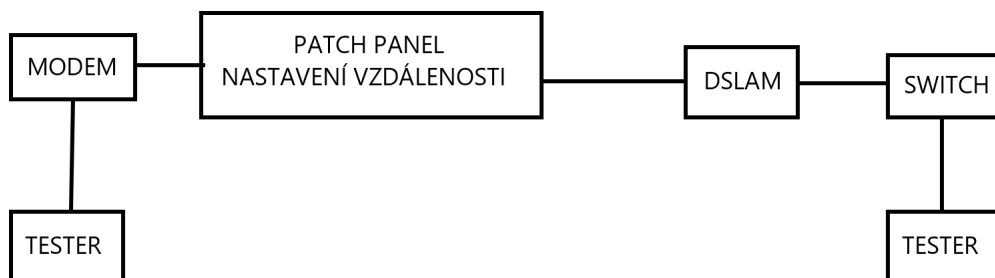
Pro provedení testů podle doporučení RFC2544, RFC6349 a Y1569 jsem zkonstruoval experimentální vedení pomocí patch panelu. Do jednotlivých portů patch panelu se připojily kabely různých délek. Takto zapojený patch panel slouží k simulaci délky vedení DSL linek. Celkově se mezi porty patch panelu rozdělilo 250 metrů kabelu. Jelikož je použitý kabel osmižilový a každá DSL linka potřebuje pouze dvě žíly, tak bylo možné použít kabel pro simulaci dvojnásobné délky, než je délka kabelu. Tím bylo dosaženo měření pro vzdálenosti do 500 metrů.

#### Zapojení portů patch panelu

- 1. port - jednometrový kabel sloužící pro připojení do DSLAMu
- 2. - 3. port - mezi tyto porty je zapojen kabel o délce 20 metrů
- 4. - 5. port - mezi tyto porty je zapojen kabel o délce 30 metrů
- 6. - 7. port - mezi tyto porty je zapojen kabel o délce 50 metrů
- 8. - 9. port - mezi tyto porty je zapojen kabel o délce 50 metrů
- 10. - 11. port - mezi tyto porty je zapojen kabel o délce 100 metrů
- 12. port - slouží pro připojení DSL linek do modemu

### 5.2 Zapojení pro měření pomocí testerů

Měření s testery byla prováděna podle zapojení na obrázku 5.1. Tester ze strany DSLAMu je připojen pomocí optického vlákna. Optické vlákno je použito proto, aby připojení testeru mělo minimální vliv na vlastnosti testovaných DSL technologií. Pro přesné výsledky budou u všech měření použity dva testery. Použití dvou testerů umožňuje měřit parametry sítě pro oba směry přenosu zároveň.



Obr. 5.1: Schéma zapojení pro měření

## 5.3 Konfigurace DSLAMU

Postup konfigurace DSL bondingu na DSLAMu Nokia v laboratoři byl nastudován z uživatelského manuálu DSLAMu [9]. Resetování LT desky DSLAMu není podle manuálu povinné pro vytvoření sdružené skupiny linek. Při vytváření sdružené skupiny linek bez předchozího resetování LT desky DSLAM hlásil neznámou chybu. Následně se zjistilo, že po resetování LT desky bylo umožněno úspěšně vytvořit sdruženou skupinu linek. Sdružená skupina linek se přidala do VLANu a tím byla konfigurace bondingu na DSLAMu dokončena.

**Použité CLI příkazy pro vytvoření sdružené skupiny DSL linek a přiřazení VLAN**

1. `configure equipment slot lt:1/1/1 no planned-type`
2. `configure equipment slot lt:1/1/1 planned-type rdlt-c`
3. `configure xdsl line 1/1/1/9 service-profile 10 spectrum-profile 10 rtx-profile 10 vect-profile 10 transfer-mode ptm admin-up`
4. `configure xdsl line 1/1/1/10 service-profile 10 spectrum-profile 10 rtx-profile 10 vect-profile 10 transfer-mode ptm admin-up`
5. `configure xdsl-bonding group-profile 1 name XBOND local-profile version 1`
6. `configure xdsl-bonding group-assembly-time 0`
7. `configure xdsl-bonding group-profile 1 active`
8. `configure xdsl-bonding group 1/1/1/9 group-profile name:XBOND`
9. `configure xdsl-bonding group 1/1/1/9 link 1/1/1/10`
10. `configure xdsl-bonding group 1/1/1/9 up`
11. `configure bridge port 1/1/1/9 vlan-id 109 l2fwder-vlan 304 vlan-scope local`

**Popis jednotlivých příkazů**

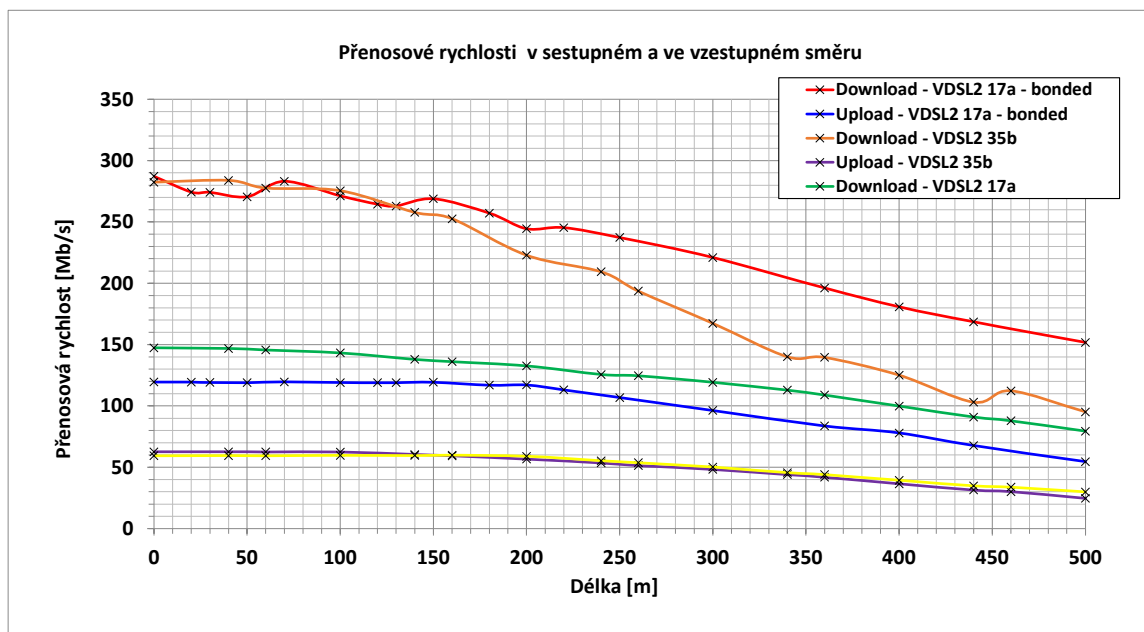
První příkaz odplánuje LT desku, kterou následně druhý příkaz znovu naplánuje. Tím se veškerá konfigurace DSL linek smaže. Třetí a čtvrtý příkaz přiřazuje DSL linkám DSL profily a způsob přenosu. Pátý příkaz vytvoří profil sdružené skupiny DSL linek. Sedmý příkaz aktivuje profil sdružené skupiny DSL linek. Osmý příkaz vytvoří sdruženou skupinu linek se zvolenou primární DSL linkou číslo 9 a profilem sdružených linek XBOND, který byl vytvořen v předchozích třech příkazech. Devátý příkaz přidá linku číslo 10 do sdružené skupiny linek. Desátý příkaz aktivuje sdruženou skupinu linek. Na závěr jedenáctý příkaz přidá sdruženou skupinu linek do VLANu a tím je konfigurace DSL bondingu dokončena.

## 5.4 Konfigurace modemu Zyxel VMG4005

Modem byl propojen s DSLAMem pomocí dvou linek, které byly zapojeny do portů 9 a 10 u DSLAMu. Tyto porty byly nakonfigurovány pro DSL bonding. Modem byl nakonfigurován pomocí webového uživatelského rozhraní modemu. Po přihlášení pomocí výchozích přístupových údajů, které se nachází na štítku na zadní straně modemu, byl spuštěn quick start wizard. Quick start wizard automaticky detekoval způsob připojení k internetu. Po ukončení quick start wizardu byl modem úspěšně nakonfigurován.

## 5.5 Měření rychlostí na aplikační vrstvě

Tímto měřením byla ověřena správnost funkce patch panelu pro všechny možné délky v rozsahu 0 až 500 metrů. Měřená rychlost byla odečítána pomocí lokálního speedtestu běžícího v lokální síti v laboratoři. Všechna ostatní měření v této práci jsou měřena pomocí testerů NetBlazer. Graf naměřených rychlostí se nachází na obrázku 5.2. Přenosové rychlosti ve vzestupném směru jsou u VDSL2 17a bez bondingu a VDSL2 35b stejné. Oba profily používají stejné frekvenční pásma pro vzestupný směr přenosu, proto jsou přenosové rychlosti pro tento směr přenosu stejné. Bonding VDSL2 17a dosahuje v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu dvojnásobných přenosových rychlostí v obou směrech přenosu jak při nulové vzdálenosti, tak i při vzdálenosti 500 metrů. Bonding VDSL2 17a a VDSL2 35b mají přibližně stejně vysoké přenosové rychlosti v sestupném směru přenosu při nízkých vzdálenostech (zhruba do 150 metrů). Se zvyšováním vzdálenosti se přenosové rychlosti bondingu VDSL2 17a a VDSL2 35b v sestupném směru začínají lišit. Ve vzdálenosti 300 metrů má bonding VDSL2 17a o 32% vyšší přenosovou rychlost v sestupném směru v porovnání s VDSL2 35b. Při vzdálenosti 500 metrů se přenosové rychlosti bondingu VDSL2 17a a VDSL2 35b liší o 60%.



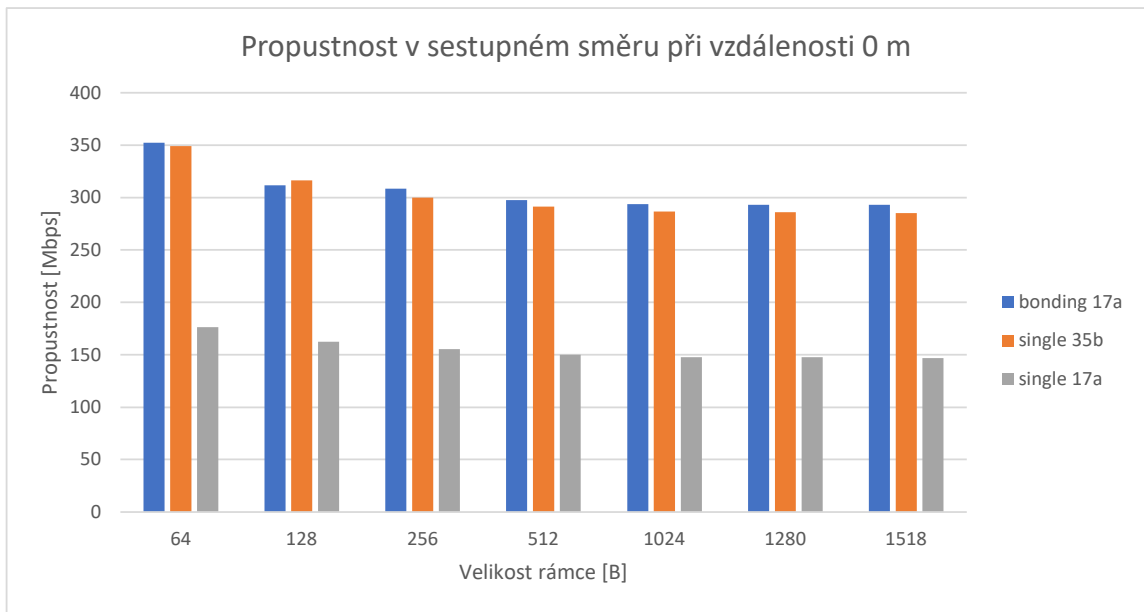
Obr. 5.2: Porovnání přenosových rychlostí na aplikační vrstvě

