



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

MODEL DISTRIBUČNÍ SÍTĚ

POWER LINE GRID MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Csiba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Patrik Csiba

ID: 149835

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Model distribuční sítě

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku datové komunikace po silnoproudém vedení. Navrhněte metodiku tvorby modelů silnoproudých vedení a modelů rušení v prostředí NS-3. Dále realizujte simulační scénáře pro point-to-point zapojení PLC modemů a rozsáhlou topologii odpovídající reálné síti a určete maximální dosah komunikace a vliv vzdálenosti na přenosovou rychlost. Proveďte simulace pro různé kombinace odboček, impedancí, vzdáleností a dalších parametrů s cílem nalezení maximální komunikační vzdálenosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Hrasnica, H. Broadband Powerline Communications Networks. John Wiley & Sons, Chichester 2004. ISBN 0-470-85741-2.

[2] Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines. 1st ed. Editor Hendrik Ferreira. Chichester: John Wiley, 2010, 507 s. ISBN 978-047-0740-309.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá analýzou PLC komunikací při různých scénářích. V první části je představen princip úzkopásmové a širokopásmové komunikace a analýza elektrického vedení. V další části je popisován NS-3 framework, simulační scénáře pro zjištění vlivu odboček a dalších parametrů na přenosovou rychlost. V poslední části je zjišťován minimální počet opakovačů a určení jejich umístění na rozšířené topologii.

Klíčová slova

Komunikace po silnoprůdém vedení, úzkopásmová komunikace, širokopásmová komunikace, NS-3, PLC modem, datová síť, distribuční síť, model sítě

Abstract

This diploma thesis analyzes the PLC communications in various scenarios. The first part of the thesis describes the principle of narrowband and broadband communication and the analysis of electrical lines. The next part describes the NS-3 framework, simulation scenarios for establishment the effect of branches and other parameters on the baud rate. The last part determines the minimum number of repeaters and their location on the extended topology.

Keywords

Power Line Communication, narrowband communication, broadband communication, NS3, PLC modem, data network, distribution network, network model

Bibliografická citace:

CSIBA, P. *Model distribuční sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Model distribuční sítě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené 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 jsem si 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.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce a také své rodině za podporu během studia.

V Brně dne

.....
podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD.....	12
1. PLC TECHNOLOGIE.....	13
1.1. Princip	13
1.2. Úzkopásmová technologie	13
1.2.1. Evropský standard CENELEC	14
1.3. Širokopásmová technologie.....	15
2. ANALÝZA VEDENÍ	16
2.1. Primární parametry vedení	16
2.2. Sekundární parametry vedení	17
2.3. Rušení v elektrickém vedení	18
2.3.1. Model komunikačního kanálu.....	18
2.3.2. Typy rušení v elektrické síti	19
2.4. Přenosová kapacita kanálu	19
3. ANALÝZA ZDROJŮ O PLC TECHNOLOGII	21
3.1. Rušení v elektrické síti ovlivňující PLC	21
3.2. Útlum signálu v PLC	22
3.3. Modelování domácí nízkonapěťové sítě.....	22
3.4. Studie o koexistenci PLC a VDSL2	23
3.5. Aplikace úzkopásmové PLC v chytré síti	25
3.7. Zhodnocení zdrojů.....	26
4. SIMULACE V PROSTŘEDÍ NS-3.....	28
4.1. Simulační prostředí v NS-3	28
4.1.1. Výstupní hodnoty	28
4.1.2. Funkce getCapacity()	29

4.2.	Vliv vzdálenosti na přenos PLC signálu	29
4.2.1.	Širokopásmová simulace.....	30
4.2.2.	Úzkopásmová simulace.....	31
4.2.3.	Porovnávání dostupných modulací	32
5.	SIMULACE PLC KOMUNIKACE PRO RŮZNÉ TOPOLOGIE.....	34
5.1.	Topologie s jednou odbočkou.....	34
5.1.1.	Vliv délky odbočky a impedance zakončení odbočky na rychlost.....	34
5.1.2.	Vliv pozice odbočky na rychlost.....	36
5.1.3.	Simulace přenosové funkce jedné odbočky	38
5.2.	Topologie s třemi odbočkami.....	41
5.2.1.	Simulace přenosové rychlosti	41
5.2.2.	Simulace přenosové funkce a SINR.....	43
5.2.3.	Simulace přenosové rychlosti v závislosti na hodnotě šumu	45
5.3.	Porovnání topologií.....	46
6.	SIMULACE PLC KOMUNIKACE PRO VELKOU TOPOLOGII.....	49
6.1.	Simulace pozice a počtu opakovačů při hodnotě šumu -90 dBm.....	52
6.1.1.	Simulace pro minimální hranici 30 Mbit/s.....	52
6.1.2.	Simulace pro optimální hranici 30 Mbit/s.....	53
6.1.3.	Simulace pro minimální hranici 5 Mbit/s.....	55
6.1.4.	Simulace pro optimální hranici 5 Mbit/s.....	57
6.2.	Simulace pozice a počtu opakovačů při hodnotě šumu -70 dBm.....	58
6.2.1.	Simulace pro minimální hranici 5 Mbit/s.....	59
7.	PŘENOSOVÁ RYCHLOST A VLIV HLAVIČEK PROTOKOLŮ.....	62
	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ	63
	ZÁVĚR.....	65
	POUŽITÁ LITERATURA.....	66
	SEZNAM ZKRATEK.....	68
	SEZNAM PŘÍLOH	69

Seznam obrázků

Obr. 1: Blokové schéma PLC komunikace.	13
Obr. 2: Rozložení spektra podle normy CENELEC [4].	14
Obr. 3: Ekvivalentní schéma homogenního vedení [5].	16
Obr. 4: Model komunikačního kanálu [7].	18
Obr. 5: Spektrum komunikačního kanálu [7].	21
Obr. 6: Závislost frekvence na amplitudě signálu na 50 m (vlevo 1,5 mm ² kabel a vpravo 2,5 mm ² kabel) [10].	23
Obr. 7: Závislost frekvence na amplitudě signálu na 25 m (vlevo 1,5 mm ² kabel a vpravo 2,5 mm ² kabel) [10].	23
Obr. 8: Vliv typu kabelu na PLC komunikaci při spojování s VDSL2 [11].	24
Obr. 9: Teoretické rychlosti přenosu u třech scénářů v závislosti na vzdálenosti [11].	25
Obr. 10: Útlum signálů v závislosti na vzdálenosti [12].	26
Obr. 11: Grafické prostředí Frameworku NS-3 PLC.	28
Obr. 12: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti u širokopásmové komunikace v zapojení point to point 300 m.	31
Obr. 13: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti u úzkopásmové komunikace v zapojení point to point 10 km.	32
Obr. 14: Přenosová rychlost různých modulací u širokopásmové komunikace na vzdálenosti 300 m.	33
Obr. 15: Přenosová rychlost různých modulací u úzkopásmové komunikace na vzdálenosti 10 km.	33
Obr. 16: Topologie s jednou odbočkou	34
Obr. 17: Závislost přenosové rychlosti na délce odbočky s měnicím se zakončením	35
Obr. 18: Závislost přenosové rychlosti na délce odbočky s měnicím se zakončením v širokém měřítku	36
Obr. 19: Závislost přenosové rychlosti na pozici odbočky s měnicím se zakončením.	37
Obr. 20: Závislost přenosové rychlosti na pozici odbočky s měnicím se zakončením v širokém měřítku	38
Obr. 21: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5 Ω při změně délky odbočky na trase 300 m.	39
Obr. 22: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5 Ω při změně délky odbočky na trase 150 m.	39

Obr. 23: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5 Ω při změně pozice odbočky na trase 300 m	40
Obr. 24: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5 Ω při změně pozice odbočky na trase 150 m	41
Obr. 25: Topologie se třemi odbočkami.....	41
Obr. 26: Závislost přenosové rychlosti na impedanci odboček v logaritmickém měřítku pro různé modulační rychlosti.....	42
Obr. 27: Závislost přenosové rychlosti na impedanci odboček v lineárním měřítku pro různé modulační rychlosti.....	43
Obr. 28: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro různé hodnoty impedance	44
Obr. 29: Závislost SINR na frekvenci pro různé hodnoty impedance	44
Obr. 30: Závislost přenosové rychlosti na hodnotě šumu pozadí	45
Obr. 31: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti trasy pro různé topologie	46
Obr. 32: Topologie bod-bod.....	47
Obr. 33: Topologie se dvěma odbočkami.....	47
Obr. 34: Výřez z velké topologie pro trasu n1 až n32.....	49
Obr. 35: Závislost přenosové rychlosti na úrovni šumu na pozadí (propojení bod-bod na trase 300 m).....	50
Obr. 36: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti pro podzemní kabeláž (trasa od 75 m do 300 m).....	51
Obr. 37: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti pro venkovní kabeláž (trasa od 75 m do 300 m).....	51
Obr. 38: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 \rightarrow n32 a jejím udržení při minimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)	52
Obr. 39: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 \rightarrow n32 při minimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)	53
Obr. 40: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 \rightarrow n32 a jejím udržení při optimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)	55
Obr. 41: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 \rightarrow n32 při optimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm).....	55
Obr. 42: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 \rightarrow n32 a jejím udržení při minimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)	56
Obr. 43: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 \rightarrow n32 při minimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)	57
Obr. 44: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 \rightarrow n32 a jejím udržení při optimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)	58

Obr. 45: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 → n32 při optimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm).....	58
Obr. 46: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 → n32 a jejím udržením při hranici 2 Mbit/s (šum -70 dBm)	60
Obr. 47: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 → n32 při hranici 5 Mbit/s (šum -70 dBm)	60
Obr. 48: Režie jednotlivých hlaviček skrze vrstvý model [21].....	62

Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka pásem podle normy CENELEC [4].	15
Tabulka 2: Význam proměnných u primárních parametrů [6].	17
Tabulka 3: Význam proměnných u sekundárních parametrů [5].	18
Tabulka 4: Výsledné hodnoty přenosové rychlosti pro jednotlivé vzdálenosti u širokopásmové simulace.	30
Tabulka 5: Výsledné hodnoty přenosové rychlosti pro jednotlivé vzdálenosti u úzkopásmové simulace.	31
Tabulka 6: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při minimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)	52
Tabulka 7: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při optimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)	54
Tabulka 8: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při minimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)	56
Tabulka 9: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při optimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)	57
Tabulka 10: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při hranici 5 Mbit/s (šum -70 dBm)	59

Úvod

Komunikační technologie mají v dnešním světě důležitou úlohu, propojují jednotlivé uživatele skrze rozsáhlé sítě. Může se jednat o drátové nebo i bezdrátové technologie, oba typy mají své místo ve světě. Implementace těchto technologií je již jiná kapitola. Záměna nebo vylepšení staré komunikační cesty je velice nákladná investice, a proto se technici přiklánějí raději k technologiím, které nám umožní využít již existující silnoproudé vedení. Tato technologie se nazývá PLC (Power Line Communication). Umožňuje nám využít rozsáhlé infrastruktury elektrických rozvodů, které jsou primárně určeny pro distribuci elektrické energie pro přenos dat.

Samotná myšlenka komunikace po elektrickém vedení vznikla v 19. století. První patent byl vydán ve Spojeném království v roce 1897 a prakticky se začal využívat ve 20. letech minulého století společností Electric Power Utility of London. Tuto technologii začaly využívat společnosti k dálkovému ovládní některých zařízení jako například vysokonapěťové přepínače [1].

V současné době není využití PLC pouze pro průmysl ale i pro domácnosti, kde může sloužit i jako prostředek k přenosu internetového připojení do všech koutů domácnosti. Tato aplikace je velice častá právě v situacích, kdy je složité a nákladné pokládat datové vedení nebo Wi-Fi signál není dostačující.

Tato diplomová práce se zabývá modelováním silnoproudých vedení pro PLC komunikaci. Bude zde analyzován efekt poklesu rychlosti v závislosti na vzdálenosti, různé druhy topologií a jejich efekt na výslednou přenosovou rychlost.

1. PLC technologie

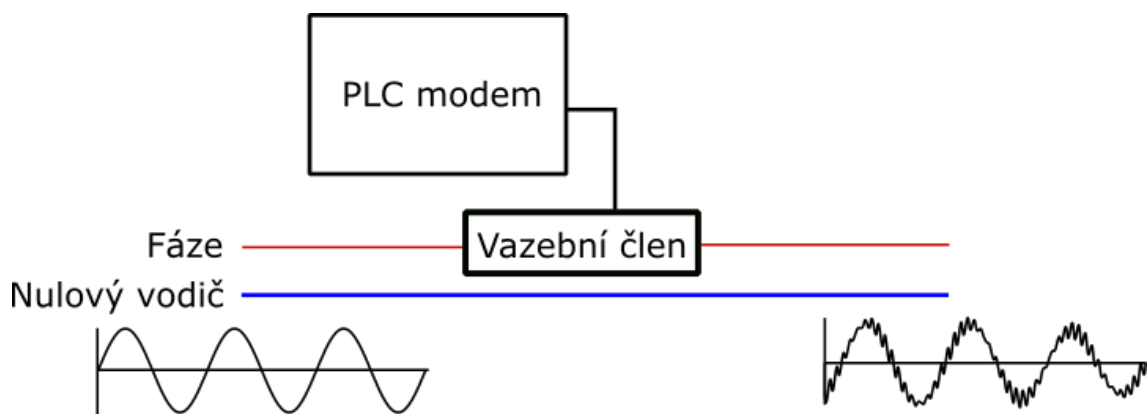
V následujících kapitolách je popsán princip PLC a rozdělení podle využitého kmitočtového pásma.

1.1. Princip

Pro datovou komunikaci jsou využívány dosavadní silnoproudé elektrické vedení, které pokrývají velkou část naší planety. Komunikace je realizována mezi dvěma koncovými body tzv. PLC modemy. Tyto modemy jsou připojeny do elektrické sítě (50 Hz) a pomocí vazebních členů je vysokofrekvenční (kHz až MHz) datový signál injektován do elektrické sítě, což je zobrazeno na Obr. 1 [3][8].

Vazební členy:

- Induktivní: dělený feromagnetický nebo železitý kroužek slouží jako vysokofrekvenční transformátor, který injektuje PLC signál na fázi. Pro využití v PLC komunikaci jsou induktivní vazební členy nejpoužívanější.
- Kapacitní: využívá se malý vazební vysokonapěťový kondenzátor.



Obr. 1: Blokové schéma PLC komunikace.

PLC technologie se rozděluje do tří základních skupin podle využití frekvenčního pásma na Ultra Narrow Band (UNB) a Narrowband (NB), které jsou také označovány jako úzkopásmové technologie a Broadband(BB) jako širokopásmové [2].

1.2. Úzkopásmová technologie

Ultra Narrow Band (UNB):

Frekvenční rozsah se pohybuje od 0,3 do 3 kHz nebo 30-300 Hz. Datový přenos může dosahovat až 100 bps. Využívá se u Automatic Meter Reading (AMR) systému k dálkovému odečtu z elektroměrů a také u Two-Way Automatic Communications Systems (TWACS), který dokáže zpracovat paralelně hned několik elektroměrů. Dosah UNB je kolem 150 m a možná i více při využití opakovačů.

Narrowband (NB):

Jedná se o technologie, které pracují v pásmu 3-500 kHz. Toto pásmo je dále rozděleno na čtyři subpásma pro světové standardy:

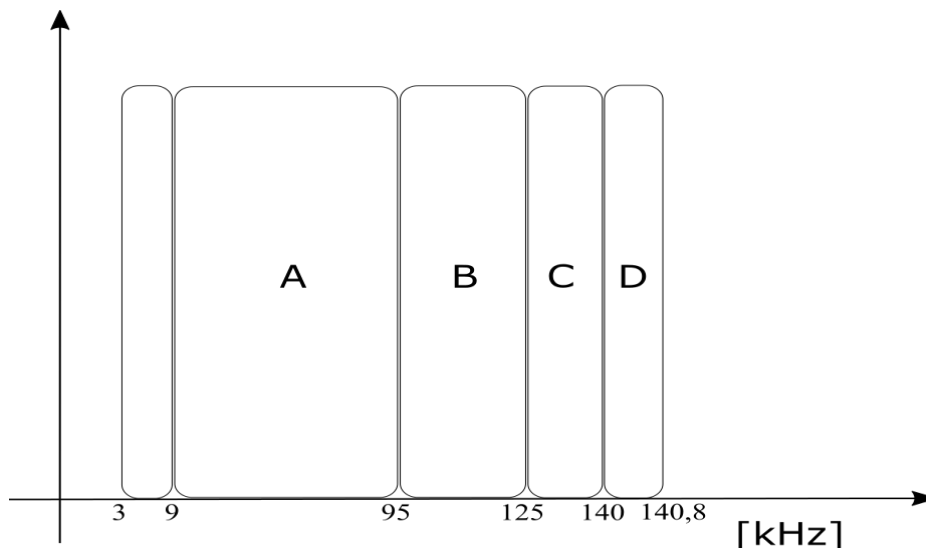
- evropský standard Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC) 3-148,5 kHz
- americký standard Federal Communications Commission (FCC) 10-490 kHz
- japonský standard Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) 10-450 kHz
- čínský standard 3-500 kHz

Zhlediska datové rychlosti dále rozdělujeme NB na Low Data Rate (LDR) a High Data Rate (HDR). LDR jsou technologie založené na jedné nosné a dosahující pouze několika kbps. Naopak HDR využívá technologie s více nosnými, které dosahují rychlosti až 500 kbps [2].

Využití úzkopásmové technologie je hlavně v automatizaci, protože přenášená data jsou relativně malá a nevyžadují velkou přenosovou rychlost. Používá se např. k ovládání vrat, regulace teploty, vlhkosti, dálkové odečítání z elektroměrů atd.

1.2.1. Evropský standard CENELEC

Využívá frekvenční pásmo 3 až 148,5 kHz a je definován Evropskou normou CENELEC EN 50065-1. Frekvenční pásmo je dále rozděleno na 4 subpásma jak je znázorněno na Obr. 2. V Tabulka 1 jsou popsána jednotlivá subpásma s jejich rozsahem a využitím. Pro úzkopásmové modemy jsou nejdůležitější pásma B a C [4].



Obr. 2: Rozložení spektra podle normy CENELEC [4].

Tabulka 1: Tabulka pásem podle normy CENELEC [4].

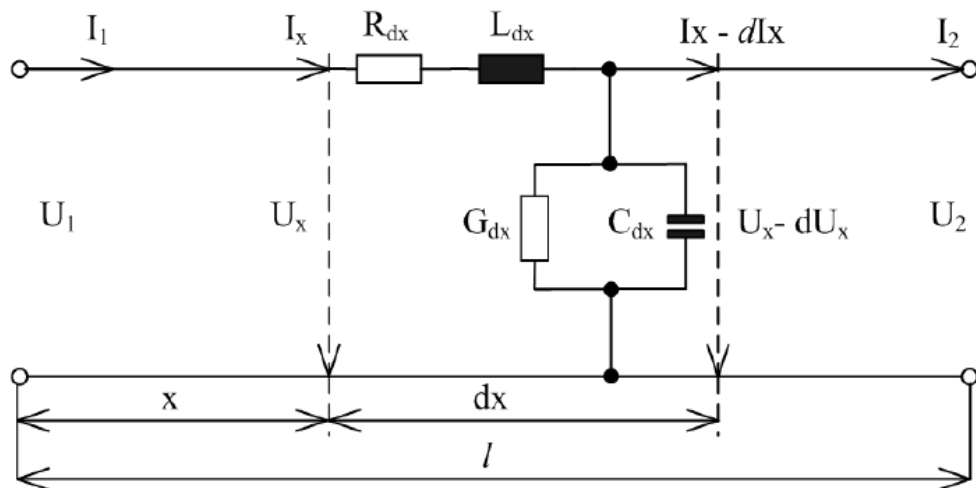
Název pásma	Šířka pásma [kHz]	Informace
-	3-9	Určeno pro dodavatele
CENELEC A	9-95	Po souhlasu dodavatele i pro odběratele
CENELEC B	95-125	Pro odběratele
CENELEC C	125-140	Pro odběratele, vyžadován protokol o přistoupení k dohodě (ČSN EN 50065)
CENELEC D	140-148,5	Pro odběratele

1.3. Širokopásmová technologie

Broadband (BB) označuje technologie pro přenos mnohem většího objemu dat, než tomu bylo u UNB a NB. Převážně se využívá pro připojení k internetu tzv. HAN síť (Home Area Network). Velký rozmach těchto HAN sítí se datuje na přelom tisíciletí. Tyto technologie pracují v pásmu 1,8 až 250 MHz a datový přenos může dosahovat do stovek Mbps [2].

2. Analýza vedení

Přenos po elektrickém vedení je charakterizován pomocí primárních parametrů. Tyto parametry nejsou závislé na napětí a přenášeném proudu ale na konstrukci, použitém materiálu a frekvenci signálu. Uvažujeme-li dvou vodičové vedení, je možné sestavit ekvivalentní schéma, které je vyobrazené na Obr. 3 [5].



Obr. 3: Ekvivalentní schéma homogenního vedení [5].

Mezi primární parametry jsou zařazeny:

- Odpor R [Ω]
- Indukce L [H]
- Kapacita C [F]
- Svod G [S]

Z primárních parametrů lze odvodit sekundární parametry:

- Charakteristická impedance Z_c [Ω]
- Měrný činitel přenosu γ [-]

2.1. Primární parametry vedení

V této podkapitole jsou uvedeny rovnice pro výpočet primárních parametrů a v Tabulka 2 jsou vysvětleny použité proměnné [6].

Odpor:

$$R = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 f}{\pi \sigma a^2}} \left[\frac{\frac{d}{2a}}{\sqrt{\left(\frac{d}{2a}\right)^2 - 1}} \right] [\Omega/m] \quad (2.1)$$

Indukce:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) [H/m] \quad (1.2)$$

Kapacita:

$$C = \frac{\pi \varepsilon_r \varepsilon_0}{\cosh^{-1} \frac{d}{2a}} [F/m] \quad (2.2)$$

Svod:

$$G = 2\pi f C \tan \delta [S/m] \quad (2.3)$$

Tabulka 2: Význam proměnných u primárních parametrů [6].

Označení	Význam
a	Poloměr vodiče
d	Vzdálenost mezi středy vodičů
σ	Konduktivita mědi
μ_0	Permeabilita vzduchu
μ_r	Relativní magnetická permeabilita mědi
ε_0	Permitivita vakua
ε_r	Relativní permitivita izolace

2.2. Sekundární parametry vedení

V této podkapitole jsou uvedeny rovnice sekundárních parametrů odvozených od primárních a v Tabulka 3 jsou uvedeny použité proměnné [6].

Charakteristická impedance:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} [\Omega] \quad (2.4)$$

Měrný činitel přenosu:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta [-] \quad (2.5)$$

Tabulka 3: Význam proměnných u sekundárních parametrů [5].

Označení	Význam
α	Měrný útlum
β	Měrný fázový posuv

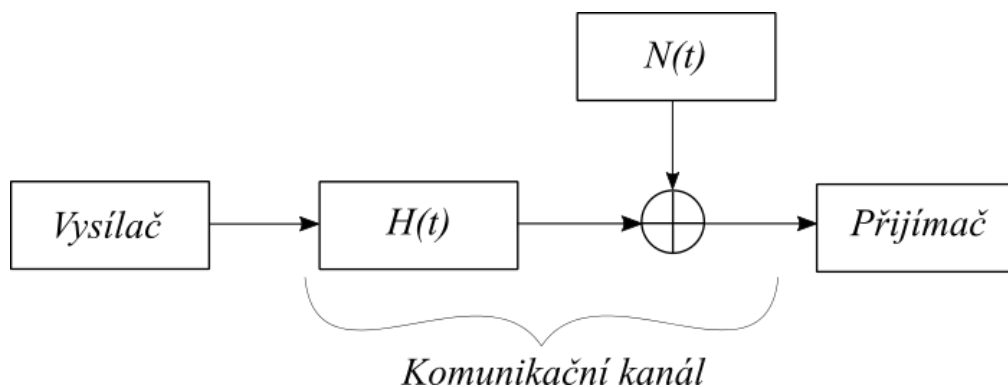
2.3. Rušení v elektrickém vedení

Hlavním problémem PLC technologie je velké množství rušení v elektrické síti. Elektrická distribuční síť nebyla původně zamýšlena pro přenos dat ale pouze pro napájecí účely. Úroveň útlumu rušení závisí na připojených spotřebičích a délce vedení.

2.3.1. Model komunikačního kanálu

Mezi parametry nejvíce ovlivňující komunikační kanál jsou zařazeny [7]:

- **Ne-adaptivní impedance $[\Omega]$:** Vstupní a výstupní impedance se mění v čase na základě připojených zařízení a délce vedení.
- **SNR (Signal-to-noise ratio) [dB]:** SNR je odstup signálu od šumu, a platí zde, čím je větší hodnota SNR, tím je lepší přenos.
- **Útlum signálu [dB]:** Úroveň útlumu ve vedení může dosahovat hodnot až 100 dB a výrazně ovlivňuje dosah PLC.



Obr. 4: Model komunikačního kanálu [7].

Na Obr. 4 je zobrazeno blokové schéma komunikačního kanálu:

- $H(t)$ znamená přenosovou funkci kanálu
- $N(t)$ je funkce rušení

2.3.2. Typy rušení v elektrické síti

V této podkapitole jsou popsány jednotlivé druhy rušení, které se mohou nacházet v elektrické rozvodné síti [7][8].

Barevný šum na pozadí:

- Tento druh šumu je součtem více typů šumů s nižší intenzitou.
- Spektrální hustota je poměrně nízká a snižuje se s frekvencí.
- Může být generován komutátorovými motory.

Úzkopásmový šum:

- Většinou má sinusový tvar. Tento typ se vyskytuje v několika subpásmech, které jsou relativně malé a nepřerušované po celém frekvenčním spektru.
- Tento šum je způsoben zejména zvýšeným počtem rozhlasových stanic na středních a krátkých vlnách.

Periodický impulzní šum (asynchronní k hlavní frekvenci):

- Frekvence tohoto šumu nesouvisí s hlavní frekvencí ani s jejími harmonickými.
- Vyskytuje se ve formě impulzů, které mají frekvenci mezi 50 až 200 kHz.
- Tento druh šumu je generován spínáním napájecích zdrojů.

Periodický impulzní šum (synchronní s hlavní frekvencí):

- Jedná se o impulzy s periodou 50 až 100 Hz a jsou synchronní s hlavní frekvencí elektrické sítě.
- Tyto impulzy mají krátkou dobu trvání v řádech mikrosekund a mají spektrální hustotu, která klesá s frekvencí.
- Je generován napájecími zdroji, které pracují synchronně s hlavní frekvencí.

Asynchronní impulzní šum:

- Tento šum je charakteristický střídáním vysokých a nízkých impulzů, které trvají 10 až 100 mikrosekund.
- Spektrální hustota může dosahovat hodnot 50 i více decibelů, což znamená, že asynchronní impulzní šum nejčastěji způsobuje ztrátu informací při PLC komunikaci.
- Je nejčastěji způsoben spínáním přechodových jevů v síti.

2.4. Přenosová kapacita kanálu

Teoretickou hodnotu bitů, kterou lze přenést přes komunikační kanál za jednu sekundu udává Shannon-Hartleyův teorém [10].