## 5.6 Měření podle RFC2544

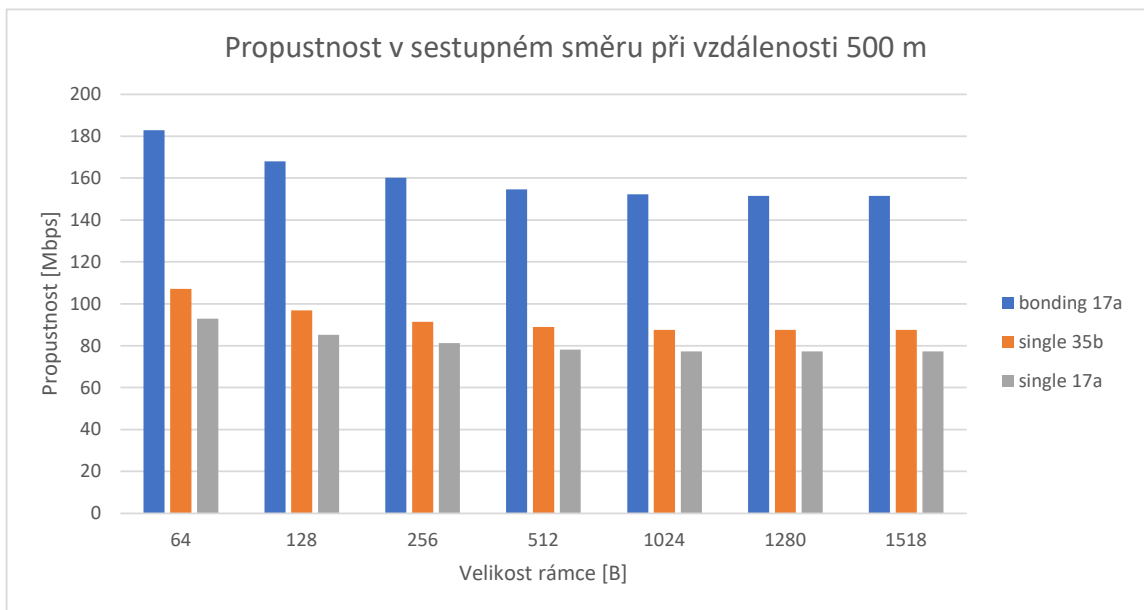
### 5.6.1 Měření propustnosti

Měření přenosové rychlosti na fyzické vrstvě také potvrdilo, že bonding VDSL2 17a dosahuje dvojnásobných přenosových rychlostí v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu. Při vzdálenosti nula metrů, jak je vidět na obrázku 5.3, dosahuje bonding VDSL2 17a stejných přenosových rychlostí jako VDSL2 35b. VDSL2 35b používá dvojnásobný počet frekvenčních kanálů pro přenos v sestupném směru v porovnání s profilem VDSL2 17a bez bondingu. V důsledku toho dosahuje také dvojnásobných přenosových rychlostí v sestupném směru v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu. V grafu na obrázku 5.4 jsou vidět přenosové rychlosti pro sestupný směr při vzdálenosti 500 metrů. Je vidět, že při vzdálenosti 500 metrů dosahuje VDSL2 35b pouze o 10% vyšších přenosových rychlostí v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu. Bonding VDSL2 17a dosahuje dvojnásobných přenosových rychlostí i při vzdálenosti 500 metrů v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu.





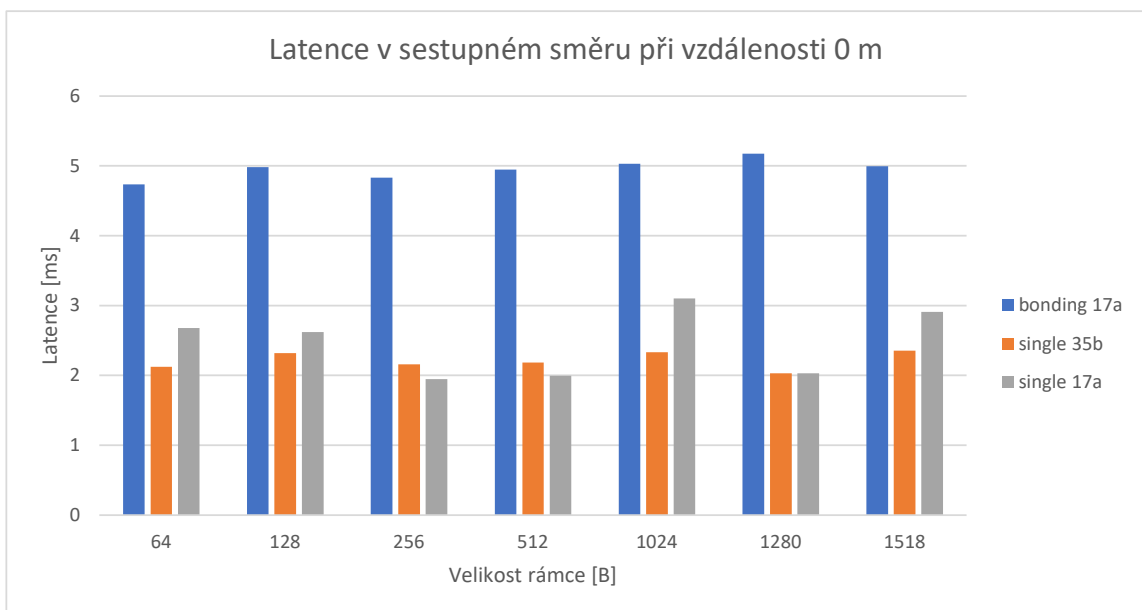
Obr. 5.3: Porovnání propustnosti při vzdálenosti 0 metrů



Obr. 5.4: Porovnání propustnosti při vzdálenosti 0 metrů

## 5.6.2 Měření latence

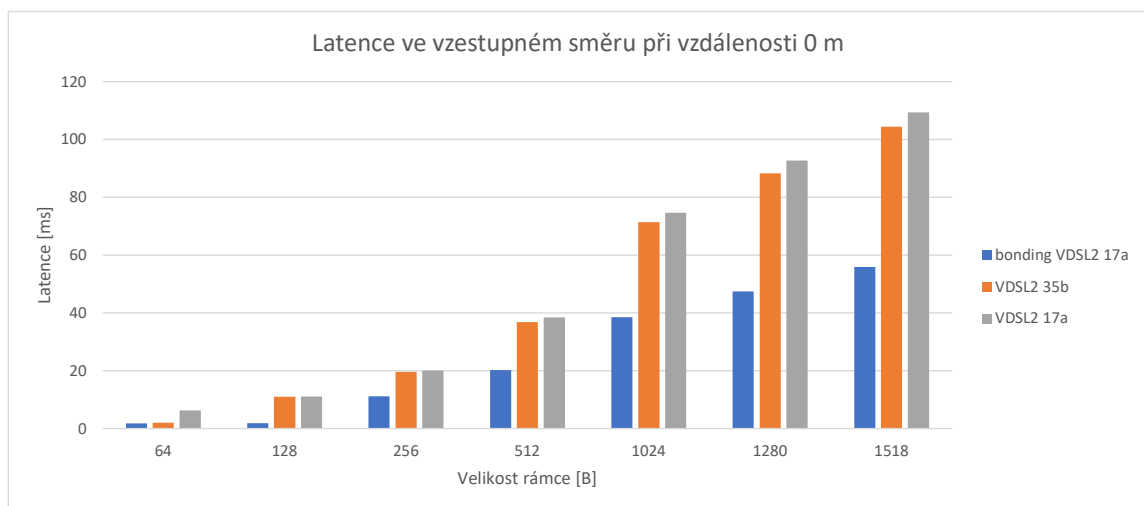
Z výsledků měření latence zpracovaných do grafu na obrázku 5.5 vyplývá, že xDSL bonding má vliv na latenci připojení. Při nulové vzdálenosti modemu od DSLAMu dosahuje bonding VDSL2 17a přibližně dvojnásobné latence v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu a VDSL2 35b. Tento nárůst latence bondingu VDSL2 17a v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu je nejpravděpodobněji v důsledku fragmentace rámců pro přenos po více DSL linkách zároveň. Každý přenášený rámec se při použití bondingu rozdělí do několika fragmentů. Tyto fragmenty jsou odeslány sloučenými DSL linkami (každý fragment je odeslán pouze jednou ze sdružených DSL linek) a následně se na koncovém zařízení z přijatých fragmentů poskládá zpět původní rámec. Fungování bondingu je podrobněji popsáno v teoretické části práce v kapitole xDSL bonding. Dále z grafu vyplývá, že velikost přenášených rámců nemá vliv na latenci připojení. To znamená, že síťové zařízení zpracuje velký rámec za přibližně stejnou dobu jako rámec s malou velikostí. Výsledky měření latence pro vzestupný



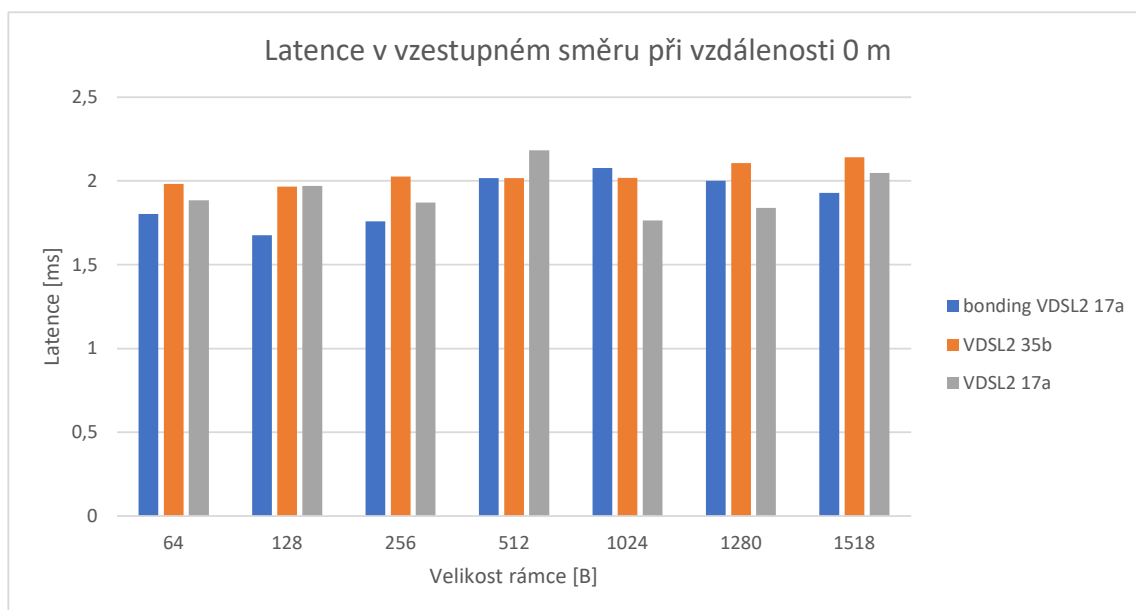
Obr. 5.5: Porovnání latence v sestupném směru při vzdálenosti 0 metrů

směr na obrázku 5.6 se výrazně liší od výsledků měření latence pro sestupný směr. Podle doporučení RFC 2544 se měření latence provádí při maximální přenosové rychlosti pro daný směr přenosu. Z grafu na obrázku 5.6 je vidět, že při větších velikostech přenášených rámců dochází k výraznému nárůstu latence. Může to být

způsobeno přetížením použitého modemu v důsledku přenosu dat při maximální přenosové rychlosti. Pro velikost rámce 1518 bajtů dosahovala latence hodnoty přes 100 milisekund. Takto vysoká latence by mohla mít negativní vliv především na služby pracující v reálném čase. Pro ověření, že výrazný nárůst latence ve vzestupném směru přenosu je způsoben přetížením použitého modemu, a nikoliv použitou DSL technologií, se měření latence zopakovalo při nižší přenosové rychlosti než je maximální přenosová rychlost. Použitá přenosová rychlost odpovídala 80% maximální přenosové rychlosti. Výsledky opakovaného měření latence jsou vidět na obrázku 5.7. Z tohoto grafu lze vidět, že velikost rámce nemá výrazný vliv na latenci ani ve vzestupném směru přenosu. Výsledky opakovaného měření latence při použití nižší přenosové rychlosti také prokázaly, že měření latence při maximální přenosové rychlosti není vhodné, protože výsledky měření mohou být ovlivněny přetížením síťových zařízení.