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) [\text{bit/s}] \quad (2.6)$$

C – kapacita kanálu (bps)

B – šířka pásma (Hz)

S/N – odstup signálu od šumu neboli také SNR

3. Analýza zdrojů o PLC technologii

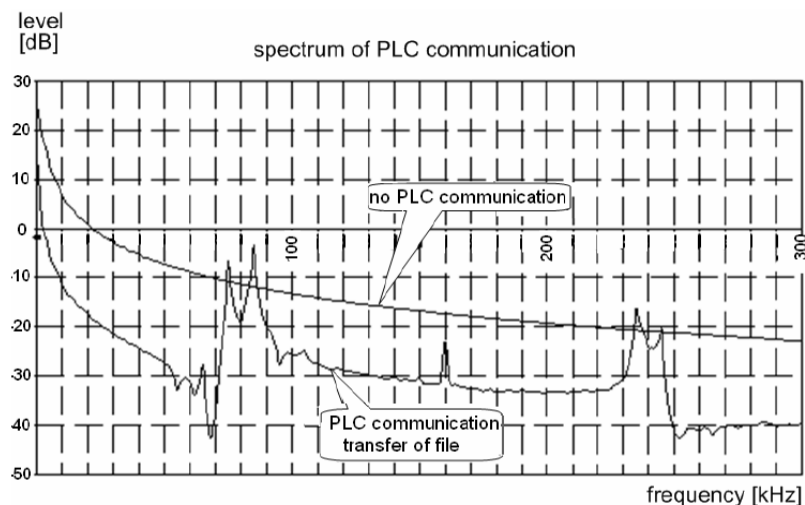
V této kapitole jsou analyzovány nejrůznější články a práce, které jsou zaměřeny na PLC technologii.

3.1. Rušení v elektrické síti ovlivňující PLC

Tato vědecká práce [7] je zaměřena na typy rušení, které se mohou nacházet v elektrické síti a na provedení experimentálních měření.

Důležité body práce:

- Jsou zde podrobně popsány různé druhy šumů a také zařízení, která je způsobují.
- Pro experimentální měření jsou použity modemy české společnosti ModemTec (MT23R modemy).
- Bylo provedeno základní měření v domácím prostředí a v prostředí malé firmy.
- V domácím prostředí byla provedena měření mezi dvěma počítači, kde dosahovala rychlosti až 4,5 kbit/s po dobu 6 hodin na vzdálenosti 150 m.
- V prostředí malé firmy byla délka kabeláže 100 m, kde se nacházelo několik zdrojů rušení (frekvenční měniče, motory, ...). Byla dosažena rychlost kolem 6,5 kbit/s.
- Bylo také provedeno měření spektra signálu za pomoci osciloskopu. Prostřednictvím něj bylo předvedeno, jak ve frekvenčním spektru vypadá PLC komunikace.
- Na Obr. 5 je vidět, že PLC komunikace funguje mezi 50 kHz a 80 kHz. Špičky na frekvenci 160 kHz a 240 kHz představují harmonické PLC signálu. Na obrázku je zřetelné rozložení spektra při zapnuté a vypnuté PLC komunikaci.
- Na závěr bylo zhodnoceno měření v domácím a firemním prostředí. Autoři práce vysvětlují, že úzkopásmová komunikace má široké použití, ale hlavní nevýhodou je dosah.



Obr. 5: Spektrum komunikačního kanálu [7].

3.2. Útlum signálu v PLC

Tato vědecká práce [9] je zaměřena na typy rušení, vliv topologie sítě a přenosovou rychlost elektrických vedení.

Důležité body práce:

Faktory ovlivňující komunikaci po elektrickém vedení:

- Topologie hlavní sítě:
 - o vnitřní a venkovní síť využívá topologii typu T
 - o jsou zde také uvedeny používané typy kabelů
- Vícecestné šíření signálu:
 - o signál se nešíří pouze přímou cestou mezi vysílačem a přijímačem, ale také je nutné zvážit ozvěny
 - o v této části je popsán i vznik ozvěny
- Teorie přenosového vedení:
 - o ve vysokých frekvencích je délka vlny mnohem menší, než je velikost okruhu, což ovlivňuje fázi na různých lokacích v okruhu
 - o jsou zde matematicky popsány parametry kabelů
- Přenosová funkce:
 - o tady je popsán způsob výpočtu přenosové funkce
- Ztráty v kabeláži
- Útlum signálů pro různé vzdálenosti

3.3. Modelování domácí nízkonapětové sítě

Tato vědecká práce [10] je zaměřena na modelování vnitřního kabelového vedení pro PLC komunikaci.

Důležité body práce:

Představení

- Představení konceptu PLC technologie a jejího místa mezi ostatními komunikačními technologiemi.
- V této práci je uvažováno o klasické domovní instalaci, kde je využíván třížilový jednofázový elektrický rozvod 230V/50Hz.

Technická analýza

- V této kapitole je popsán použitý kabel (materiál a jeho jednotlivé vrstvy).
- Matematicky jsou popsány základní parametry vedení (primární a sekundární parametry vedení) s přenosovou funkcí vedení.

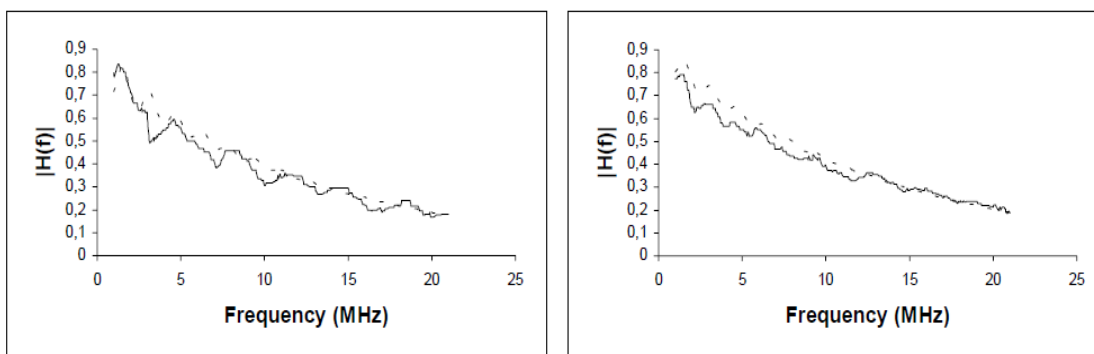
Měření

- Na jedné straně byl připojen funkční generátor, který do obvodu generoval signál a na druhé straně byl osciloskop, který zobrazoval signál procházející kabelovým vedením.

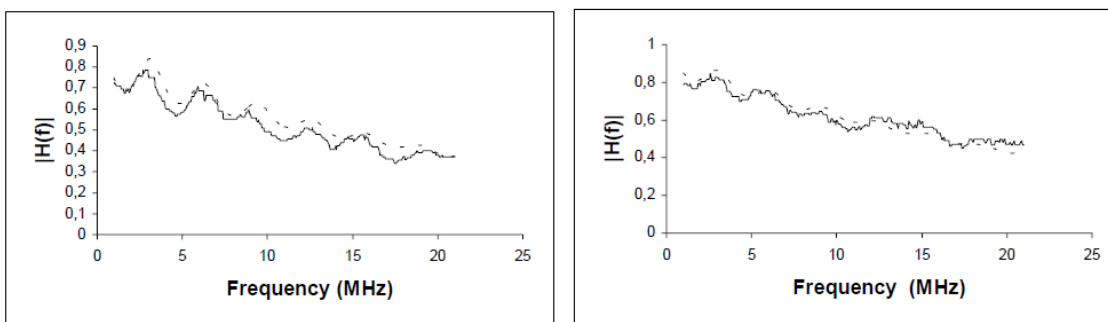
- Byly použity dva typy kabelu (NYM 1,5 mm² a NYM 2,5 mm²) pro dvě délky 25 m a 50 m.

Diskuze a výsledek

- Výsledek posunu fáze je u všech měření identický s teoretickým předpokladem.
- U výsledku měření odezvy amplitudy signálu v závislosti na frekvenci lze vidět na Obr. 6 a Obr. 7, že v některých případech spojitě klesá podle teoretických předpokladů. Zde je patrné, že u obou vzdáleností (25 a 50 m) je u kabelu 2,5 mm² hladší sestup amplitudy než je tomu u 1,5 mm², což je pravděpodobně způsobeno lepšími primárními parametry než je tomu u 1,5 mm² kabelu.



Obr. 6: Závislost frekvence na amplitudě signálu na 50 m (vlevo 1,5 mm² kabel a vpravo 2,5 mm² kabel) [10].



Obr. 7: Závislost frekvence na amplitudě signálu na 25 m (vlevo 1,5 mm² kabel a vpravo 2,5 mm² kabel) [10].

3.4. Studie o koexistenci PLC a VDSL2

Tato vědecká práce [11] popisuje koexistenci technologií PLC a VDSL2 (Very high bit-rate Digital Subscriber Line) a teoretickou analýzu elektromagnetického spojování mezi těmito dvěma technologiemi, které se mohou nacházet v domácí síti zákazníka.

Důležité body práce:

Představení

- V této kapitole je popisován význam jednotlivých technologií a jejich umístění v domácí síti. První širokopásmový modem je většinou umístěn u výchozí brány

(modem) a druhý je umístěn k zařízení, které vyžaduje internetové připojení (set-top-box).

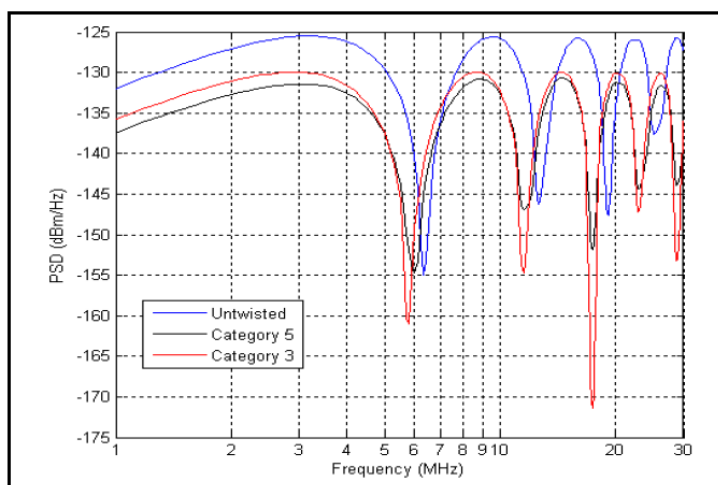
- Důležitým poznatkem je, že obě dvě technologie využívají podobná frekvenční pásma (1,8–30 MHz pro PLC a 0,138–30 MHz pro VDSL2), což může způsobovat problémy s elektromagnetickou kompatibilitou.

Teoretický přístup

- Hlavním důvodem vzniku problému je rozdílnost kabeláže. Pro VDSL2 je používán klasický UTP (Unshielded Twisted Pair) kabel se 4 párovými vodiči (celkem 8 vodičů). Pro PLC jsou využívány klasické elektrické rozvody, které jsou nestíněné třížilové vodiče (klasicky asi 2,5 mm²).
- Pro simulaci byly použity tři různé telekomunikační kabely: untwistedwires, twistedwires cat3 a twistedwires cat5.

Analýza a simulace

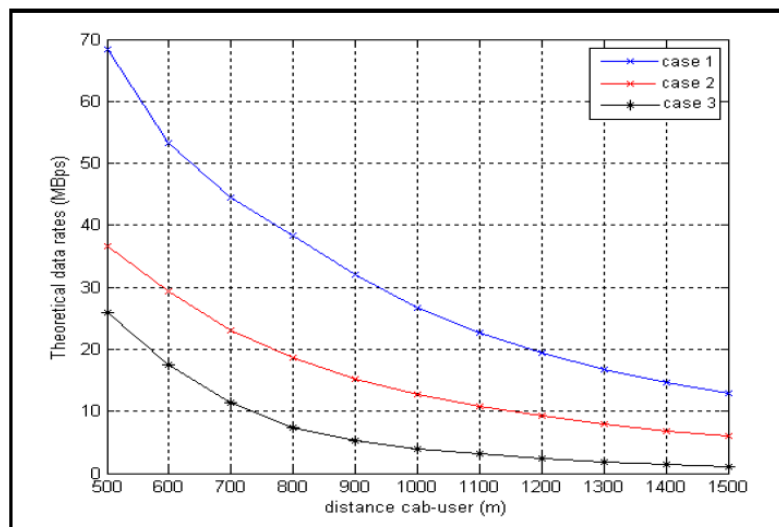
- První simulace byla zaměřena na vliv typu kabelu při spojování PLC-VDSL2. Na Obr. 8 je vidět počínání PLC kanálu o délce 20 m při spojování s VDSL2 s různými typy kabelu.



Obr. 8: Vliv typu kabelu na PLC komunikaci při spojování s VDSL2 [11].

Koexistence VDSL2 a PLC

- Na Obr. 9 je zobrazen teoretický vliv vzdálenosti na přenosovou rychlost. Jsou zde vytvořeny tři scénáře.
 - o Case 1: délka koexistence je 1 m a vzdálenost oddělující obě linky je 20 cm
 - o Case 2: délka koexistence je 5 m a vzdálenost oddělující obě linky je 1 cm
 - o Case 3: délka koexistence je 40 m a linky jsou spojené



Obr. 9: Teoretické rychlosti přenosu u třech scénářů v závislosti na vzdálenosti [11].

3.5. Aplikace úzkopásmové PLC v chytré síti

Tato vědecká práce [12] je zaměřena na popsání úzkopásmové varianty PLC technologie.

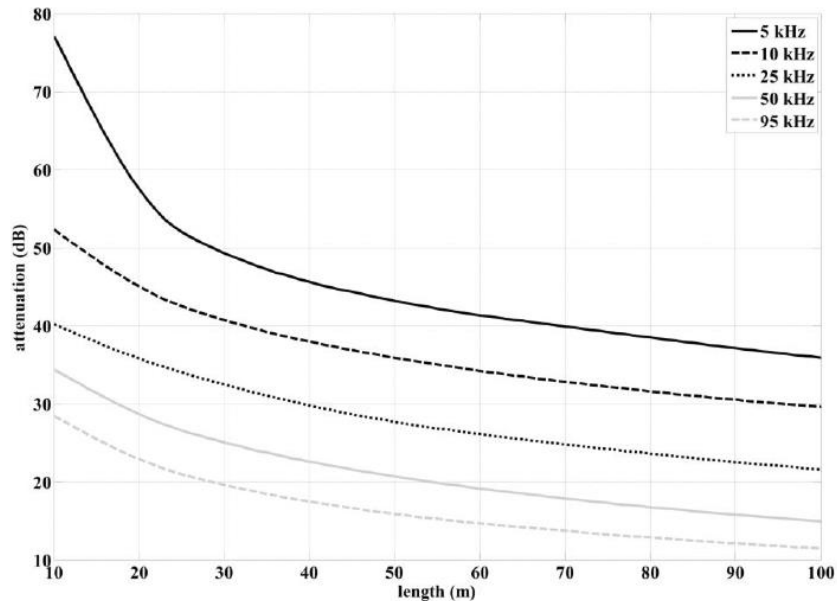
Důležité body práce:

Představení a popis

- V této kapitole je všeobecně popsána úzkopásmová technologie a její úděl pro tzv. Smart Grid.
- Dále je popsána ve zkratce historie, frekvenční pásma a světové standardy pro úzkopásmovou komunikaci.