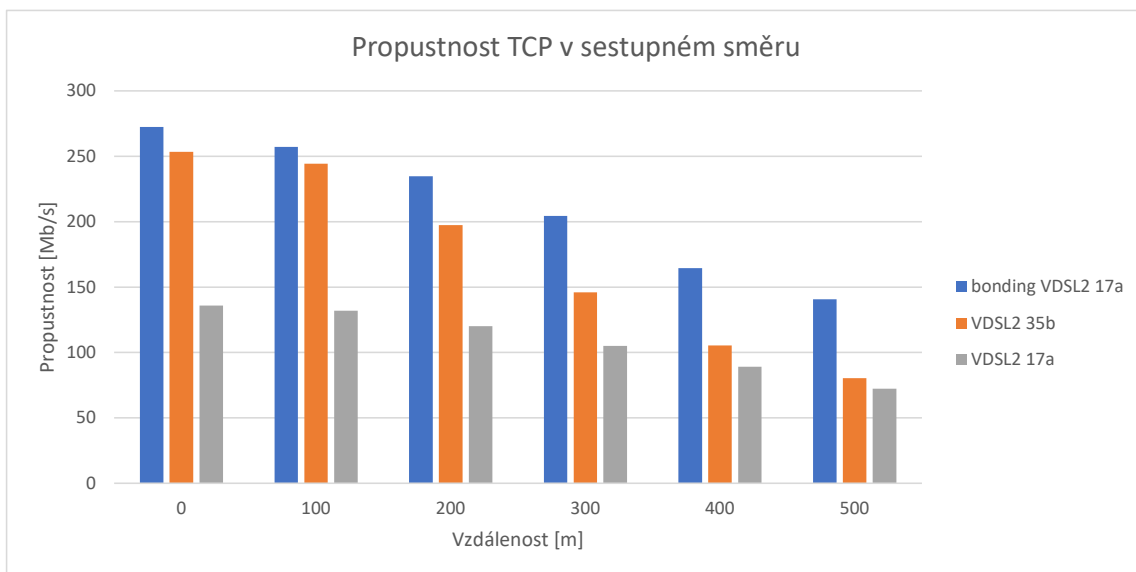
Obr. 5.6: Porovnání latence ve vzestupném směru při vzdálenosti 0 metrů



Obr. 5.7: Porovnání latence v vzestupném směru měřené při 80 % maximální přenosové rychlosti

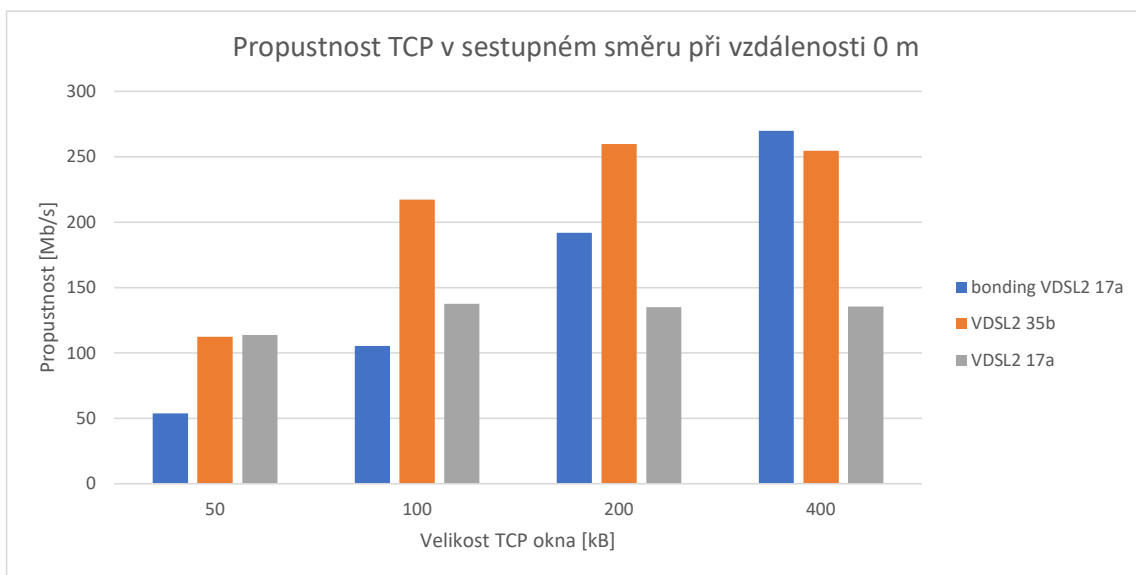
## 5.7 Měření podle RFC6349

Naměřené přenosové rychlosti TCP protokolu na obrázku 5.8 potvrdily, že bonding VDSL2 17a dosahuje dvojnásobných přenosových rychlostí i na úrovni síťové vrstvy v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu. Přenosové rychlosti TCP protokolu jsou nižší v porovnání s přenosovými rychlostmi získanými v měření podle doporučení RFC 2544. Je to způsobeno přenosem režijních dat, jejichž přenos zabírá část přenosové rychlosti. Jedná se především o hlavičky TCP protokolu a IP protokolu. Informace přenášené v těchto hlavičkách zajišťují správnou funkci TCP a IP protokolu. Z měření přenosové rychlosti TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna na obrázku 5.9 se zjistilo, že bonding VDSL2 17a dosahuje polovičních přenosových rychlostí při nízké velikosti TCP okna v porovnání se samostatnou linkou VDSL2 17a a VDSL2 35b. VDSL2 35b dosahuje maximální přenosové rychlosti již při velikosti TCP okna 200 KB. Samostatná linka VDSL2 17a dosahuje maximální přenosové rychlosti při velikosti TCP okna 100 KB a bonding VDSL2 17a dosahuje maximální přenosové rychlosti až při velikosti TCP okna 400 KB. Velikosti RTT zpoždění pro sestupný směr jsou vidět v grafu na obrázku 5.10. RTT zpoždění udává dobu od odeslání TCP segmentu do přijmutí potvrzení o zpracování odeslaného TCP segmentu. Obdobně jako při měření latence podle doporučení RFC 2544

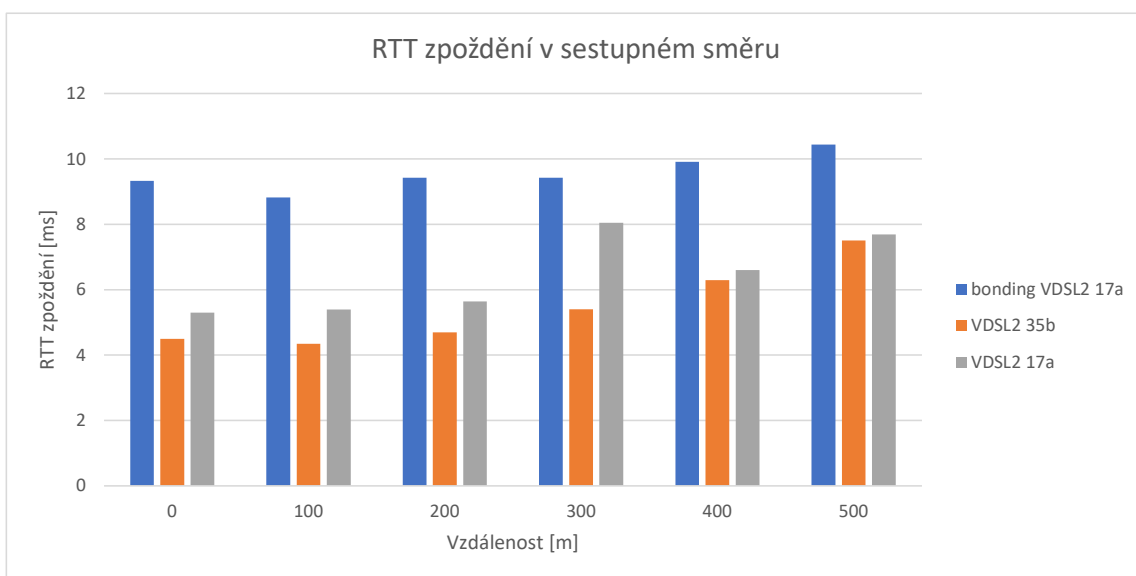


Obr. 5.8: Porovnání přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na vzdálenosti

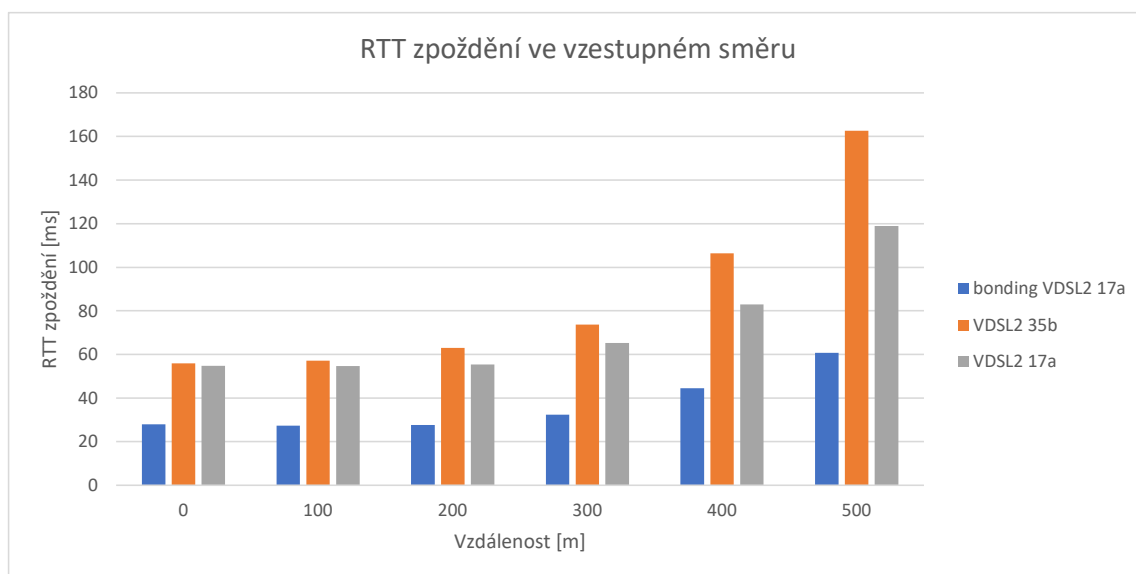
se při měření RTT zpoždění prokázalo, že bonding má vliv na zpoždění přenosu. Se zvyšující se vzdáleností se velikost RTT zpoždění u bondingu VDSL2 17a zvýšila pouze o 10% v porovnání s velikostí RTT zpoždění bondingu VDSL2 17a při vzdálenosti 0 metrů. Při vzdálenosti 500 metrů se velikost RTT zpoždění bondingu VDSL2 17a liší pouze o 3 milisekundy v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu a VDSL2 35b. Při měření RTT zpoždění ve vzestupném směru přenosu došlo k skokovému nárůstu RTT zpoždění. Obdobně jako při měření latence ve vzestupném směru podle doporučení RFC 2544. Je to zapříčiněno přetížením modemu v důsledku přenosu při maximální přenosové rychlosti dané DSL technologií. Měření nemohlo být zopakováno při nižší přenosové rychlosti, protože tester tuto možnost při testu RFC 6349 neumožňoval.



Obr. 5.9: Porovnání přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna



Obr. 5.10: Porovnání RTT zpoždění v závislosti na vzdálenosti v sestupném směru přenosu



Obr. 5.11: Porovnání RTT zpoždění v závislosti na vzdálenosti ve vzestupném směru přenosu

## 5.8 Měření podle Y1564

Měření pro sestupný směr přenosu bylo provedeno pro služby nakonfigurované podle tabulky 5.1. Celková přenosová rychlost testovaných služeb byla volena tak, aby bylo možné použít stejnou konfiguraci služeb pro všechny testované DSL technologie. Obdobným způsobem byly voleny služby pro měření ve vzestupném směru přenosu. Doba trvání testů byla nastavena na deset minut.

| Služba                     | Velikost rámce [B]       | Přenosová rychlost [Mb/s] |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Data                       | 70,128,512,1024,1518 MIX | 50                        |
| 10 VoIP hovorů             | 138                      | 1,264                     |
| 2 streamy videa            | 1374                     | 21,185                    |
| Celková přenosová rychlost |                          | 72,449                    |

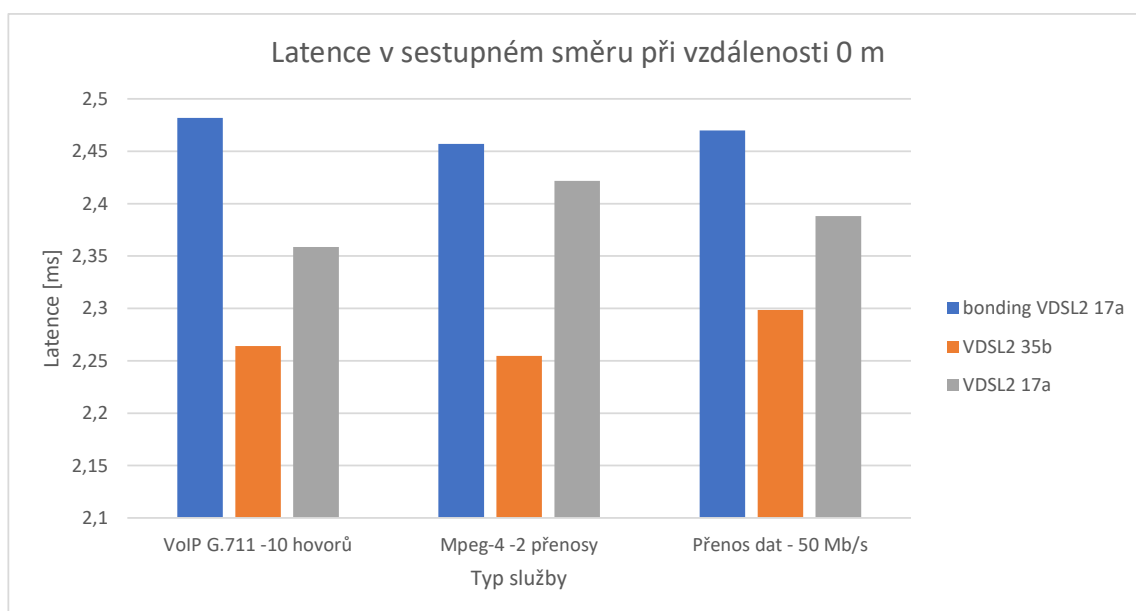
Tab. 5.1: Konfigurace služeb pro sestupný směr při měření podle doporučení Y1564

Výsledky měření latence pro sestupný směr přenosu při nulové vzdálenosti DSLAMu od modemu byly zpracovány do grafu na obrázku 5.12. Velikost latence bondingu VDSL2 17a je vyšší pouze o několik desetin milisekundy při nulové vzdálenosti v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu a VDSL2 35b. Se zvýšením vzdálenosti modemu

| Služba                     | Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mb/s] |
|----------------------------|--------------------|---------------------------|
| 10 VoIP hovorů             | 138                | 1,264                     |
| 2 streamy videa            | 1374               | 21,185                    |
| Celková přenosová rychlost |                    | 22,449                    |

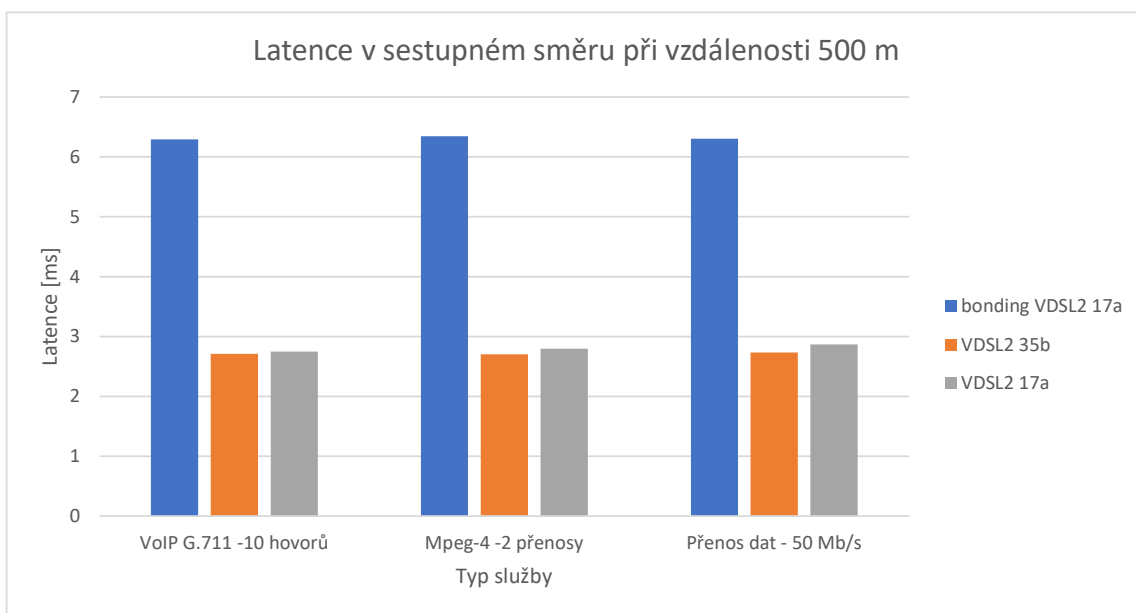
Tab. 5.2: Konfigurace služeb pro vzestupný směr při měření podle doporučení Y1564

od DSLAMu došlo k více než dvojnásobnému zvýšení latence u bondingu VDSL2 17a. U VDSL2 35b a VDSL2 17a bez bondingu došlo k zvýšení latence pouze o pár desetin milisekundy. Z grafů na obrázku 5.14 a obrázku 5.15 je vidět, že se zvyšující se vzdáleností došlo k nárůstu latence bondingu VDSL2 17a také u vzestupného směru přenosu.

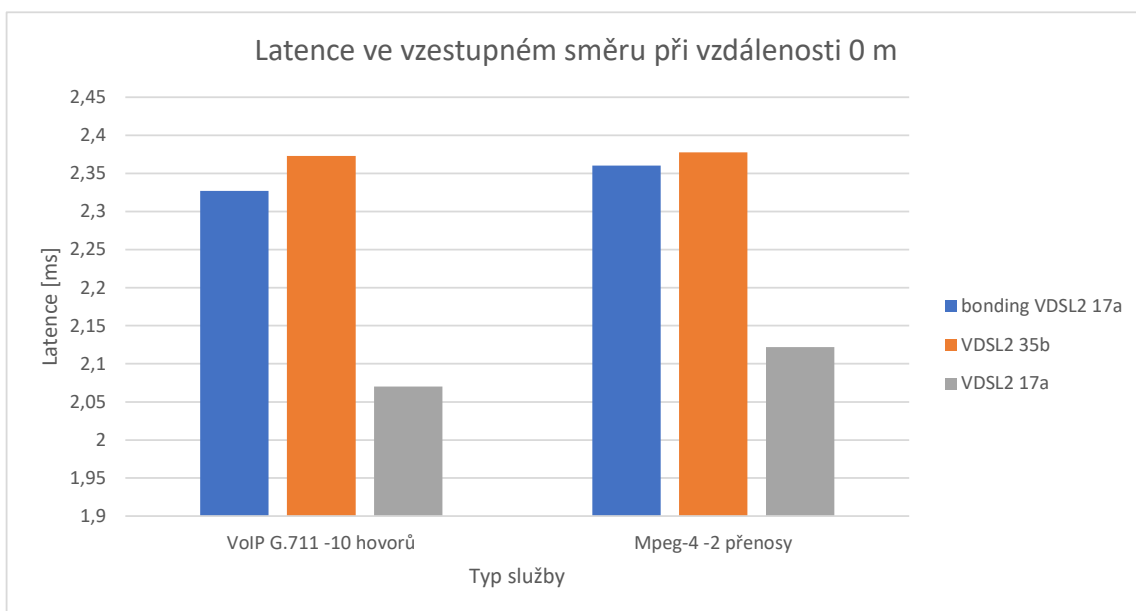


Obr. 5.12: Porovnání latence v sestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 0 metrů

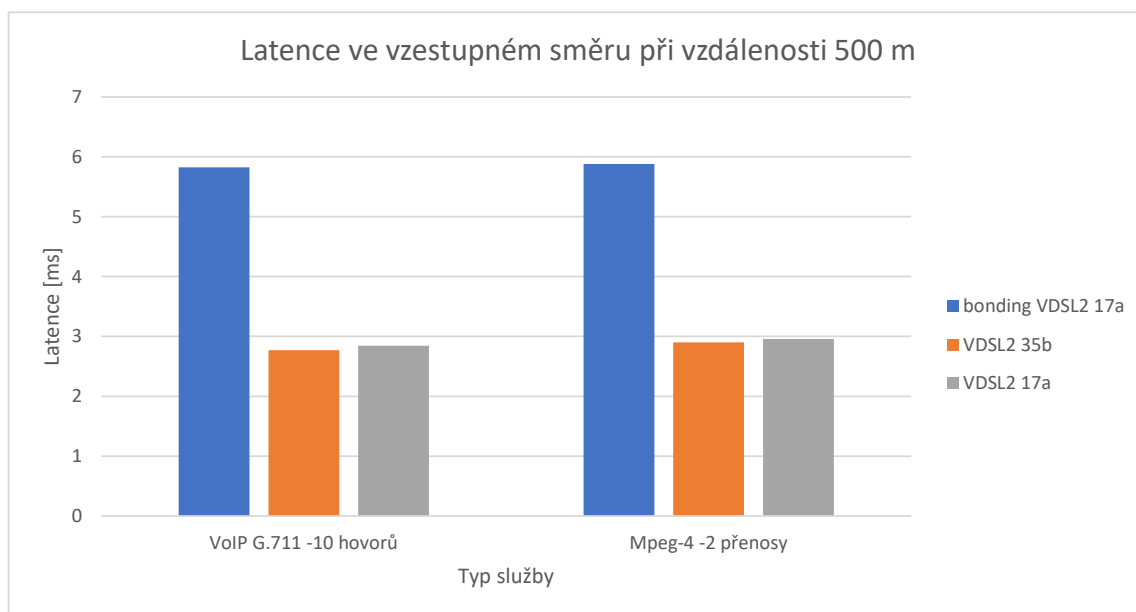




Obr. 5.13: Porovnání latence v sestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 500 metrů



Obr. 5.14: Porovnání latence ve vzestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 0 metrů



Obr. 5.15: Porovnání latence ve vzestupném směru přenosu při měření podle doporučení Y1564 ve vzdálenosti 500 metrů