Technický popis

- Jsou zde vypsány technické parametry PLC komunikace a parametry elektrického vedení a kabelu.
- Také je v práci popsána topologie použitých elektrických distribučních rozvodů pro teoretická měření. V elektrickém rozvodu se nacházejí nejenom generátory ale i transformátory oddělující nízké a vysoké napětí.
- Zajímavý je výsledek na Obr. 10, kde je zobrazen vliv vzdálenosti na útlum. Tady je patrná klesající tendence se vzdáleností, jak tomu udává teoretický předpoklad.



Obr. 10: Útlum signálů v závislosti na vzdálenosti [12].

3.7. Zhodnocení zdrojů

Na téma PLC technologií byl napsán poměrně malý počet vědeckých prací, protože tato technologie není mezi veřejnosti příliš známá. Navíc lidé místo možnosti použití PLC modemu pro přenos internetu pomocí elektrického vedení dávají přednost klasickému vedení pomocí telekomunikačního kabelu nebo pomocí Wi-fi.

Vědecké práce jsou rozděleny do několika skupin:

- **Všeobecné:** Tyto práce jsou zcela zaměřeny na popis PLC jako technologie, která má velké možnosti využití. Popisují jejich výhody nebo nevýhody a základní rozdělení.
- **Zaměřené na rušení:** Tyto práce jsou široce zaměřeny na rušení, které může ovlivňovat PLC komunikaci, a to jak úzkopásmovou, tak i širokopásmovou. Těchto vědeckých prací bylo napsáno velké množství, z nichž veškerá témata byla probrána.
- **Zaměřené na měření:** Další velice rozšířenou skupinou vědeckých článků jsou práce zaměřené na měření v různých prostředích a situacích. Mnoho prací bylo zacíleno na frekvenční ovlivňování komunikace a síly signálu na různých frekvencích.
- **Zaměřené na specifické téma:** Jiná skupina prací se zabývá specifickými tématy, která jsou zaměřena pouze na jeden určitý problém u PLC technologií. Příkladem může být článek, který je popsán v kapitole 3.4 a zaměřuje se na koexistenci PLC a VDSL2, s čímž se lze setkat v domácnosti.

Ve vědecké práci, která je popsána v kapitole 3.1, je velice zajímavý Obr. 5 ukazující frekvenční spektrum komunikačního kanálu při zapnuté a vypnuté PLC

komunikaci. Je zde patrný pokles síly signálu a lze vidět, ve kterých částech spektra se nachází PLC komunikace.

V kapitole 3.2 je popsána vědecká práce zaměřující se na typy rušení, které jsou podrobně popsány matematickými rovnicemi. V práci jsou především dobře popsány primární parametry vedení.

Vědecká práce popsána v kapitole 3.3 je zaměřena na teoretický popis PLC komunikací v elektrickém vedení. Zajímavým výsledkem je rozdíl výkyvu amplitudy v závislosti na frekvenci u kabeláže s $1,5 \text{ mm}^2$ a $2,5 \text{ mm}^2$ na Obr. 6 a Obr. 7.

Práce v kapitole 3.4 je zaměřena na zajímavou problematiku koexistence PLC a VDSL2 a zajištění jejich elektromagnetické kompatibility. Na Obr. 9 je zobrazena teoretická analýza chování komunikačního kanálu při zvyšování vzdálenosti přijímacího PLC modemu. Teoreticky rychlost přenosu klesá lineárně se vzdáleností.

Celkově je velice málo vědeckých prací zaměřených na měření rychlosti přenosu v kanále v závislosti na vzdálenosti. Ve většině prací bylo provedeno měření v závislosti na frekvenci.

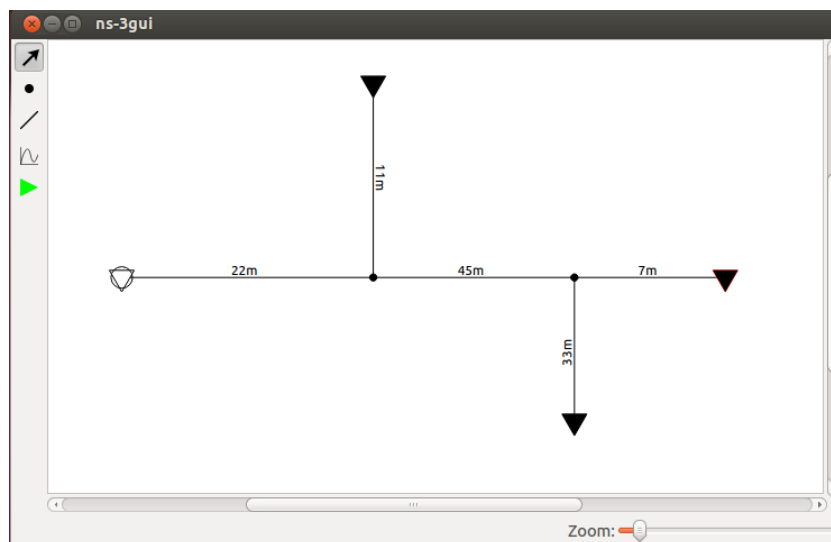
4. Simulace v prostředí NS-3

Zajímavým tématem u PLC komunikace je vliv vzdálenosti na přenos PLC signálu. Vědeckých prací zaměřených na analýzu tohoto efektu není příliš mnoho. Teoreticky platí, že při přenosu jakýmkoliv komunikačním vedením síla signálu klesá lineárně se vzdáleností.

4.1. Simulační prostředí v NS-3

Pro následující simulace bylo použito simulační prostředí NS-3 (Network Simulator 3) [13] a jeho rozšíření o framework NS-3 PLC [14], který byl vyvinut na univerzitě ve Vancouveru. Tento framework umožňuje vytvářet nejrůznější topologie a podrobně je nadefinovat.

Lze využívat grafické GUI, které je zobrazeno na Obr. 11. Pro účely simulace ale bylo využito prostředí Eclipse, kde lze přímo zadávat parametry pomocí skriptu v C++ nebo pythonu. Práce v Eclipse má mnohem více možností nastavení a hlavně lze jednoduše zadat parametry, které mají být na výstupu.



Obr. 11: Grafické prostředí Frameworku NS-3 PLC.

4.1.1. Výstupní hodnoty

Při práci v prostředí Eclipse je možné získat několik výstupních parametrů. Výstupní parametry využity v této simulaci byly:

- CTF (Chanel Transfer Function) je přenosová funkce kanálu udávaná v dB. Z tohoto parametru se odvozují všechny ostatní parametry uvedené níže.
- SINR (Signal-To-Interference Noise Ration) je odstup signálu od šumu.
- PSD (Power Spectral Density) je výkonová spektrální hustota na přijímací straně udávaná v dBm/Hz.

- Přenosová rychlost signálu z funkce `getCapacity()`, která ukáže hodnotu rychlosti subkanálu po herzích, udávaná v bps.

4.1.2. Funkce `getCapacity()`

Důležitou funkcí, která byla použita v následujících simulacích je `getCapacity(SINR, mod, kod_schem)`.

- Kde SINR představuje odstup signálu od šumu a odpovídá klasickému SNR (Signal-To-Noise Ration).
- Mod je určení typu modulace, kdy je možnost použít PSK (Phase-Shift Keying) a QAM (Quadrature Amplitude Modulation).
- Poslední parametr `kod_schem` je kódovací schéma pro danou modulaci. PSK podporuje tři kódovací schémata a to 16, 32 a 64 kde 64 je nejpřesnější. QAM na rozdíl od PSK má více kódovacích schémat, které odpovídají počtu stavu modulace (2-dvoustavová, 4-čtyřstavová, ..., 64-šedesátičtyřstavová).

Hodnoty z Eclipse je nutné nejprve přepočítat. Výstupní hodnoty jsou ve tvaru bps per hertz pro dané subpásmo. Nejprve je nutno vynásobit příslušnou hodnotu šířkou subpásmu, a pak následně sečíst všechny rychlosti subpásem, a tím se získá celková přenosová rychlost kanálu.

4.2. Vliv vzdálenosti na přenos PLC signálu

V této kapitole je ověřen teoretický předpoklad, kdy se zvyšující se vzdáleností se přenosová rychlost vedení snižuje. Simulace byla provedena jak pro širokopásmovou PLC komunikaci, tak i pro úzkopásmovou komunikaci. Byla nadefinována jednoduchá bezztrátová topologie typu bod-bod bez žádných odboček.

Vstupní parametry simulace:

- délka vedení se pro každou simulaci mění
- jako kabel přenosu byl použit NAVY150SE
- síla vysílaného signálu byla nastavena na 1e-8 dBm/Hz
- úroveň šumu byla nastavena na 1e-9, pak pro následující výpočet SINR
- modulace pro funkci `getCapacity()` byla použita PSK s kódovacím schématem 64
- počet vzorků simulace byl nastaven na 50

Výstupní parametry simulace:

- CTF přenosová funkce kanálu
- PSD je výkonová spektrální hustota na přijímací straně
- SINR je odstup signálu od šumu
- Přenosová rychlost signálu z funkce `getCapacity()`

Výpočet maximální teoretické přenosové rychlosti kanálu:

- maximální teoretická přenosová rychlost se vypočítá pomocí upraveného Shannon-Hartley teorému (viz 2.4).

$$C = F \sum \log_2(1 + SINR)[bps] \quad (4.1)$$

- kde F představuje šířku jednoho subpásma
- SINR každého subpásma je zlogaritmována druhým logaritmem, a pak jsou následně všechny sečteny a vynásobeny hodnotou F

Rozdíl mezi vypočítanou teoretickou přenosovou rychlostí a rychlostí získanou z funkce getCapacity():

- teoretická přenosová rychlost představuje maximální teoretickou hranici rychlosti, kterou lze dosáhnout v zadané topologii
- tato hodnota se získá výpočtem podle rovnice 4.1
- naopak rychlost získaná z funkce getCapacity() představuje reálnější reprezentaci přenosové rychlosti kanálu při použití jedné z typu modulací

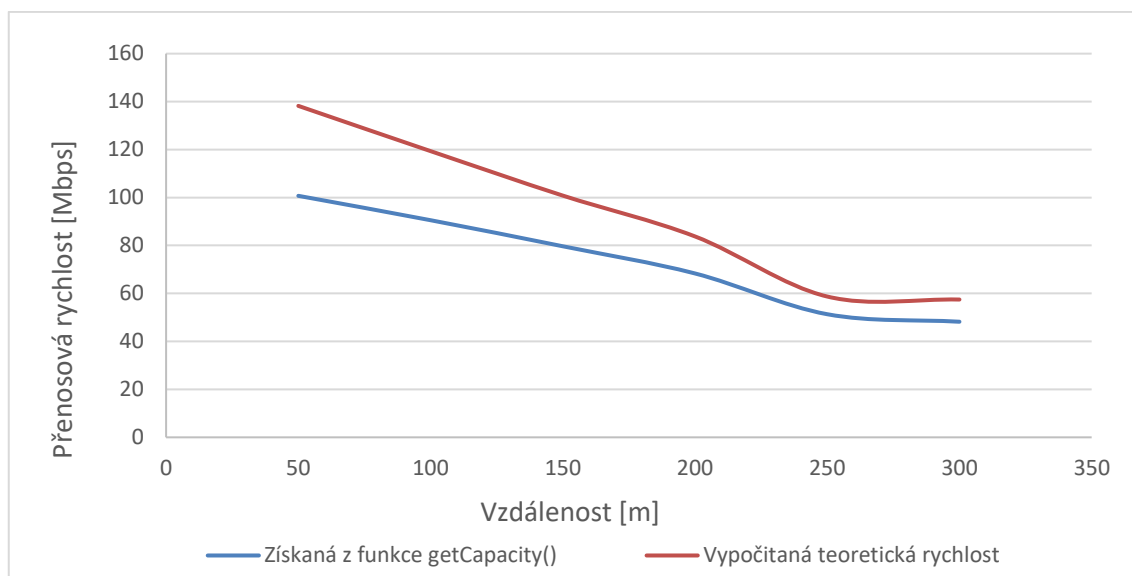
4.2.1. Širokopásmová simulace

Délka vedení byla nastavována od 50 m do 300 m. Frekvenční rozsah pro širokopásmovou simulaci byl nastaven na 0 až 30 MHz. Tato hodnota spektra je čistě teoretická, v praxi se využívají jiné rozsahy i vyšší frekvence. Např. Standart HomePlug AV1 umožňuje 1,8–30 MHz a HomePlug AV2 umožňuje 30–86 MHz [15].

Tabulka 4: Výsledné hodnoty přenosové rychlosti pro jednotlivé vzdálenosti u širokopásmové simulace.

Vzdálenost [m]	Vypočtená teoretická přenosová rychlost [Mbps]	Získaná přenosová rychlost z funkce getCapacity() [Mbps]
50	138,224	100,703
100	119,353	90,541
150	100,805	79,671
200	83,777	68,340
250	58,712	51,337
300	57,455	48,198

Na Obr. 12 je znázorněno ověření teoretického předpokladu, že přenosová rychlost klesá se vzdáleností lineárně. Rozdíl teoretické a získané hodnoty z funkce getCapacity() činí při 50 m kolem cca 40 Mbps a při vzdálenosti 300 m se tento rozdíl snížil na cca 10 Mbps.