## 5.9 Porovnání testovaných DSL technologií

Z měření podle doporučení RFC2544 bylo potvrzeno, že bonding VDSL2 17a dosahuje dvojnásobných přenosových rychlostí pro oba směry přenosu v porovnání s VDSL2 17a bez použití bondingu jak při krátkých vzdálenostech, tak i při delších vzdálenostech modemu od DSLAMu. Vyšší hodnoty latence při použití bondingu v porovnání s ostatními testovanými VDSL2 technologiemi nebudou mít znatelný vliv na uživatelský zážitek koncového uživatele. Velikost latence bondingu VDSL2 17a v porovnání se samostatnou linkou s profilem VDSL2 17a a VDSL2 35b se liší při vzdálenosti 500 metrů od DSLAMu maximálně o 5 milisekund. Takový rozdíl latence nebude mít vliv ani na služby pracující v reálném čase. Mezi tyto služby patří například videohovor či streamování živého videa. Při měření podle doporučení RFC 6349 se zjistilo, že bonding VDSL2 17a dosahuje při nízkých velikostech TCP okna (test byl proveden pro velikost TCP okna 80kB) zhruba polovičních přenosových rychlostí TCP protokolu v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu a VDSL 35b. Při správně nakonfigurovaném TCP protokolu nebude velikost TCP okna dosahovat takto nízkých hodnot, jako při provedeném měření. Proto snížení přenosové rychlosti TCP protokolu při nízké velikosti TCP okna také nebude mít vliv na uživatelský zážitek koncových uživatelů DSL připojení. Při velikostech TCP okna vyšších než 400 kB již

není přenosová rychlost TCP protokolu u bondingu VDSL2 17a negativně ovlivněna. Nízká velikost TCP okna vynucuje přenos dat ve velkém množství malých TCP segmentů. Ke každému TCP segmentu je přidáno množství režijních dat. Jde především o hlavičky IP protokolu a Ethernet protokolu, které mají zpravidla neměnnou velikost v závislosti na velikosti TCP segmentu. V důsledku toho je přenosová rychlost dat přenášených uvnitř TCP segmentu při použití malých TCP segmentů nižší než při použití velkých TCP segmentů. [7]. Při přenosu dat pomocí bondingu dochází k fragmentaci přenášených rámců. Fragmentací rámců, které mají nízkou velikost v důsledku nízké velikosti TCP okna, vzniknou ještě menší fragmenty těchto malých rámců, které se následně přenášejí sdruženými linkami. Při fragmentaci se do fragmentů rámců přidávají také režijní data, které slouží například k identifikaci pořadí fragmentů. Velké množství režijních dat a malé velikosti TCP segmentů u bondingu VDSL2 17a mohou způsobovat nižší přenosové rychlosti při malých velikostech TCP okna v porovnání s VDSL2 17a bez bondingu a VDSL2 35b. Měření podle doporučení Y1584 odhalilo, že při krátkých vzdálenostech modemu od DSLAMu dochází u bondingu k nárůstu latence pouze při přenosových rychlostech blízcích se maximální přenosové rychlosti. Tento jev byl také potvrzen při opakovaném měření latence pro vzestupný směr podle doporučení RFC 2544. Měření se provádělo při 80% maximální přenosové rychlosti a v grafu naměřených latencí na obrázku 5.7 je vidět, že latence jsou pro všechny testované DSL technologie přibližně stejné. Při vzdálenosti 500 metrů dochází k nárůstu latence u bondingu VDSL2 17a i při přenosových rychlostech neblízcích se maximální přenosové rychlosti. Opět se jednalo o rozdíl latence v řádu jednotek milisekund.

## Závěr

Bakalářská práce se zabývá technologií DSL bondingu. Postupně se podařilo splnit všechny body zadání bakalářské práce. Prvními body zadání bylo nastudovat metodu DSL bondingu a zprovoznit DSL bonding na DSLAMu a modemu v laboratoři. Konfigurace DSL bondingu na modemu a DSLAMu v laboratoři je popsána na začátku praktické části bakalářské práce. Dalším bodem zadání bylo zkonstruovat experimentální vedení, které bude sloužit pro simulaci délky DSL vedení. Tento bod zadání se také podařilo splnit. Zkonstruované experimentální vedení umožňuje volit délku DSL vedení v rozsahu 0 až 500 metrů. Následujícím bodem zadání bylo měřit vlastnosti DSL technologií pomocí síťových testerů Exfo NetBlazer. Provedenými měřeními pomocí síťových testerů Exfo NetBlazer se podařilo naměřit parametry DSL připojení při použití DSL bondingu s profilem VDSL2 17. Měření byla také provedena u DSL technologie VDSL2 35b a VDSL2 17a bez použití bondingu. Jednotlivá měření se prováděla při různých délkách DSL vedení. Délka DSL vedení se nastavovala pomocí experimentálního vedení, které bylo úspěšně zkonstruováno v rámci této bakalářské práce. Největšího důrazu při měřeních bylo kladeno na hodnoty přenosových rychlostí a hodnoty zpoždění DSL připojení v závislosti na délce DSL vedení. Z naměřených hodnot se sestrojily grafy, které jsou prezentovány a popsány v praktické části práce. Z výsledků provedených měření se prokázalo, že DSL bonding je metoda, která umožňuje zvýšení přenosové rychlosti DSL připojení i u DSL přípojek vzdálených 500 metrů a více od DSLAMu. Z grafu na obrázku 5.2, který porovnává přenosové rychlosti jednotlivých testovaných DSL technologií v závislosti na vzdálenosti, je vidět, že technologie VDSL2 35b dosahuje ve vzdálenosti 500 metrů téměř stejných přenosových rychlostí jako technologie VDSL2 17a, takže VDSL2 35b umožňuje zvýšit přenosové rychlosti DSL připojení v porovnání s VDSL2 17a pouze při krátkých vzdálenostech. Zatímco bonding VDSL2 17a dosahuje dvojnásobných přenosových rychlostí pro oba směry přenosu i při vzdálenosti 500 metrů. Dále se z provedených měření zjistilo, že bonding má negativní vliv na latenci DSL připojení. Nárůst latence je v řádu jednotek milisekund, takže tento nárůst latence nebude negativně ovlivňovat uživatelský zážitek koncových uživatelů DSL připojení. V rámci všech provedených měření se nezjistil ani jeden faktor, ve kterém by DSL bonding výrazně negativně ovlivnil parametry DSL připojení. Tak snad jedinou nevýhodou DSL bondingu v porovnání s ostatními testovanými DSL technologiemi je nutnost použití dvou párů vodičů. Kdežto DSL technologie nepoužívající bonding pracují na jediném páru vodičů. Při některých měřeních se získaly nepředpokládané hodnoty. Například při měření latence ve vzestupném směru podle doporučení RFC 2544 docházelo k skokovému nárůstu latence u všech testovaných DSL technologií. Následně se zjistilo, že nárůst latence je způsoben přetížením modemu. Měření la-

tence podle doporučení RFC 2544 se provádí při maximální přenosové rychlosti a pro oba směry přenosu zároveň, proto může dojít k přetížení síťových zařízení v testované síti. Tím se zjistilo, že pro měření latence je vhodnější doporučení Y1584, které měří latenci při uživatelem definovaných přenosových rychlostech. Posledním bodem zadání bylo vytvoření demonstrační laborní úlohy. Tento bod zadání se také splnil. Návrh laboratorní úlohy se nachází v přílohách bakalářské práce.

## Literatura

- [1] The International Telecommunication Union (ITU). *Recommendation ITU-T G.991.1: High bit rate digital subscriber line (HDSL) transceivers*. 1998. Dostupné z URL:  [<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.991.1/en>](https://www.itu.int/rec/T-REC-G.991.1/en).
- [2] The International Telecommunication Union (ITU). *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS: Overview of digital subscriber line Recommendations*. 2011. Dostupné z URL:  [<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup50-201109-I/en>](https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup50-201109-I/en).
- [3] The International Telecommunication Union (ITU). *Recommendation ITU-T G.993.2: Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)*. 2019. Dostupné z URL:  [<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2-201902-I/en>](https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2-201902-I/en).
- [4] The International Telecommunication Union (ITU). *Recommendation ITU-T G.998.2: Ethernet-based multi-pair bonding*. 2018. Dostupné z URL:  [<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.998.2-201811-I/en>](https://www.itu.int/rec/T-REC-G.998.2-201811-I/en).
- [5] Internet Engineering Task Force (IETF). *RFC2544: Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices*. 1999. Dostupné z URL:  [<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2544>](https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2544).
- [6] Internet Engineering Task Force (IETF). *RFC6349: Framework for TCP Throughput Testing*. 2011. Dostupné z URL:  [<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6349>](https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6349).
- [7] Internet Engineering Task Force (IETF). *RFC793: TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL*. 1981. Dostupné z URL:  [<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc793>](https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc793).
- [8] The International Telecommunication Union (ITU). *Recommendation ITU-T Y.1564: Ethernet service activation test methodology*. 2016. Dostupné z URL:  [<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1564/en>](https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1564/en).
- [9] Nokia. *Operations and Maintenance Using CLI for 7363 ISAM MX and 7367 ISAM SX/DX*.
- [10] Nokia. *System Description for 7363 ISAM MX and 7367 ISAM SX/DX*.

- [11] JAREŠ, Petr. *Digitální účastnická přípojka VDSL2*. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. Dostupné z URL: <https://docplayer.cz/2324680-Digitalni-ucastnicka-pripojka-vdsl2-petr-jares.html>.

## Seznam symbolů a zkratek

|               |  |
|---------------|--|
| <b>ADSL</b>   | Asymmetric Digital Subscriber Line             |
| <b>ATM</b>    | Asynchronous Transfer Mode                     |
| <b>ATM</b>    | Asynchronous Transfer Mode                     |
| <b>BACP</b>   | Bonding aggregation control protocol           |
| <b>BACPDU</b> | Bonding aggregation control protocol data unit |
| <b>BCE</b>    | Bonding control engine                         |
| <b>DSL</b>    | Digital Subscriber Line                        |
| <b>DSLAM</b>  | Digital Subscriber Line Access Multiplexer     |
| <b>GID</b>    | Group ID                                       |
| <b>IETF</b>   | Internet Engineering Task Force                |
| <b>IP</b>     | Internet Protocol                              |
| <b>ITU</b>    | International Telecommunication Union          |
| <b>PCS</b>    | Physical coding sublayer                       |
| <b>PME ID</b> | Physical media entity ID                       |
| <b>PAF</b>    | Physical media entity aggregation function     |
| <b>PMD</b>    | Physical Media Dependent                       |
| <b>SLA</b>    | Service Level Agreement                        |
| <b>TLV</b>    | Type–length–value                              |
| <b>TCP</b>    | Transmission Control Protocol                  |
| <b>VDSL</b>   | Very High Speed DSL                            |
| <b>VLAN</b>   | Virtual Local Area Network                     |



# Seznam příloh

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>A</b> | <b>Laboratorní úloha - DSL bonding</b> | <b>54</b> |
| A.1      | Teoretický úvod . . . . .              | 54        |
| A.2      | Zadání . . . . .                       | 54        |
| A.3      | Postup měření . . . . .                | 54        |
| A.3.1    | Volba simulované vzdálenosti . . . . . | 54        |
| A.3.2    | Měření přenosové rychlosti . . . . .   | 55        |
| A.4      | Kontrolní otázky . . . . .             | 56        |
| <b>B</b> | <b>Naměřené hodnoty</b>                | <b>57</b> |

# A Laboratorní úloha - DSL bonding

## A.1 Teoretický úvod

DSL bonding je metoda umožňující přenos dat po více DSL linkách zároveň. Princip DSL bondingu spočívá ve fragmentaci přenášených rámců a následném přenosu těchto fragmentů jednotlivými sdruženými DSL linkami zapojenými do DSL bondingu. Koncová zařízení používající DSL bonding si mezi sebou vyměňují informace o linkách zapojených do DSL bondingu. Mezi tyto informace patří především informace o tom, jestli je daná linka schopná přenosu, či nikoliv. Při výpadku jedné z DSL linek zapojených do DSL bondingu musí být koncová zařízení schopna tuto skutečnost detekovat, přerušit přenos po vypadené DSL lince a soustředit přenos dat do zbylých funkčních DSL linek zapojených do DSL bondingu. V rámci této laboratorní úlohy bude metoda bondingu použita na dvou DSL linkách používajících DSL technologii VDSL2 s profilem VDSL2 17a. Přenosové rychlosti bondingu se budou porovnávat se samostatnou linkou s VDSL2 17a a VDSL2 35b. VDSL2 35b používá dvojnásobný počet nosných pro sestupný směr (download) přenosu v porovnání s VDSL2 17a. V důsledku toho dosahuje dvojnásobných přenosových rychlostí v sestupném směru v porovnání s VDSL2 17a. Bonding VDSL2 17a dosahuje také dvojnásobných přenosových rychlostí v porovnání s VDSL2 17a. Cílem laboratorní úlohy je zjistit případné výhody/nevýhody DSL bondingu.

## A.2 Zadání

1. Změřte rychlosti downloadu a uploadu v závislosti na vzdálenosti modemu od DSLAMu u těchto DSL technologií: bonding VDSL2 17a, samostatná DSL linka s VDSL2 17a a samostatná DSL linka s VDSL2 35b
2. Z naměřených velikostí přenosových rychlostí vynesete graf a porovnejte jednotlivé testované DSL technologie

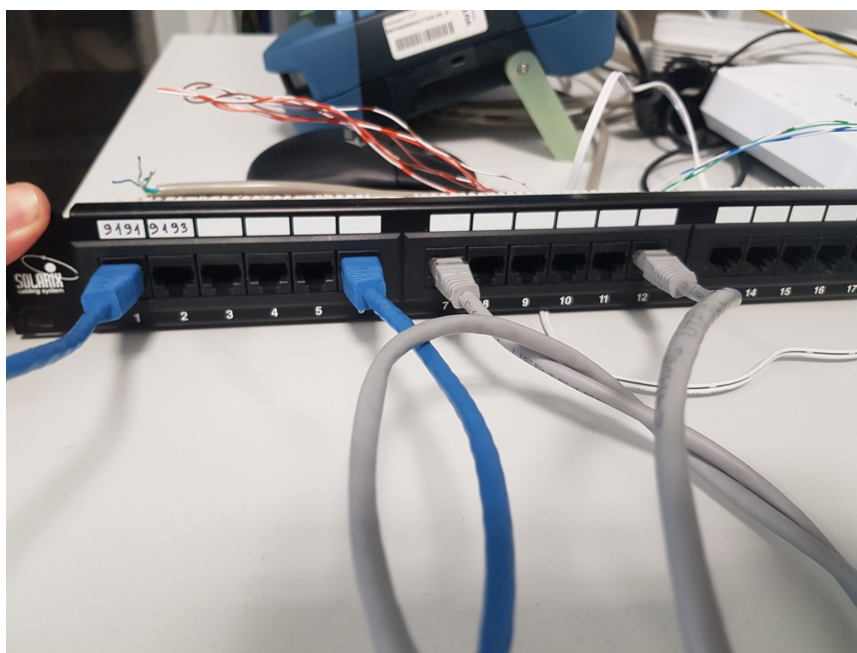
## A.3 Postup měření

### A.3.1 Volba simulované vzdálenosti

K simulaci délky vedení DSL linek bude sloužit připravený patch panel. Mezi porty patch panelu jsou zapojeny kabely různých délek. Délky kabelů pro dané porty jsou rozepsány v následujícím seznamu. Volba požadované vzdálenosti se provádí propojením jednotlivých portů patch panelu. Například pokud potřebujete simulovat vzdálenost 100 metrů, tak propojíte port 1 s portem 6 a port 7 s portem 12. Zapojení

pro simulaci vzdálenosti 100 metrů je také ukázáno na obrázku A.1. Simulace nulové vzdálenosti se provede propojením portu 1 s portem 12. Tím se DSLAM propojí napřímo s modemem. Postupným propojením všech portů se dosáhne maximální možné vzdálenosti 500 metrů.

- 1. port - 1 metrový kabel sloužící pro připojení do DSLAMu
- 2. - 3. port - mezi porty je zapojen kabel o délce 40 metrů
- 4. - 5. port - mezi porty je zapojen kabel o délce 60 metrů
- 6. - 7. port - mezi porty je zapojen kabel o délce 100 metrů
- 8. - 9. port - mezi porty je zapojen kabel o délce 100 metrů
- 10. - 11. port - mezi porty je zapojen kabel o délce 200 metrů
- 12. port - slouží pro připojení DSL linek do modemu



Obr. A.1: Zapojení patch panelu pro simulaci vzdálenosti 100 metrů

### A.3.2 Měření přenosové rychlosti

Po nastavení vzdálenosti na patch panelu zapojte obě dvě DSL linky do modemu a počkejte na dokončení inicializace DSL připojení (diody informující o stavu DSL linek na modemu přestanou blikat a budou trvale svítit). Měření přenosové rychlosti budete měřit pomocí lokálního speedtestu. Naměřené hodnoty si zaznamenávejte do tabulky v excelu. Zaznamenávejte si velikosti přenosových rychlostí pro oba směry přenosu (download i upload). Nejdříve změřte přenosové rychlosti bondingu VDSL2 17a, následně odpojte z modemu pouze jednu libovolnou DSL linku a změřte přenosové rychlosti samostatné linky s VDSL2 17a. Pro měření přenosové rychlosti

VDSL2 35b je nutné odpojit a znovu zapojit pouze jednu DSL linku do modemu. Tím dojde k opětovné inicializaci DSL připojení a modem by měl používat VDSL2 35b. Změřte přenosové rychlosti VDSL2 35b a zaznamenejte si je. Následně opakujte měření přenosových rychlostí pro jinou vzdálenost. Vzdálenost přidávejte postupně, dokud se nedostanete na vzdálenost 500 metrů. Na závěr vynesete graf porovnávající přenosové rychlosti jednotlivých DSL technologií v závislosti na vzdálenosti.

## **A.4 Kontrolní otázky**

1. Do jaké vzdálenosti jsou přenosové rychlosti (ve směru downstream) bondingu VDSL2 17a obdobné s přenosovými rychlostmi technologie VDSL2 35b ?
2. Dochází při použití DSL bondingu k výraznému zlepšení přenosových rychlostí i při delších vzdálenostech ?

## B Naměřené hodnoty

| Vzdálenost [m] | Download [Mb/s] | Upload [Mb/s] |
|----------------|-----------------|---------------|
| 0              | 287,27          | 119,5         |
| 20             | 274,32          | 119,4         |
| 30             | 274,15          | 119,12        |
| 50             | 270,52          | 118,98        |
| 70             | 283,11          | 119,58        |
| 100            | 271,22          | 119,06        |
| 120            | 264,47          | 118,94        |
| 130            | 263,03          | 119,01        |
| 150            | 268,92          | 119,35        |
| 180            | 257,24          | 116,97        |
| 200            | 244,49          | 117,05        |
| 220            | 245,4           | 113,15        |
| 250            | 237,35          | 106,82        |
| 300            | 221,03          | 96,36         |
| 360            | 196,13          | 83,72         |
| 400            | 180,77          | 78,01         |
| 440            | 168,56          | 67,74         |
| 500            | 151,76          | 54,61         |

Tab. B.1: Bonding VDSL2 17a - měření na aplikační vrstvě

| Vzdálenost [m] | Download [Mb/s] | Upload [Mb/s] |
|----------------|-----------------|---------------|
| 0              | 147,46          | 59,43         |
| 40             | 146,82          | 59,51         |
| 60             | 145,67          | 59,43         |
| 100            | 143,3           | 59,68         |
| 140            | 137,98          | 59,61         |
| 160            | 136,07          | 59,86         |
| 200            | 132,69          | 59,01         |
| 240            | 125,65          | 55,34         |
| 260            | 124,62          | 53,73         |
| 300            | 119,28          | 50,19         |
| 340            | 112,88          | 45,64         |
| 360            | 108,85          | 44,03         |
| 400            | 99,84           | 39,4          |
| 440            | 90,93           | 34,84         |
| 460            | 87,92           | 33,764        |
| 500            | 79,38           | 29,91         |

Tab. B.2: VDSL2 17a - měření na aplikační vrstvě

| Vzdálenost [m] | Download [Mb/s] | Upload [Mb/s] |
|----------------|-----------------|---------------|
| 0              | 282,4           | 62,57         |
| 40             | 283,9           | 62,57         |
| 60             | 277,6           | 62,56         |
| 100            | 275,53          | 62,4          |
| 140            | 257,84          | 60,42         |
| 160            | 252,68          | 59,31         |
| 200            | 222,86          | 56,7          |
| 240            | 209,44          | 53,56         |
| 260            | 193,64          | 51,42         |
| 300            | 167,28          | 48,23         |
| 340            | 140,07          | 44,08         |
| 360            | 139,55          | 41,92         |
| 400            | 125,06          | 36,53         |
| 440            | 103,12          | 31,48         |
| 460            | 112,28          | 30,09         |
| 500            | 95,1            | 24,71         |

Tab. B.3: VDSL2 35b - měření na aplikační vrstvě

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 352,343                     | 1,176                 | 41,224         | 4,7333       |
| 128                | 311,718                     | 1,011                 | 45,923         | 4,98157      |
| 256                | 308,593                     | 0,907                 | 48,459         | 4,83065      |
| 512                | 297,656                     | 0,889                 | 50,287         | 4,94743      |
| 1024               | 293,749                     | 0,91                  | 50,93          | 5,03072      |
| 1280               | 292,968                     | 0,915                 | 51,089         | 5,17338      |
| 1518               | 292,968                     | 0,935                 | 51,168         | 4,99428      |

Tab. B.4: Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 141,406                     | 0,265                 | 52,612         | 1,81311      |
| 128                | 130,468                     | 0,75                  | 56,266         | 1,92187      |
| 256                | 125                         | 1,373                 | 58,1           | 11,14992     |
| 512                | 121,874                     | 2,545                 | 59,262         | 20,21421     |
| 1024               | 122,656                     | 4,952                 | 59,079         | 38,48703     |
| 1280               | 123,437                     | 6,167                 | 58,737         | 47,49857     |
| 1518               | 124,218                     | 7,271                 | 58,421         | 55,87634     |

Tab. B.5: Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 342,187                     | 1,161                 | 42,878         | 7,78027      |
| 128                | 314,843                     | 0,993                 | 47,428         | 8,00015      |
| 256                | 299,999                     | 0,938                 | 49,901         | 8,33831      |
| 512                | 289,062                     | 0,898                 | 51,659         | 7,04022      |
| 1024               | 285,156                     | 0,91                  | 52,315         | 6,99162      |
| 1280               | 284,374                     | 0,904                 | 52,458         | 6,64364      |
| 1518               | 283,593                     | 0,935                 | 52,528         | 6,59688      |

Tab. B.6: Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 141,406                     | 0,263                 | 52,6           | 3,09384      |
| 128                | 130,468                     | 0,731                 | 56,282         | 1,9956       |
| 256                | 125                         | 1,366                 | 58,106         | 11,07584     |
| 512                | 121,874                     | 2,545                 | 59,257         | 20,08352     |
| 1024               | 122,656                     | 4,952                 | 59,085         | 38,61742     |
| 1280               | 123,437                     | 6,146                 | 58,743         | 47,58876     |
| 1518               | 124,218                     | 7,271                 | 58,425         | 55,93038     |

Tab. B.7: Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 269,531                     | 1,012                 | 54,143         | 8,53501      |
| 128                | 247,656                     | 0,889                 | 57,813         | 7,1          |
| 256                | 235,937                     | 0,792                 | 59,794         | 7,32809      |
| 512                | 228,124                     | 0,791                 | 61,21          | 8,57065      |
| 1024               | 224,999                     | 0,86                  | 61,723         | 8,89886      |
| 1280               | 224,218                     | 0,842                 | 61,848         | 8,47085      |
| 1518               | 223,437                     | 0,873                 | 61,93          | 7,176        |

Tab. B.8: Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 117,968                     | 0,26                  | 61,271         | 4,7341       |
| 128                | 108,593                     | 0,724                 | 64,255         | 7,61403      |
| 256                | 103,906                     | 1,322                 | 65,726         | 13,17284     |
| 512                | 101,562                     | 2,481                 | 66,601         | 24,14477     |
| 1024               | 102,343                     | 4,844                 | 66,326         | 45,87848     |
| 1280               | 103,124                     | 5,979                 | 65,978         | 57,01372     |
| 1518               | 104,687                     | 7,087                 | 65,651         | 66,62987     |

Tab. B.9: Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 182,812                     | 0,827                 | 70,377         | 6,03894      |
| 128                | 167,968                     | 0,763                 | 72,753         | 5,99285      |
| 256                | 160,156                     | 0,733                 | 74,028         | 5,87849      |
| 512                | 154,687                     | 0,689                 | 74,932         | 5,9456       |
| 1024               | 152,343                     | 0,743                 | 75,265         | 4,51667      |
| 1280               | 151,562                     | 0,738                 | 75,344         | 3,3097       |
| 1518               | 151,562                     | 0,713                 | 75,397         | 3,5263       |