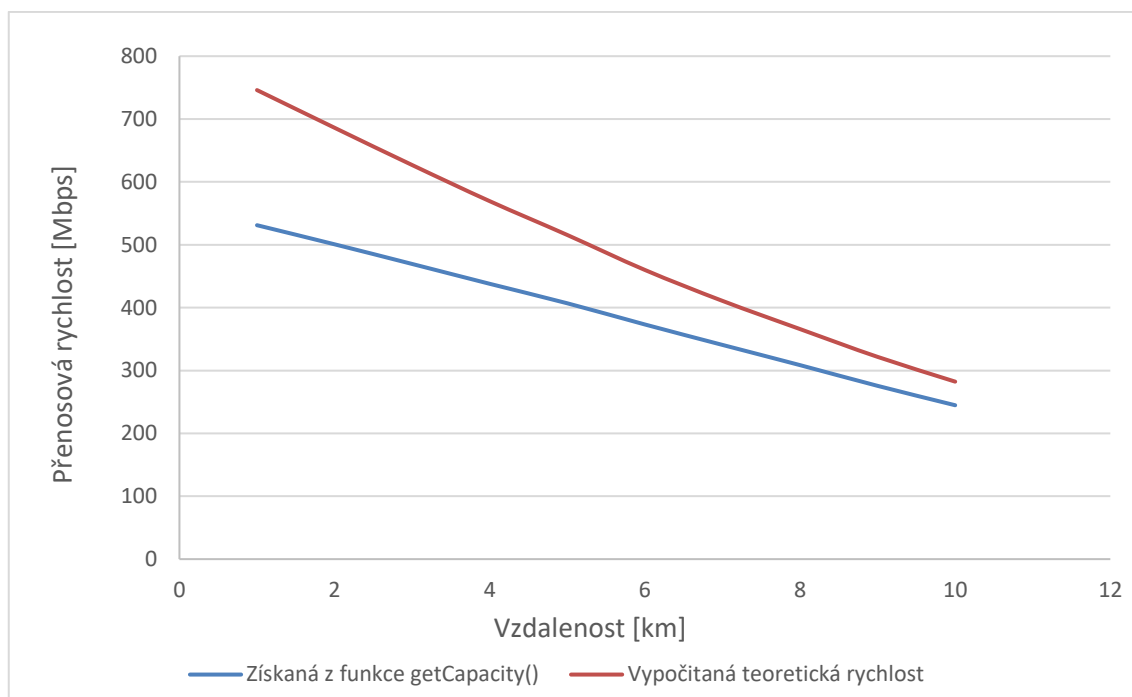
Obr. 12: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti u širokopásmové komunikace v zapojení point to point 300 m.

4.2.2. Úzkopásmová simulace

Délka vedení byla nastavována od 1 km do 10 km. Frekvenční rozsah pro úzkopásmovou simulaci byl nastaven na 0 až 150 kHz. Tato hodnota podobně jako u širokopásmové je pouze teoretická, protože současné standardy nepoužívají celé frekvenční pásmo. Pro standart G3-PLC je využíváné pásmo CENELEC A, které má rozsah 36 až 96 kHz [16].

Tabulka 5: Výsledné hodnoty přenosové rychlosti pro jednotlivé vzdálenosti u úzkopásmové simulace.

Vzdálenost [km]	Vypočtená teoretická přenosová rychlost [kbps]	Získaná přenosová rychlost z funkce getCapacity() [kbps]
1	746,047	531,146
2	686,090	500,743
3	626,837	469,486
4	569,347	437,895
5	515,556	406,909
6	459,956	373,243
7	410,785	340,750
8	365,886	308,577
9	321,674	275,611
10	282,317	244,753

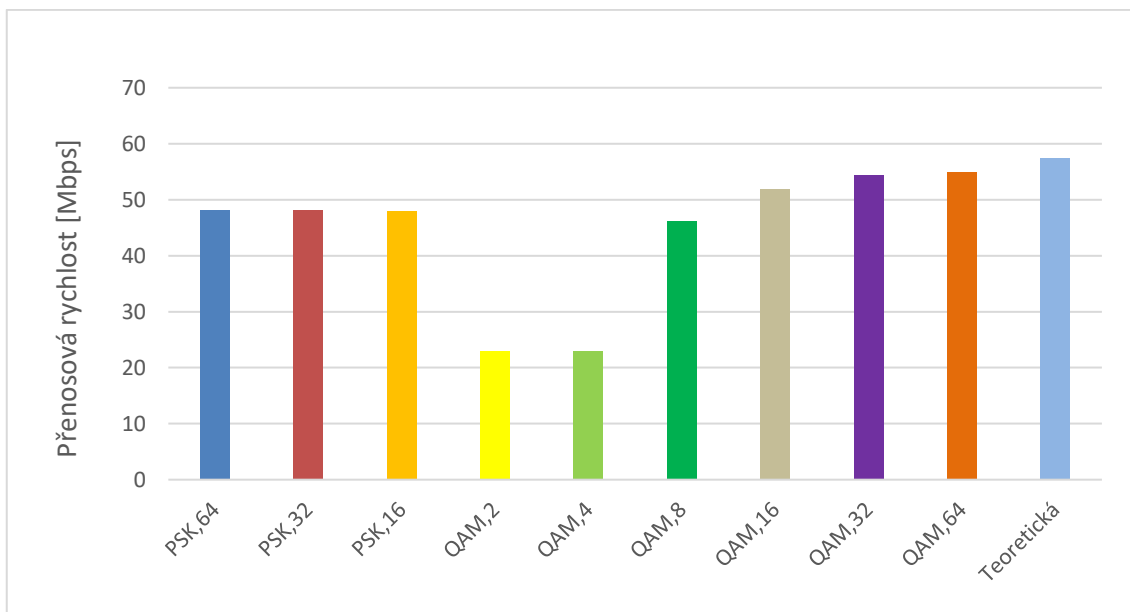


Obr. 13: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti u úzkopásmové komunikace v zapojení point to point 10 km.

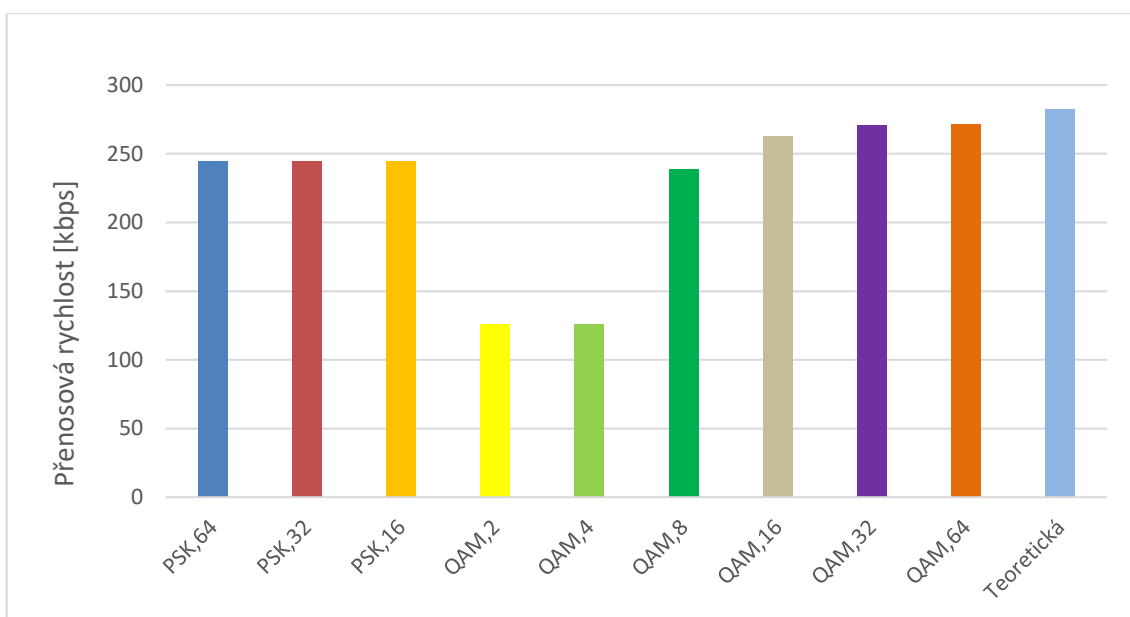
Výsledky vyplývající z Obr. 13 potvrzují stejné tvrzení jako u širokopásmové simulace, pouze hodnoty přenosové rychlosti se pohybují v hodnotách kbps.

4.2.3. Porovnávání dostupných modulací

V této podkapitole jsou porovnány dostupné modulace a kódovací schémata, která nám umožňuje využít framework pro NS-3.



Obr. 14: Přenosová rychlost různých modulací u širokopásmové komunikace na vzdálenosti 300 m.



Obr. 15: Přenosová rychlost různých modulací u úzkopásmové komunikace na vzdálenosti 10 km.

Je patrné, že výsledky u širokopásmového přenosu se shodují s výsledky úzkopásmového. Nejvyšších výsledků je dosaženo s modulací QAM 16, 32 a 64 stavovou. Výsledky u modulací QAM2 a QAM4 jsou téměř totožné. Tyto modulace nabízejí pouze nízký počet stavů, a proto jsou výsledky tak nízké na rozdíl od ostatních. Velký skok je zřejmý mezi QAM4 a QAM8, kde je rozdíl téměř dvojnásobný. Všechny PSK modulace jsou na podobné úrovni a rozdíl je téměř zanedbatelný. Rozdíl, který je mezi PSK pouze v přesnosti kódovacího schématu, je velmi malý. Nejbliže

teoretickému předpokladu se blíží QAM64, kde se rozdíl pohybuje pouze v rozmezích 5 %.

5. Simulace PLC komunikace pro různé topologie

V této kapitole jsou představeny výsledky simulací PLC komunikace pro různé topologie v prostředí NS3. Simulace jsou zaměřeny na zjištění vlivu jednotlivých parametrů a variant zapojení topologie na celkovou přenosovou rychlost.

Hlavní parametry simulace:

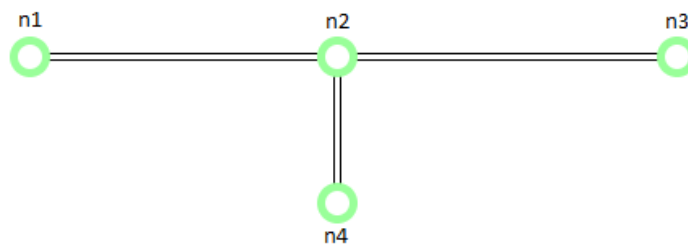
- Veškeré simulační scénáře jsou prováděna pro širokopásmovou PLC komunikaci ve frekvenčním pásmu 2–30 MHz (odpovídá např. rozsahu použitého u standardu AV1 HomePlug).
- Vysílací výkon je nastaven na hodnotu 13,8 nW dle zdroje [20]. Po převodu na PSD [dBm] je hodnota -48,6 dBm.
- Hodnota šumu na pozadí byla nastavena na -60 dbm.
- Vysílač má hodnotu impedance 40 Ω a přijímač má hodnotu impedance 100 Ω dle zdroje [19].

Budou provedeny simulace pro tyto topologie:

- Topologie s jednou odbočkou
- Topologie se dvěma odbočkami
- Topologie se třemi odbočkami

5.1. Topologie s jednou odbočkou

V této podkapitole jsou popsány simulace prováděná na topologii o jedné odbočce. Tato topologie zobrazena na Obr. 16 se skládá ze čtyř bodů označených n1 až n4.



Obr. 16: Topologie s jednou odbočkou

5.1.1. Vliv délky odbočky a impedance zakončení odbočky na rychlost

V následujícím textu jsou popsány výsledky vlivu délky odbočky na celkovou rychlost. Pozice odbočky při každé simulaci byla vždy ve středu celkové trasy, aby byly zachovány stejné podmínky simulace.

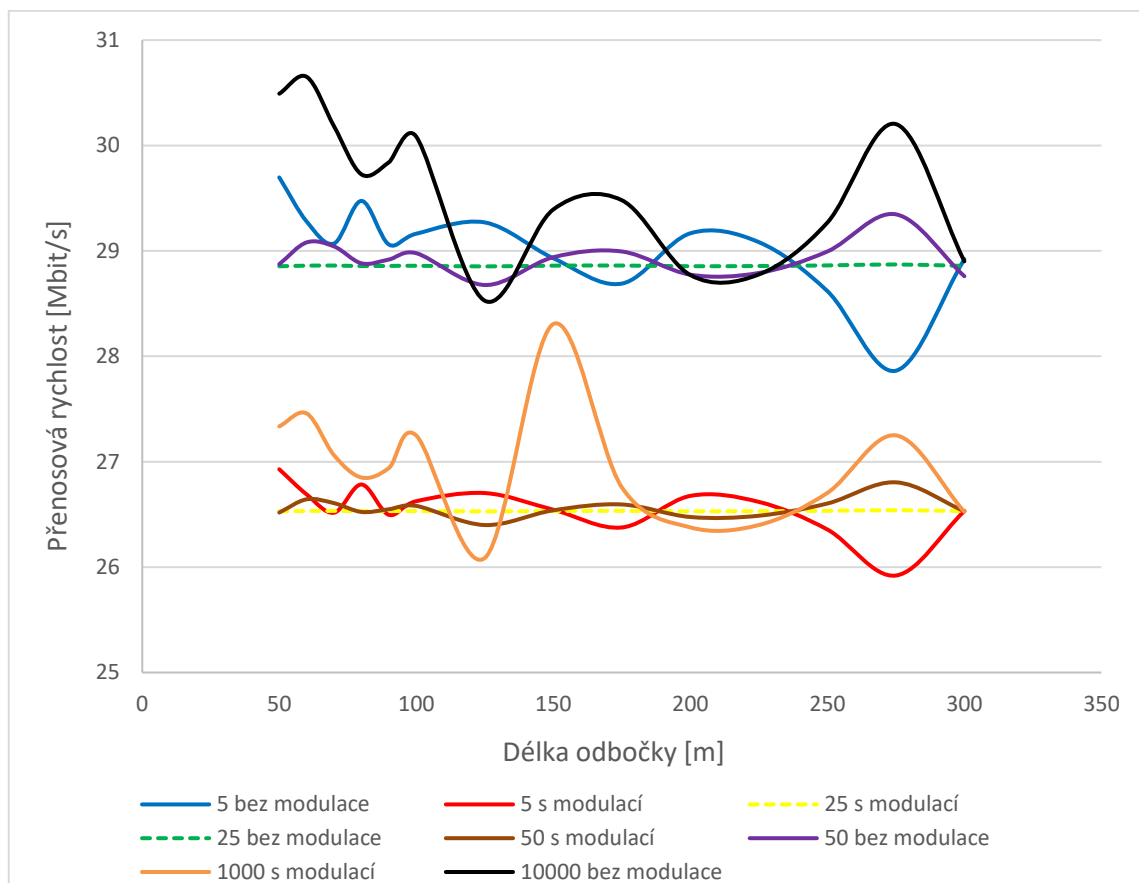
Vlastnosti zapojení:

- Bod n1 je nastaven jako vysílač a bod n3 je nastaven jako přijímač.
- Simulace byla prováděna pro čtveřici hodnot impedance.
- Modulace byla nastavena na QAM64 (Quadrature amplitude modulation).

- Délka odbočky byla nastavována od 50 do 300 m.
- Délka mezi body n1 a n3 byla celou dobu konstantní 300 m.

Význam použitých hodnot impedancí pro odbočku:

- Impedance 5 Ω : tzv. vedení zakončené na krátko, kdy hodnota zakončení je velmi blízko nule.
- Impedance 25 Ω : měla by představovat ideální zakončení.
- Impedance 50 Ω : vyšší hodnota ideálního zakončení.
- Impedance 10 000 Ω : tzv. vedení zakončené na prázdko, kdy hodnota zakončení se blíží nekonečnu.



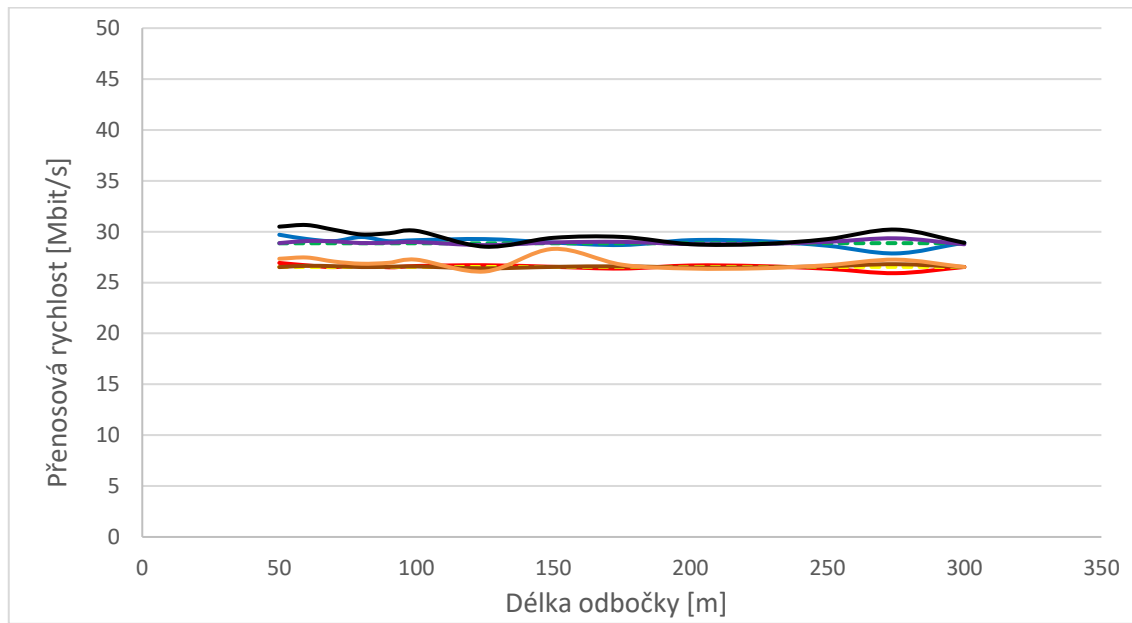
Obr. 17: Závislost přenosové rychlosti na délce odbočky s měnícím se zakončením

Obr. 17 zobrazuje závislost přenosové rychlosti na měnící se délce odbočky s různou hodnotou impedančního zakončení. Pod grafem se nachází legenda, která vysvětluje zastoupení jednotlivých křivek. Při simulaci byly použity čtyři hodnoty impedance 5, 25, 50 a 10 000 Ω . Pro každou hodnotu impedance byly vytvořeny dvě křivky, z toho jedna při použití modulace QAM64 a jedna bez použití jakékoliv modulace.

Z výsledků zobrazených na Obr. 17 lze vidět kolísání podobné u obou variant při použití modulace a bez ní. Nejstabilnější z použitých impedancí je 25 Ω , toto jen potvrzuje ideálnost zakončení s touto hodnotou a nejméně stabilní se zakončením na

prázdnou. Tyto výsledky se pohybují v malém měřítku pouze v rámci 1 až 2 Mbit/s. V širokém měřítku hodnot se tyto výsledky jeví jako konstantní. V širokém spektru je vidět konstantnost výsledků na Obr. 18.

Výsledkem této simulace je, že přenosová rychlost se nemění v závislosti na délce odbočky. Délka odbočky nemá vliv na přenosovou rychlost a ta zůstává konstantní, toto lze vidět na Obr. 18.



Obr. 18: Závislost přenosové rychlosti na délce odbočky s měnícím se zakončením v širokém měřítku

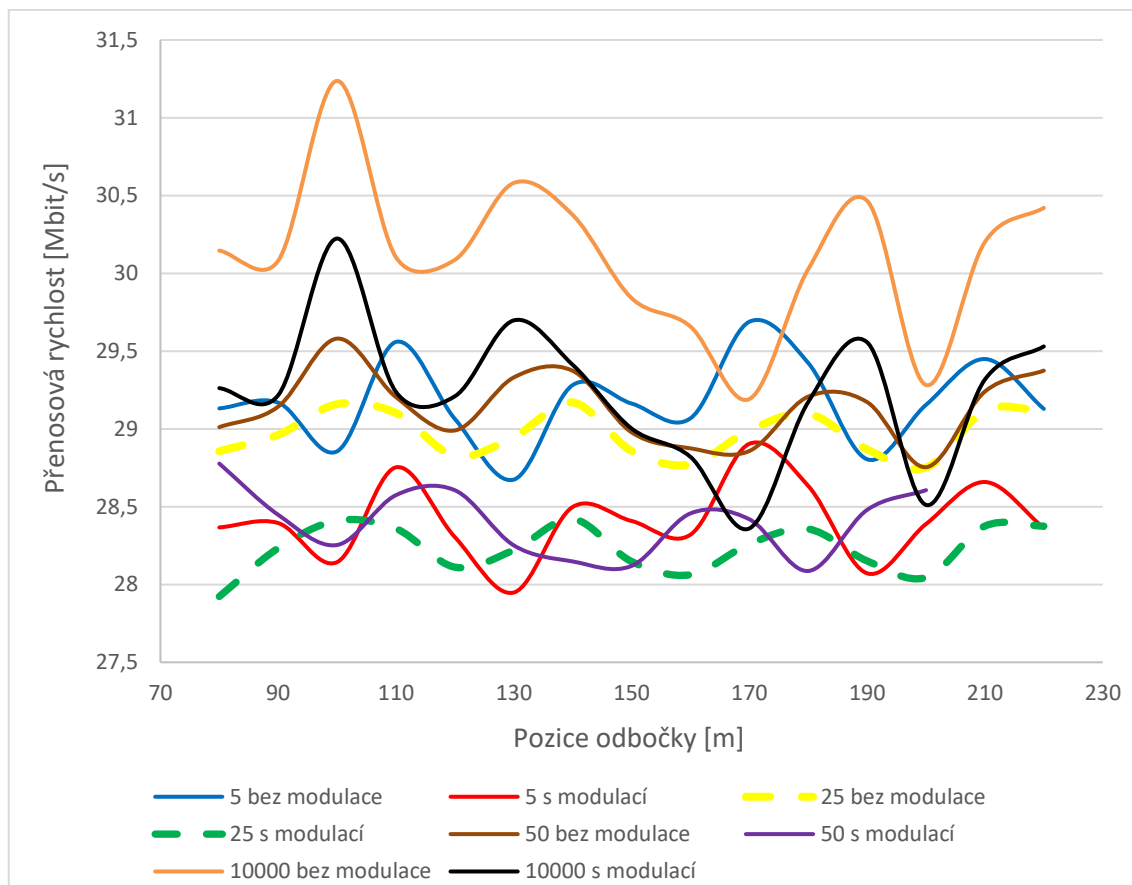
5.1.2. Vliv pozice odbočky na rychlost

V této části jsou popsány výsledky vlivu pozice odbočky na přenosovou rychlost. Délka odbočky byla nastavena na 100 m a tato hodnota byla použita pro všechny simulace.

Vlastnosti zapojení:

- Bod n1 je nastaven jako vysílač a bod n3 je nastaven jako přijímač.
- Simulace byla prováděna pro čtveřici hodnot impedance.
- Modulace byla nastavena na QAM64 (Quadrature amplitude modulation).
- Délka mezi body n1 a n3 byla celou dobu konstantní 300 m.

Pozice odbočky byla měněna vždy se změnou vzdálenosti mezi vysílačem (bod n1) a středovým bodem (bod n2). Vzdálenost těchto dvou bodů byla měněna od 80 do 220 m.

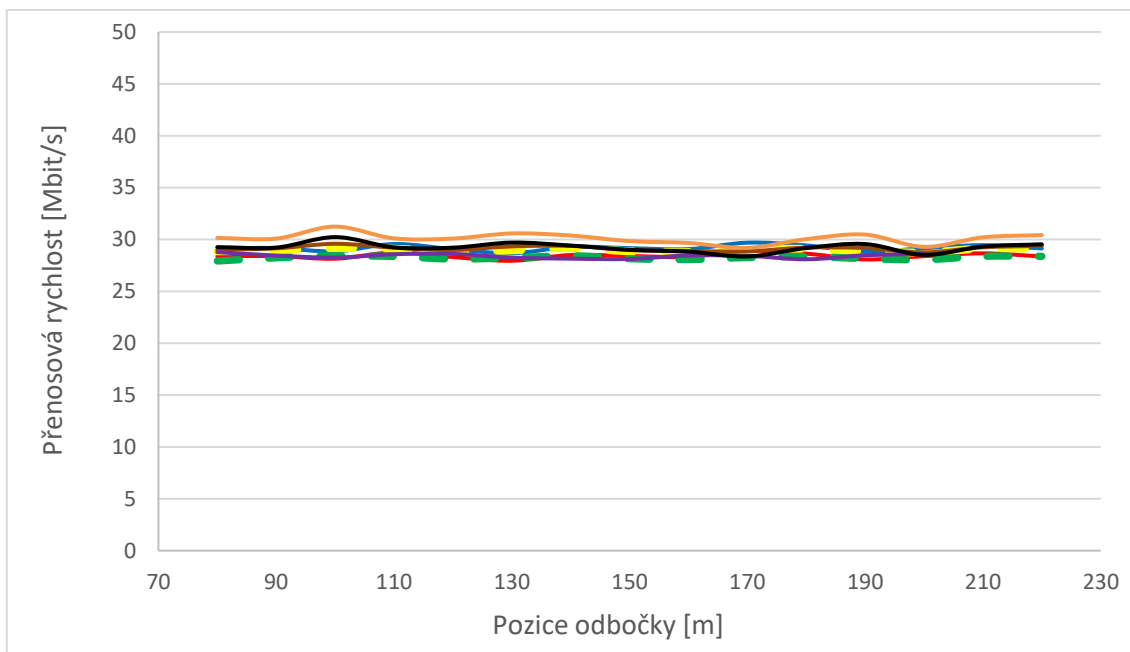


Obr. 19: Závislost přenosové rychlosti na pozici odbočky s měnícím se zakončením

Na Obr. 19 je znázorněna závislost přenosové rychlosti na měnící se pozici odbočky s různými hodnotami impedančního zakončení. Podobně jako u předchozího grafu se zde nachází legenda označující jednotlivé křivky. Opět jsou použity čtyři hodnoty impedancí 5, 25, 50 a 10 000 Ω a pro každou hodnotu je varianta s použitou modulací QAM64 a bez použití modulace.

Z výsledků na Obr. 19 lze vidět, že všechny křivky různě kolísají. Podobně jako u předchozí simulace nejvíce kmitají křivky pro zakončení 10 000 Ω , což je zakončení na prázdko a nejméně 25 Ω , který představuje ideální zakončení. Tyto výsledky jsou však v širokém měřítku konstantní, což vyplývá z Obr. 20.

Výsledek této simulace je stejný jako v předchozí kapitole, a to že pozice odbočky neovlivňuje přenosovou rychlost. Jak lze vidět na Obr. 20, přenosová rychlost zůstává konstantní v závislosti na pozici odbočky.