Tab. B.10: Bonding VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 67,968                      | 0,259                 | 81,777         | 7,40192      |
| 128                | 62,5                        | 0,679                 | 83,125         | 8,12715      |
| 256                | 60,156                      | 1,234                 | 83,719         | 21,35226     |
| 512                | 59,375                      | 2,345                 | 83,936         | 41,28329     |
| 1024               | 60,937                      | 4,568                 | 83,433         | 78,94147     |
| 1280               | 61,718                      | 5,678                 | 83,09          | 97,27253     |
| 1518               | 62,5                        | 6,705                 | 82,766         | 114,8304     |

Tab. B.11: Bonding VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544



| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 176,562                     | 0,655                 | 70,606         | 2,67904      |
| 128                | 162,499                     | 0,578                 | 72,956         | 2,62092      |
| 256                | 155,468                     | 0,565                 | 74,21          | 1,94709      |
| 512                | 149,999                     | 0,57                  | 75,127         | 1,99317      |
| 1024               | 147,656                     | 0,567                 | 75,451         | 3,10123      |
| 1280               | 147,656                     | 0,551                 | 75,493         | 2,03077      |
| 1518               | 146,874                     | 0,578                 | 75,567         | 2,90904      |

Tab. B.12: VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 71,093                      | 0,264                 | 76,246         | 6,31838      |
| 128                | 65,625                      | 0,68                  | 78,032         | 11,11415     |
| 256                | 63,281                      | 1,254                 | 78,861         | 20,02745     |
| 512                | 61,718                      | 2,366                 | 79,264         | 38,44499     |
| 1024               | 63,281                      | 4,618                 | 78,812         | 74,63886     |
| 1280               | 64,062                      | 5,74                  | 78,472         | 92,75968     |
| 1518               | 64,843                      | 6,791                 | 78,152         | 109,39917    |

Tab. B.13: VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 171,874                     | 0,687                 | 71,288         | 4,65748      |
| 128                | 157,812                     | 0,612                 | 73,574         | 2,1206       |
| 256                | 150,781                     | 0,56                  | 74,805         | 4,9373       |
| 512                | 145,312                     | 0,566                 | 75,705         | 4,56725      |
| 1024               | 142,968                     | 0,576                 | 76,023         | 2,1107       |
| 1280               | 142,968                     | 0,572                 | 76,051         | 3,2933       |
| 1518               | 142,187                     | 0,602                 | 76,137         | 2,0414       |

Tab. B.14: VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 71,093                      | 0,26                  | 76,243         | 6,47658      |
| 128                | 65,625                      | 0,678                 | 78,033         | 11,08622     |
| 256                | 63,281                      | 1,256                 | 78,866         | 20,14923     |
| 512                | 61,718                      | 2,366                 | 79,26          | 38,51165     |
| 1024               | 63,281                      | 4,627                 | 78,812         | 74,67093     |
| 1280               | 64,062                      | 5,751                 | 78,469         | 92,73813     |
| 1518               | 64,843                      | 6,779                 | 78,152         | 107,45672    |

Tab. B.15: VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 138,281                     | 0,594                 | 76,787         | 9,16641      |
| 128                | 127,343                     | 0,557                 | 78,629         | 9,15606      |
| 256                | 121,093                     | 0,529                 | 79,64          | 8,95517      |
| 512                | 116,406                     | 0,519                 | 80,358         | 5,78232      |
| 1024               | 114,843                     | 0,534                 | 80,621         | 5,95728      |
| 1280               | 114,843                     | 0,561                 | 80,653         | 6,0063       |
| 1518               | 114,843                     | 0,565                 | 80,702         | 9,10069      |

Tab. B.16: VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 58,593                      | 0,268                 | 80,228         | 1,85799      |
| 128                | 53,906                      | 0,671                 | 81,705         | 1,79197      |
| 256                | 52,343                      | 1,236                 | 82,365         | 24,29632     |
| 512                | 51,562                      | 2,345                 | 82,639         | 46,38978     |
| 1024               | 53,125                      | 4,568                 | 82,15          | 90,16511     |
| 1280               | 53,906                      | 5,688                 | 81,8           | 111,69497    |
| 1518               | 54,687                      | 6,717                 | 81,479         | 131,92128    |

Tab. B.17: VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 92,968                      | 0,54                  | 84,661         | 6,87123      |
| 128                | 85,156                      | 0,504                 | 85,882         | 2,05065      |
| 256                | 81,25                       | 0,476                 | 86,551         | 2,19964      |
| 512                | 78,125                      | 0,489                 | 87,022         | 2,14671      |
| 1024               | 77,343                      | 0,492                 | 87,2           | 2,16329      |
| 1280               | 77,343                      | 0,509                 | 87,217         | 6,75356      |
| 1518               | 77,343                      | 0,504                 | 87,252         | 6,77843      |

Tab. B.18: VDSL2 17a - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 34,375                      | 0,268                 | 88,581         | 12,1201      |
| 128                | 32,031                      | 0,653                 | 89,388         | 21,86142     |
| 256                | 30,468                      | 1,209                 | 89,691         | 40,21226     |
| 512                | 30,468                      | 2,293                 | 89,7           | 78,66821     |
| 1024               | 32,031                      | 4,476                 | 89,121         | 154,31068    |
| 1280               | 33,593                      | 5,563                 | 88,768         | 191,35828    |
| 1518               | 34,375                      | 6,57                  | 88,443         | 225,56596    |

Tab. B.19: VDSL2 17a - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 349,218                     | 0,73                  | 41,667         | 2,1249       |
| 128                | 316,406                     | 0,657                 | 47,066         | 2,32054      |
| 256                | 299,999                     | 0,642                 | 49,879         | 2,15857      |
| 512                | 291,406                     | 0,642                 | 51,322         | 2,18317      |
| 1024               | 286,718                     | 0,676                 | 52,052         | 2,3328       |
| 1280               | 285,937                     | 0,655                 | 52,183         | 2,02944      |
| 1518               | 285,156                     | 0,664                 | 52,288         | 2,35654      |

Tab. B.20: VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 70,312                      | 0,393                 | 76,33          | 2,07876      |
| 128                | 69,531                      | 0,687                 | 76,78          | 11,03648     |
| 256                | 66,406                      | 1,249                 | 77,829         | 19,58184     |
| 512                | 65,625                      | 2,374                 | 78,103         | 36,78053     |
| 1024               | 66,406                      | 4,635                 | 77,709         | 71,39944     |
| 1280               | 67,187                      | 5,761                 | 77,425         | 88,27855     |
| 1518               | 67,968                      | 6,804                 | 77,148         | 104,48536    |

Tab. B.21: VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 0 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 335,937                     | 0,76                  | 43,509         | 1,86501      |
| 128                | 304,687                     | 0,658                 | 48,723         | 3,13342      |
| 256                | 288,281                     | 0,613                 | 51,461         | 1,9749       |
| 512                | 280,468                     | 0,6                   | 52,858         | 2,11359      |
| 1024               | 275,781                     | 0,609                 | 53,551         | 2,0709       |
| 1280               | 274,999                     | 0,603                 | 53,701         | 2,96076      |
| 1518               | 274,218                     | 0,689                 | 53,781         | 2,08816      |

Tab. B.22: VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 75,781                      | 0,399                 | 74,706         | 6,37423      |
| 128                | 68,749                      | 0,687                 | 76,926         | 10,65392     |
| 256                | 65,625                      | 1,247                 | 77,968         | 19,73068     |
| 512                | 64,843                      | 2,37                  | 78,241         | 36,91774     |
| 1024               | 65,625                      | 4,627                 | 77,851         | 71,49839     |
| 1280               | 67,187                      | 5,751                 | 77,561         | 88,6532      |
| 1518               | 67,968                      | 6,791                 | 77,267         | 104,75182    |

Tab. B.23: VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 100 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 196,874                     | 0,64                  | 66,841         | 2,40157      |
| 128                | 178,906                     | 0,581                 | 69,893         | 4,28164      |
| 256                | 169,531                     | 0,567                 | 71,504         | 4,27994      |
| 512                | 164,062                     | 0,549                 | 72,311         | 2,11741      |
| 1024               | 161,718                     | 0,534                 | 72,74          | 2,08237      |
| 1280               | 161,718                     | 0,582                 | 72,816         | 4,28273      |
| 1518               | 160,937                     | 0,553                 | 72,868         | 2,01659      |

Tab. B.24: VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 54,687                      | 0,388                 | 81,396         | 2,16716      |
| 128                | 52,343                      | 0,676                 | 82,342         | 13,76658     |
| 256                | 50                          | 1,225                 | 83,1           | 25,14737     |
| 512                | 49,218                      | 2,332                 | 83,222         | 48,25792     |
| 1024               | 50,781                      | 4,56                  | 82,757         | 94,01737     |
| 1280               | 51,562                      | 5,657                 | 82,452         | 116,45804    |
| 1518               | 53,125                      | 6,693                 | 82,151         | 137,99621    |

Tab. B.25: VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 300 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 107,031                     | 0,569                 | 81,937         | 6,14528      |
| 128                | 96,874                      | 0,509                 | 83,609         | 2,05602      |
| 256                | 91,406                      | 0,454                 | 84,483         | 2,38663      |
| 512                | 89,062                      | 0,489                 | 84,931         | 2,27571      |
| 1024               | 87,499                      | 0,476                 | 85,153         | 2,33309      |
| 1280               | 87,499                      | 0,551                 | 85,198         | 2,18108      |
| 1518               | 87,499                      | 0,553                 | 85,232         | 6,32227      |

Tab. B.26: VDSL2 35b - sestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| Velikost rámce [B] | Přenosová rychlost [Mbit/s] | back to back [Mbit/s] | ztrátovost [%] | latence [ms] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| 64                 | 28,906                      | 0,372                 | 90,227         | 2,26768      |
| 128                | 26,562                      | 0,657                 | 91,029         | 26,0106      |
| 256                | 25,781                      | 1,192                 | 91,316         | 55,7676      |
| 512                | 25,781                      | 2,272                 | 91,203         | 93,54984     |
| 1024               | 27,625                      | 4,451                 | 90,619         | 183,75942    |
| 1280               | 28,906                      | 5,532                 | 90,29          | 229,37119    |
| 1518               | 29,687                      | 6,533                 | 89,981         | 270,66027    |

Tab. B.27: VDSL2 35b - vzestupný směr přenosu při vzdálenosti 500 metrů - měření podle doporučení RFC2544

| DSL technologie   | Velikost okna [KB] | 50    | 100   | 200   | 400   |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Bonding VDSL2 17a | Download [Mb/s]    | 53,9  | 105,2 | 191,9 | 269,9 |
| Bonding VDSL2 17a | Upload [Mb/s]      | 75,1  | 111   | 111   | 111,1 |
| VDSL2 17a         | Download [Mb/s]    | 113,8 | 137,6 | 135   | 135,4 |
| VDSL2 17a         | Upload [Mb/s]      | 55,5  | 55,5  | 55,5  | 55,5  |
| VDSL2 35b         | Download [Mb/s]    | 112,3 | 217,2 | 259,7 | 254,6 |
| VDSL2 35b         | Upload [Mb/s]      | 58,4  | 58,4  | 58,4  | 58,4  |

Tab. B.28: Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 0 metrů

| DSL technologie   | Velikost okna [KB] | 50    | 100   | 200   | 400   |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Bonding VDSL2 17a | Download [Mb/s]    | 56,6  | 107,1 | 192,3 | 259,3 |
| Bonding VDSL2 17a | Upload [Mb/s]      | 56,5  | 102,5 | 111   | 111   |
| VDSL2 17a         | Download [Mb/s]    | 113,4 | 133,8 | 131,5 | 131,7 |
| VDSL2 17a         | Upload [Mb/s]      | 55,5  | 55,5  | 55,5  | 55,5  |
| VDSL2 35b         | Download [Mb/s]    | 118,3 | 229   | 247,9 | 244,9 |
| VDSL2 35b         | Upload [Mb/s]      | 57,9  | 57,9  | 57,9  | 57,9  |

Tab. B.29: Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 100 metrů

| DSL technologie   | Velikost okna [KB] | 50    | 100   | 200   | 400   |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Bonding VDSL2 17a | Download [Mb/s]    | 53,2  | 104,9 | 187,2 | 234   |
| Bonding VDSL2 17a | Upload [Mb/s]      | 51,6  | 96,6  | 109,9 | 109,9 |
| VDSL2 17a         | Download [Mb/s]    | 114,8 | 121,7 | 119,8 | 119,6 |
| VDSL2 17a         | Upload [Mb/s]      | 54,9  | 54,9  | 55    | 55    |
| VDSL2 35b         | Download [Mb/s]    | 115,5 | 203,3 | 196   | 196,6 |
| VDSL2 35b         | Upload [Mb/s]      | 52,5  | 52,5  | 52,5  | 52,5  |

Tab. B.30: Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 200 metrů

| DSL technologie   | Velikost okna [KB] | 50    | 100   | 200   | 400   |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Bonding VDSL2 17a | Download [Mb/s]    | 109,9 | 148,7 | 145,3 | 145,8 |
| Bonding VDSL2 17a | Upload [Mb/s]      | 44,5  | 44,5  | 44,5  | 44,5  |
| VDSL2 17a         | Download [Mb/s]    | 107,8 | 107,8 | 106   | 106,8 |
| VDSL2 17a         | Upload [Mb/s]      | 46,6  | 46,6  | 46,6  | 46,6  |
| VDSL2 35b         | Download [Mb/s]    | 109,9 | 148,7 | 145,3 | 145,8 |
| VDSL2 35b         | Upload [Mb/s]      | 44,5  | 44,5  | 44,5  | 44,5  |

Tab. B.31: Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 300 metrů

| DSL technologie   | Velikost okna [KB] | 50    | 100   | 200   | 400   |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Bonding VDSL2 17a | Download [Mb/s]    | 102,8 | 156,5 | 165,3 | 163,7 |
| Bonding VDSL2 17a | Upload [Mb/s]      | 72,2  | 72,2  | 72,2  | 72,3  |
| VDSL2 17a         | Download [Mb/s]    | 90,3  | 89,9  | 88,9  | 89,4  |
| VDSL2 17a         | Upload [Mb/s]      | 36,6  | 36,6  | 36,6  | 36,6  |
| VDSL2 35b         | Download [Mb/s]    | 106,8 | 105   | 103,9 | 105,4 |
| VDSL2 35b         | Upload [Mb/s]      | 35,5  | 35,5  | 35,5  | 35,5  |

Tab. B.32: Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 400 metrů

| DSL technologie   | Velikost okna [KB] | 50   | 100   | 200  | 400   |
|-------------------|--------------------|------|-------|------|-------|
| Bonding VDSL2 17a | Download [Mb/s]    | 97,8 | 143,2 | 141  | 140,6 |
| Bonding VDSL2 17a | Upload [Mb/s]      | 55,8 | 55,8  | 55,8 | 55,8  |
| VDSL2 17a         | Download [Mb/s]    | 72,8 | 72,4  | 71,6 | 72    |
| VDSL2 17a         | Upload [Mb/s]      | 27,8 | 27,8  | 27,8 | 27,8  |
| VDSL2 35b         | Download [Mb/s]    | 81,6 | 80,6  | 79,5 | 80,6  |
| VDSL2 35b         | Upload [Mb/s]      | 23,2 | 23,2  | 23,2 | 23,2  |

Tab. B.33: Měření přenosových rychlostí TCP protokolu v závislosti na velikosti TCP okna při vzdálenosti 500 metrů

| DSL technologie   | Směr přenosu | Přenosová rychlost [Mb/s] | TCP účinnost [%] | Maximální RTT [ms] |
|-------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------------|
| Bonding VDSL2 17a | Download     | 272,5                     | 99,98            | 9,326435           |
| Bonding VDSL2 17a | Upload       | 110,9                     | 99,98            | 27,94736           |
| VDSL2 17a         | Download     | 135,9                     | 98,43            | 5,297508           |
| VDSL2 17a         | Upload       | 55,5                      | 100              | 54,84114           |
| VDSL2 35b         | Download     | 253,4                     | 98,85            | 4,492946           |
| VDSL2 35b         | Upload       | 58,4                      | 100              | 55,90409           |

Tab. B.34: Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 0 metrů

| DSL technologie   | Směr přenosu | Přenosová rychlost [Mb/s] | TCP účinnost [%] | Maximální RTT [ms] |
|-------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------------|
| Bonding VDSL2 17a | Download     | 257,1                     | 99,73            | 8,8131105          |
| Bonding VDSL2 17a | Upload       | 111                       | 100              | 27,3923625         |
| VDSL2 17a         | Download     | 131,8                     | 98,15            | 5,38936            |
| VDSL2 17a         | Upload       | 55,5                      | 100              | 54,6576448         |
| VDSL2 35b         | Download     | 244,3                     | 98,83            | 4,3418985          |
| VDSL2 35b         | Upload       | 57,9                      | 100              | 57,2006345         |

Tab. B.35: Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 100 metrů

| DSL technologie   | Směr přenosu | Přenosová rychlost [Mb/s] | TCP účinnost [%] | Maximální RTT [ms] |
|-------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------------|
| Bonding VDSL2 17a | Download     | 234,6                     | 99,55            | 9,421515           |
| Bonding VDSL2 17a | Upload       | 109,9                     | 100              | 27,6951966         |
| VDSL2 17a         | Download     | 120,1                     | 98,15            | 5,6382675          |
| VDSL2 17a         | Upload       | 55                        | 100              | 55,384215          |
| VDSL2 35b         | Download     | 197,3                     | 98,58            | 4,692948           |
| VDSL2 35b         | Upload       | 52,5                      | 100              | 63,0705036         |

Tab. B.36: Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 200 metrů

| DSL technologie   | Směr přenosu | Přenosová rychlost [Mb/s] | TCP účinnost [%] | Maximální RTT [ms] |
|-------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------------|
| Bonding VDSL2 17a | Download     | 204,4                     | 99,32            | 9,4228468          |
| Bonding VDSL2 17a | Upload       | 94                        | 100              | 32,4146968         |
| VDSL2 17a         | Download     | 105                       | 98,71            | 8,0434812          |
| VDSL2 17a         | Upload       | 46,6                      | 100              | 65,3070634         |
| VDSL2 35b         | Download     | 145,9                     | 98,17            | 5,3995128          |
| VDSL2 35b         | Upload       | 44,5                      | 100              | 73,7626758         |

Tab. B.37: Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 300 metrů

| DSL technologie   | Směr přenosu | Přenosová rychlost [Mb/s] | TCP účinnost [%] | Maximální RTT [ms] |
|-------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------------|
| Bonding VDSL2 17a | Download     | 164,4                     | 98,77            | 9,915112           |
| Bonding VDSL2 17a | Upload       | 72,3                      | 100              | 44,593064          |
| VDSL2 17a         | Download     | 89,2                      | 97,78            | 6,6031563          |
| VDSL2 17a         | Upload       | 36,6                      | 100              | 82,9426221         |
| VDSL2 35b         | Download     | 105,4                     | 97,18            | 6,2924544          |
| VDSL2 35b         | Upload       | 35,5                      | 100              | 106,3249408        |

Tab. B.38: Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 400 metrů

| DSL technologie   | Směr přenosu | Přenosová rychlost [Mb/s] | TCP účinnost [%] | Maximální RTT [ms] |
|-------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------------|
| Bonding VDSL2 17a | Download     | 140,6                     | 98,76            | 10,437042          |
| Bonding VDSL2 17a | Upload       | 55,8                      | 100              | 60,7299585         |
| VDSL2 17a         | Download     | 72,2                      | 97,25            | 7,6889379          |
| VDSL2 17a         | Upload       | 27,8                      | 100              | 118,8819527        |
| VDSL2 35b         | Download     | 80,5                      | 96,71            | 7,5083409          |
| VDSL2 35b         | Upload       | 23,2                      | 100              | 162,6731822        |

Tab. B.39: Měření parametrů TCP protokolu podle doporučení RFC 6349 při vzdálenosti 500 metrů

| DSL technologie   | Služba                | Velikost rámce             | Max latence [ms] | Přenosová rychlost [Mb/s] |
|-------------------|-----------------------|----------------------------|------------------|---------------------------|
| Bonding VDSL2 17a | VoIP G.711 -10 hovorů | 138                        | 2,48197          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 přenosy     | 1374                       | 2,45696          | 21,185                    |
| -                 | Přenos dat - 50 Mb/s  | mix - 70,128,512,1024,1518 | 2,46995          | 49,999                    |
| VDSL2 17a         | VoIP G.711 -10 hovorů | 138                        | 2,35884          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 přenosy     | 1374                       | 2,42171          | 21,185                    |
| -                 | Přenos dat - 50 Mb/s  | mix - 70,128,512,1024,1518 | 2,38812          | 49,999                    |
| VDSL2 35b         | VoIP G.711 -10 hovorů | 138                        | 2,26424          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 přenosy     | 1374                       | 2,25473          | 21,185                    |
| -                 | Přenos dat - 50 Mb/s  | mix - 70,128,512,1024,1518 | 2,29845          | 49,999                    |

Tab. B.40: Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 0 metrů - sestupný směr přenosu

| DSL technologie   | Služba                | Velikost rámce | Max latence [ms] | Přenosová rychlost [Mb/s] |
|-------------------|-----------------------|----------------|------------------|---------------------------|
| Bonding VDSL2 17a | VoIP G.711 -10 hovoru | 138            | 2,32728          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 streamy     | 1374           | 2,36041          | 21,185                    |
| VDSL2 17a         | VoIP G.711 -10 hovoru | 138            | 2,07014          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 streamy     | 1374           | 2,12218          | 21,185                    |
| VDSL2 35b         | VoIP G.711 -10 hovoru | 138            | 2,37293          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 streamy     | 1374           | 2,37765          | 21,185                    |

Tab. B.41: Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 0 metrů - vzestupný směr přenosu



| DSL technologie   | Služba                | Velikost rámce             | Max latence [ms] | Přenosová rychlost [Mb/s] |
|-------------------|-----------------------|----------------------------|------------------|---------------------------|
| Bonding VDSL2 17a | VoIP G.711 -10 hovorů | 138                        | 6,29225          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 přenosy     | 1374                       | 6,34242          | 21,185                    |
| -                 | Přenos dat - 50 Mb/s  | mix - 70,128,512,1024,1518 | 6,30118          | 49,999                    |
| VDSL2 17a         | VoIP G.711 -10 hovorů | 138                        | 2,74993          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 přenosy     | 1374                       | 2,79991          | 21,185                    |
| -                 | Přenos dat - 50 Mb/s  | mix - 70,128,512,1024,1518 | 2,86548          | 49,999                    |
| VDSL2 35b         | VoIP G.711 -10 hovorů | 138                        | 2,71055          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 přenosy     | 1374                       | 2,70423          | 21,185                    |
| -                 | Přenos dat - 50 Mb/s  | mix - 70,128,512,1024,1518 | 2,73598          | 49,999                    |

Tab. B.42: Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 500 metrů - sestupný směr přenosu

| DSL technologie   | Služba                | Velikost rámce | Max latence [ms] | Přenosová rychlost [Mb/s] |
|-------------------|-----------------------|----------------|------------------|---------------------------|
| Bonding VDSL2 17a | VoIP G.711 -10 hovoru | 138            | 5,82428          | 1,264                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 streamy     | 1374           | 5,88317          | 21,185                    |
| VDSL2 17a         | VoIP G.711 -10 hovoru | 138            | 2,84356          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 streamy     | 1374           | 2,95751          | 21,185                    |
| VDSL2 35b         | VoIP G.711 -10 hovoru | 138            | 2,77298          | 1,263                     |
| -                 | Mpeg-4 -2 streamy     | 1374           | 2,89735          | 21,185                    |

Tab. B.43: Měření podle doporučení Y1584 při vzdálenosti 500 metrů - vzestupný směr přenosu