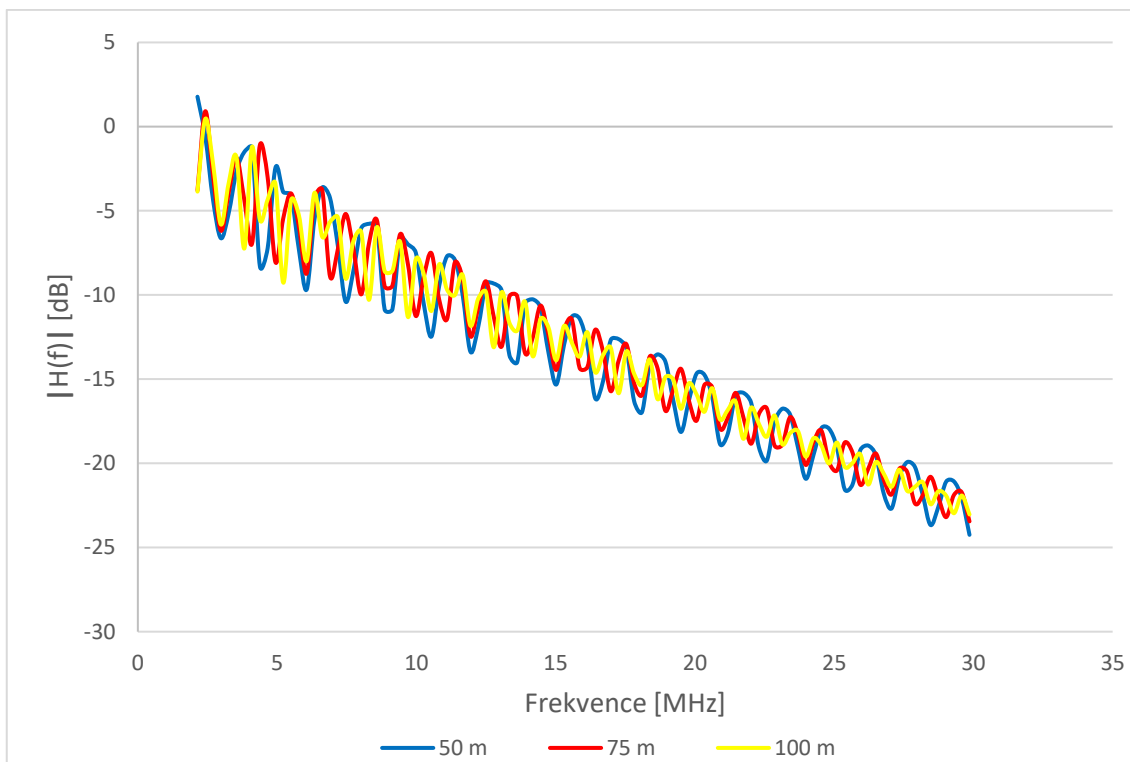
Obr. 20: Závislost přenosové rychlosti na pozici odbočky s měnicím se zakončením v širokém měřítku

5.1.3. Simulace přenosové funkce jedné odbočky

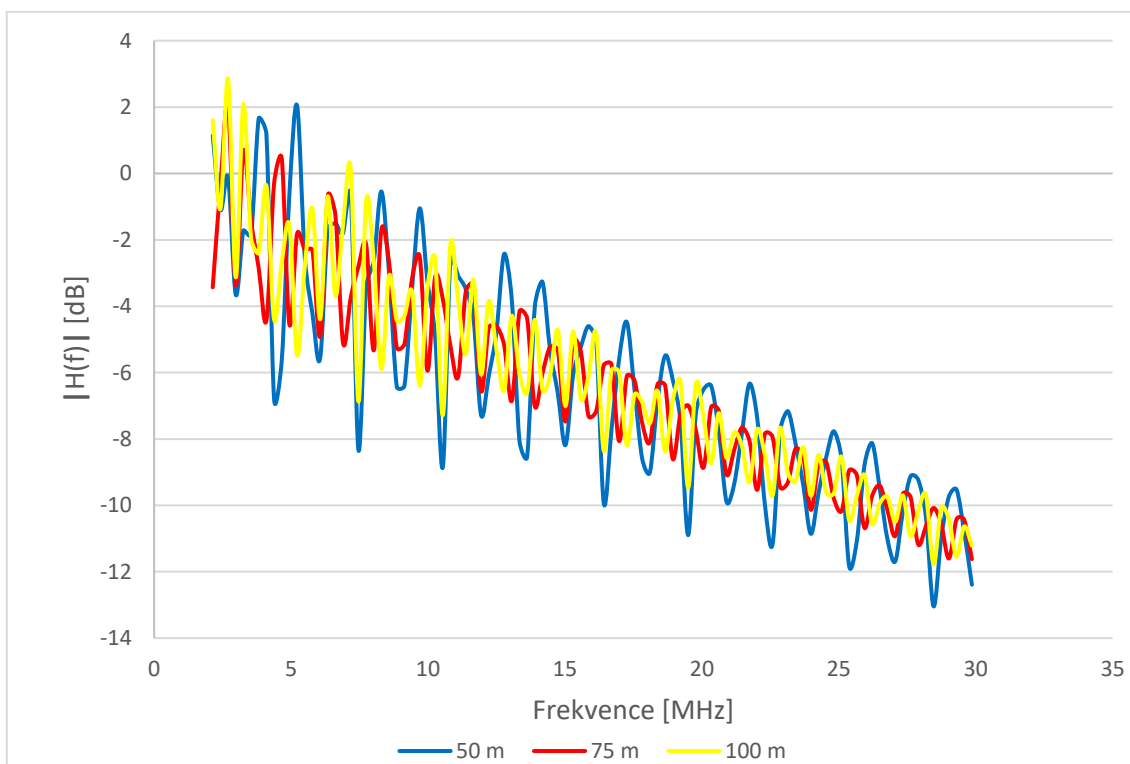
V této části je popsána závislost přenosové funkce na celém frekvenčním pásmu, který je 2-30 MHz. Pro tyto účely byly vybrány dvě hodnoty impedance 5 a 10 000 Ω , které představují zakončení na krátko a na prázdko. Simulace byla provedena jak pro závislost na změně délky odbočky, tak i na změně pozice odbočky.

Vlastnosti zapojení:

- Bod n1 je nastaven jako vysílač a bod n3 je nastaven jako přijímač.
- Simulace byla prováděna pro 2 hodnoty impedance.
- Modulace byla nastavena na QAM64 (Quadrature amplitude modulation).
- Délka trasy mezi body n1 a n3 byla ve dvou variantách, a to v délce 150 m a 300 m.
- Pro simulaci závislosti délky odbočky byla pozice odbočky vždy ve středu celkové trasy a její délka byla měněna mezi třemi hodnotami (50, 75 a 100 m) pro obě varianty trasy.
- Pro simulaci závislosti pozice odbočky byla délka odbočky nastavena na hodnotu 100 m. Pozice mezi vysílačem (n1) a středovým bodem (n2) se měnila mezi třemi hodnotami 25, 75 a 125 m pro variantu s délkou trasy 150 m a 50, 150 a 250 m pro variantu s délkou trasy 300 m.



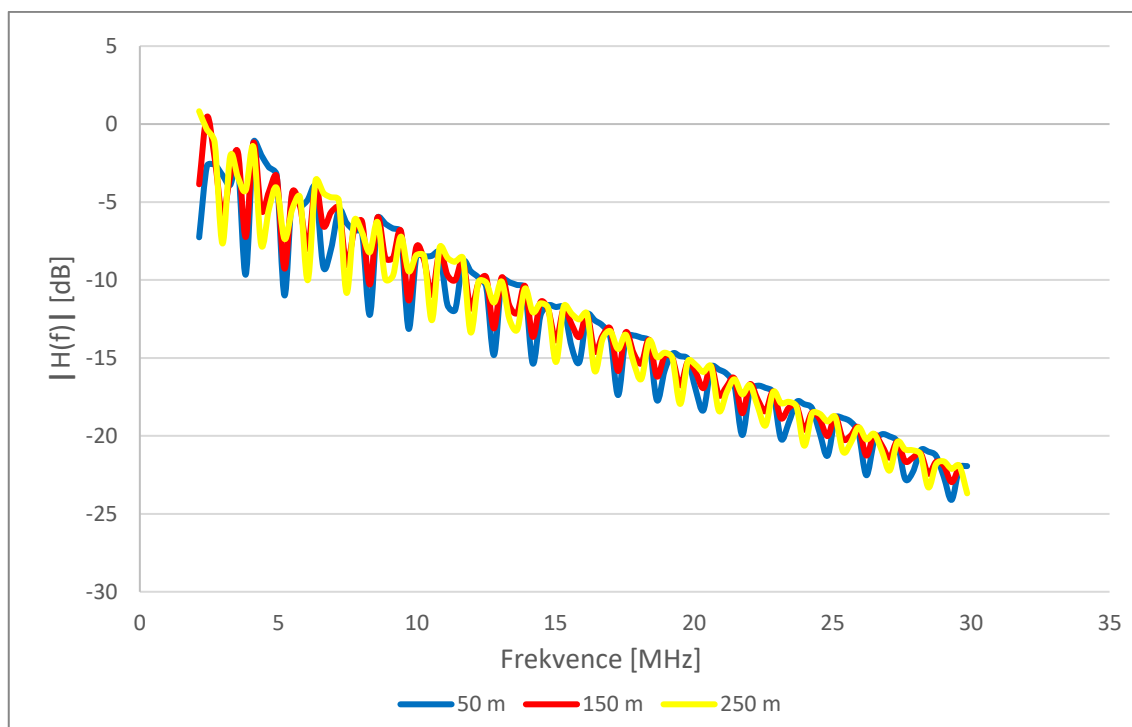
Obr. 21: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5Ω při změně délky odbočky na trase 300 m



Obr. 22: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5Ω při změně délky odbočky na trase 150 m

Obr. 21 a Obr. 22 zobrazují závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní hodnotou impedančního zakončení 5Ω na trase 300 a 150 m. Pod grafy se nachází legenda, která označuje jednotlivé délky odbočky. Na obou grafech je patrné, že křivky se od sebe liší hodnotou přenosové funkce a jejím posunutím.

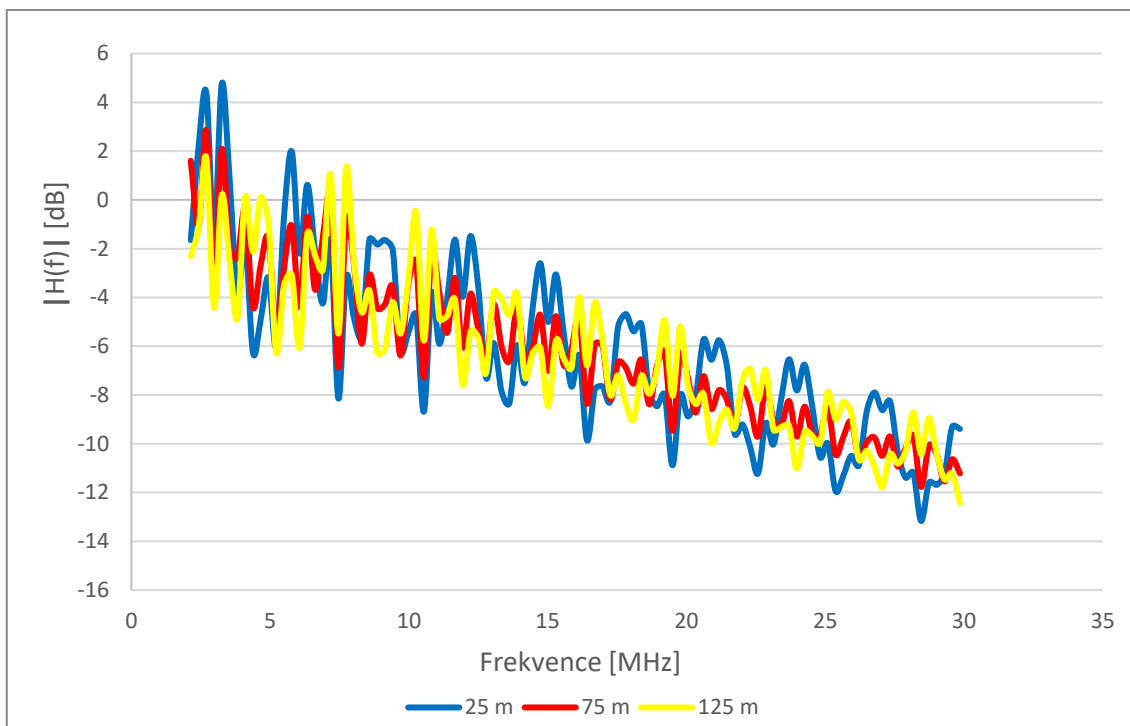
Z těchto grafů vyplývá, že přenosová funkce pro různé délky odbočky se od sebe příliš neliší a lze vidět, že jednotlivé vruby jsou pouze posunuty nebo mají jiná maxima a minima.



Obr. 23: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5Ω při změně pozice odbočky na trase 300 m

Obr. 23 a Obr. 24 zobrazují stejnou závislost jako předešlé dva grafy. Jedná se opět o závislosti přenosové funkce na frekvenčním pásmu s konstantní hodnotou impedančního zakončení 5Ω na trasách 300 a 150 m. Tyto grafy jsou však závislé na změně pozice odbočky, která má konstantní délku 100 m. Pod grafy je opět legenda, která označuje jednotlivé křivky, kdy uvedená hodnota představuje vzdálenost mezi vysílačem a středovým bodem.

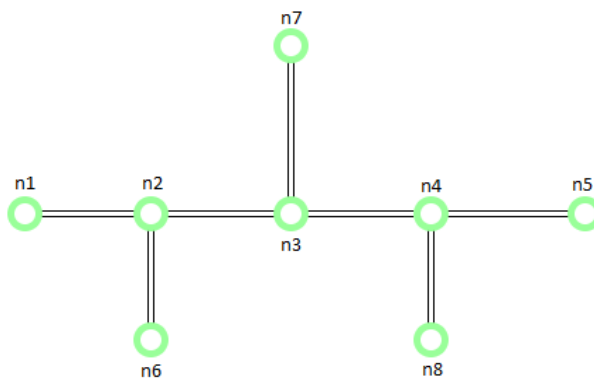
Výstup těchto dvou grafů je podobný jako v předchozím případě při změně délky odbočky. Opět je zde patrné posunutí jednotlivých vrubů a snížení intenzity při změně vzdálenosti odbočky.



Obr. 24: Závislost přenosové funkce na frekvenci s konstantní impedancí 5Ω při změně pozice odbočky na trase 150 m

5.2. Topologie s třemi odbočkami

Druhá navržená topologie pro simulaci parametrů PLC je zobrazena na Obr. 25. Skládá se z osmi bodů označených n1 až n8.



Obr. 25: Topologie se třemi odbočkami

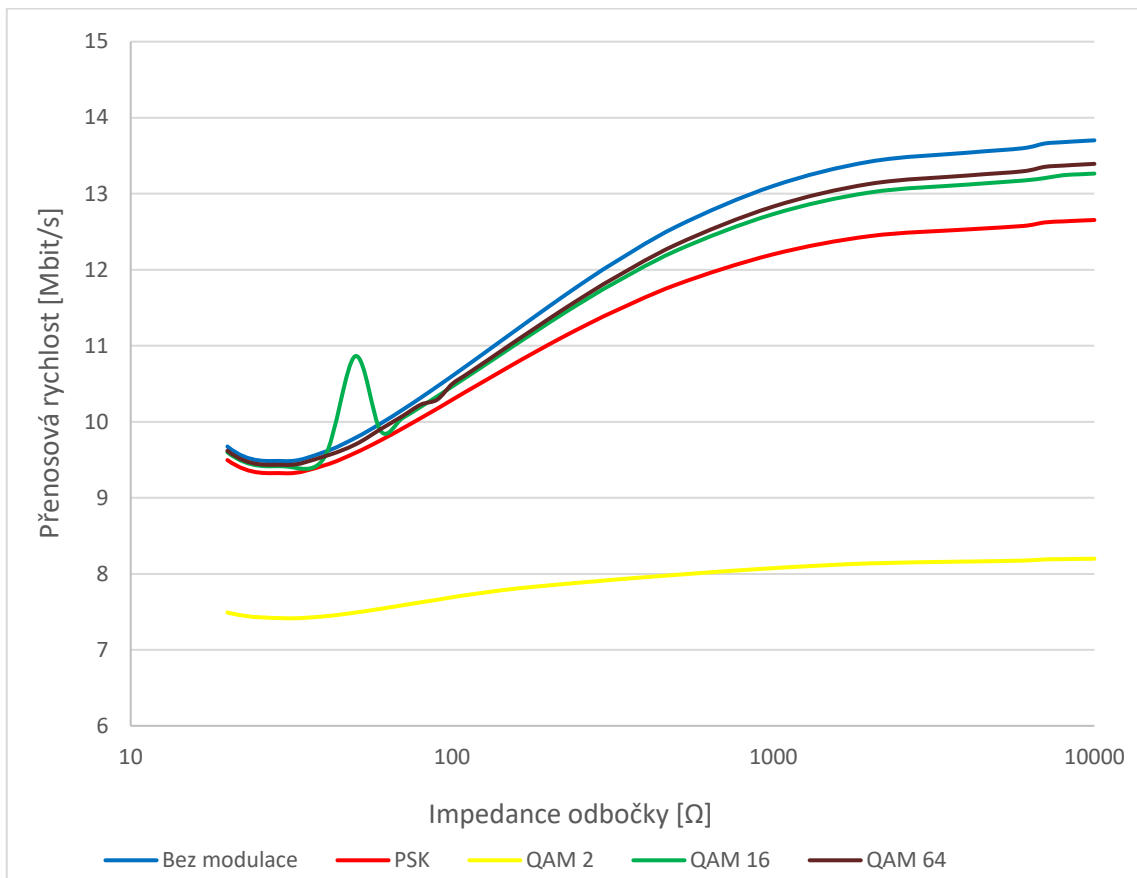
5.2.1. Simulace přenosové rychlosti

V této části jsou proměřeny scénáře, jak se změní přenosová rychlost různých hodnot impedancí odboček.

Vlastnosti zapojení:

- Délka celkové trasy je 300 m.
- Body n1, n2, n3, n4 a n5 jsou od sebe rovnoměrně vzdáleny 75 m.

- Všechny tři odbočky n6, n7 a n8 mají stejnou délku, a to 100 m.
- Bod n1 je nastaven jako vysílač a bod n5 je nastaven jako přijímač.



Obr. 26: Závislost přenosové rychlosti na impedanci odboček v logaritmickém měřítku pro různé modulační schémata

Obr. 26 znázorňuje průběh přenosové rychlosti v Mbit/s v závislosti na impedanci odboček v logaritmickém měřítku a graf na Obr. 27 znázorňuje stejnou závislost, ale je zobrazen v lineárním měřítku. Hodnota impedance byla vždy stejná u všech odboček (n6, n7 a n8). Výstupem těchto grafů je fakt, že s rostoucí impedancí odboček roste lineárně přenosová rychlost, jak je znázorněno na Obr. 26. Na Obr. 27 lze vidět, že při nulové impedanci je dosažena poměrně vysoká hodnota přenosové rychlosti, ale v reálu takové impedance nelze nikdy dosáhnout.

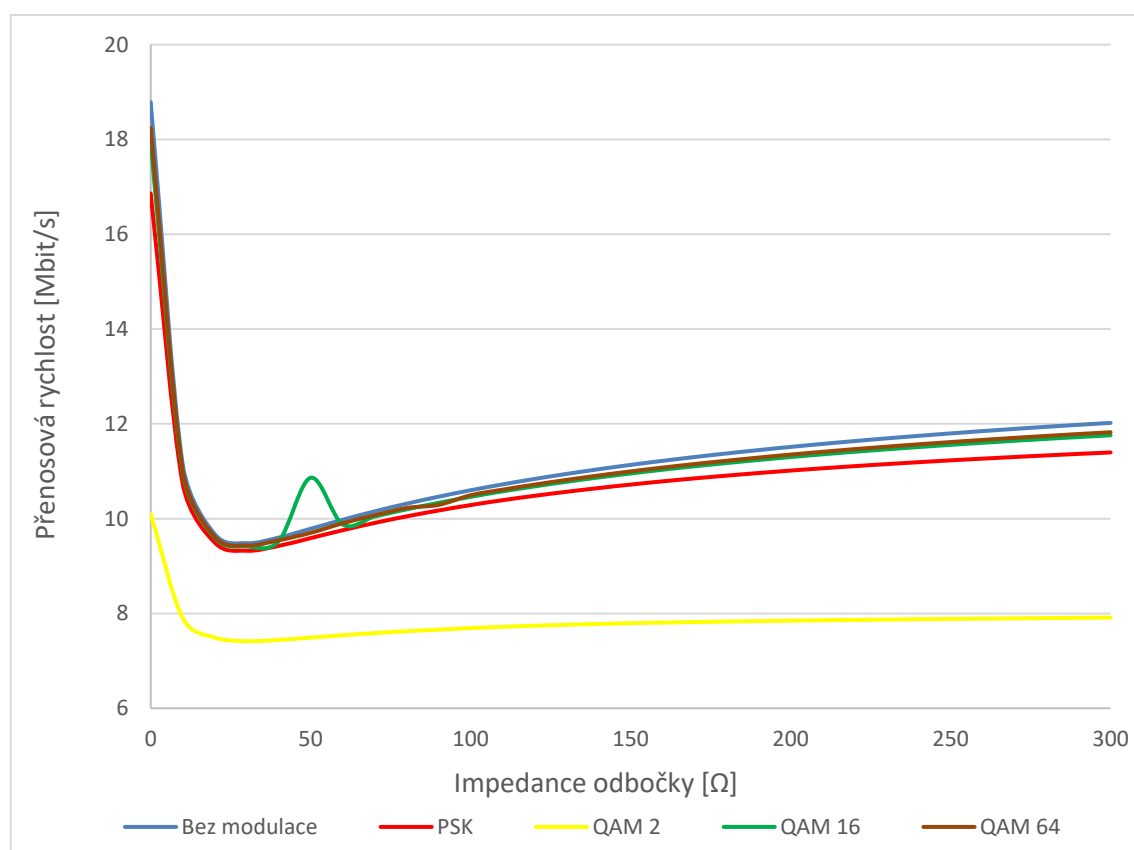
V grafech je zobrazeno 5 křivek a tyto křivky znázorňují modulační schémata, které byly použity pro danou simulaci.

Byly použity čtyři základní modulační schémata:

- PSK (Phase-shift keying): klíčování fázovým posunem
- QAM 2 (Quadrature amplitude modulation): kvadraturní amplitudová modulační schéma dvoustavová
- QAM 16: šestnáctistavová QAM
- QAM 64: šedesát čtyř stavová QAM

Pátou křivkou je simulace bez použití modulace, což tedy představuje teoretický předpoklad.

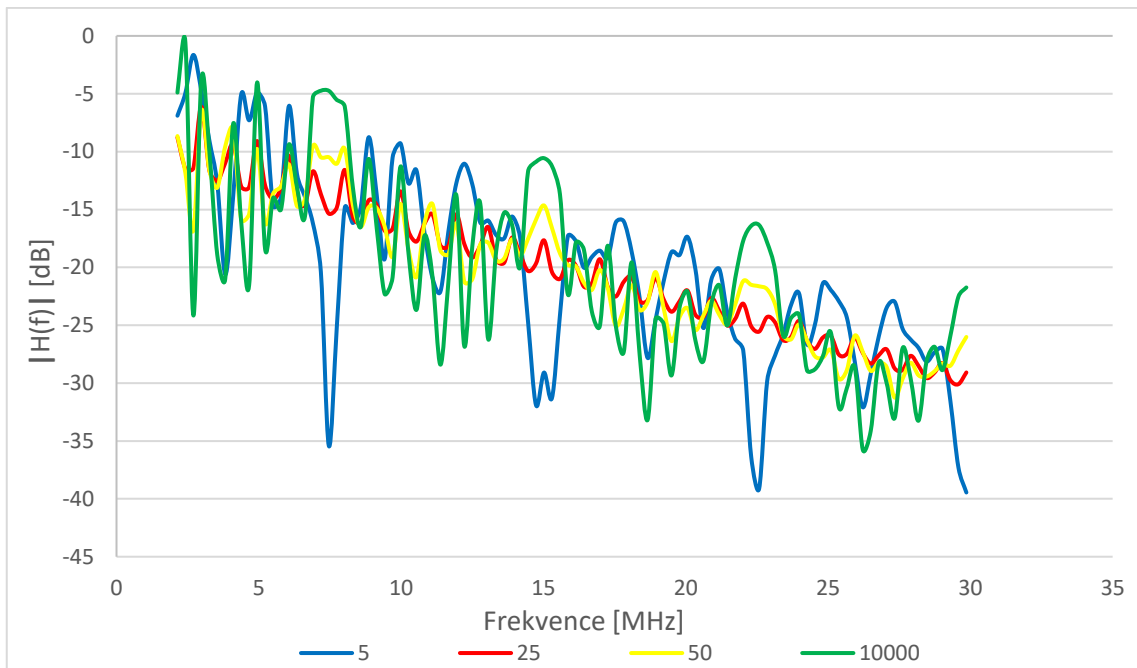
Z obou obrázků Obr. 26 a Obr. 27 vyplývá, že křivky pro PSK, QAM 16 a QAM 64 jsou velmi blízko u sebe a rozdíl je minimální. Tyto křivky se blíží teoretickému předpokladu, tedy křivce označené „Bez modulace“. Nejnižších hodnot bylo dosaženo u modulace QAM 2, tato modulace nemůže dosahovat tak vysokých hodnot jako ostatní modulace. Výstupek u modulace QAM 16 je dobře vidět na obou grafech a představuje charakteristickou impedanci odboček. Znamená to, že při této impedanci lze dosáhnout nejlepších výsledků.



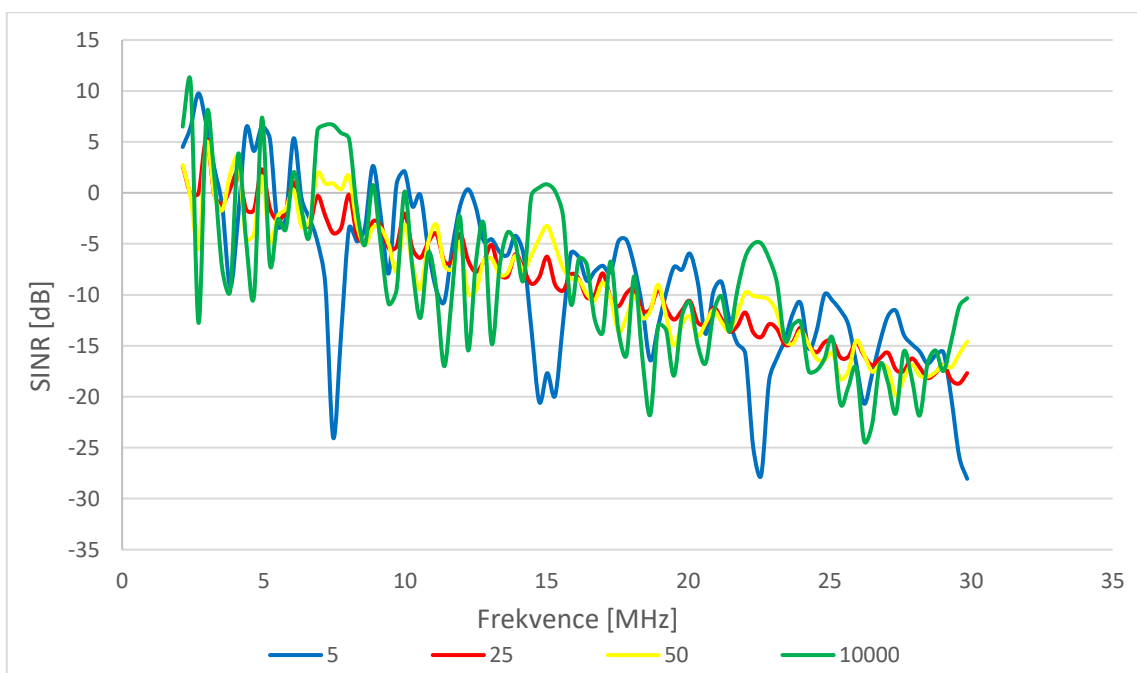
Obr. 27: Závislost přenosové rychlosti na impedanci odboček v lineárním měřítku pro různé modulace

5.2.2. Simulace přenosové funkce a SINR

V této části byly proměřeny závislosti přenosové funkce a SINR na celém frekvenčním pásmu pro topologii se třemi odbočkami.



Obr. 28: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro různé hodnoty impedance



Obr. 29: Závislost SINR na frekvenci pro různé hodnoty impedance

Na Obr. 28 je znázorněna závislost přenosové funkce na celém frekvenčním pásmu (2,8 – 30 MHz). V grafu jsou 4 křivky a každá z nich byla naměřena při jednotné hodnotě impedance všech třech odboček (n_6 , n_7 a n_8).

Význam použitých hodnot impedancí pro odbočku:

- Impedance 5 Ω : tzv. vedení zakončené na krátko, kdy hodnota zakončení se velmi blíží nule.
- Impedance 25 Ω : měla by představovat ideální zakončení.

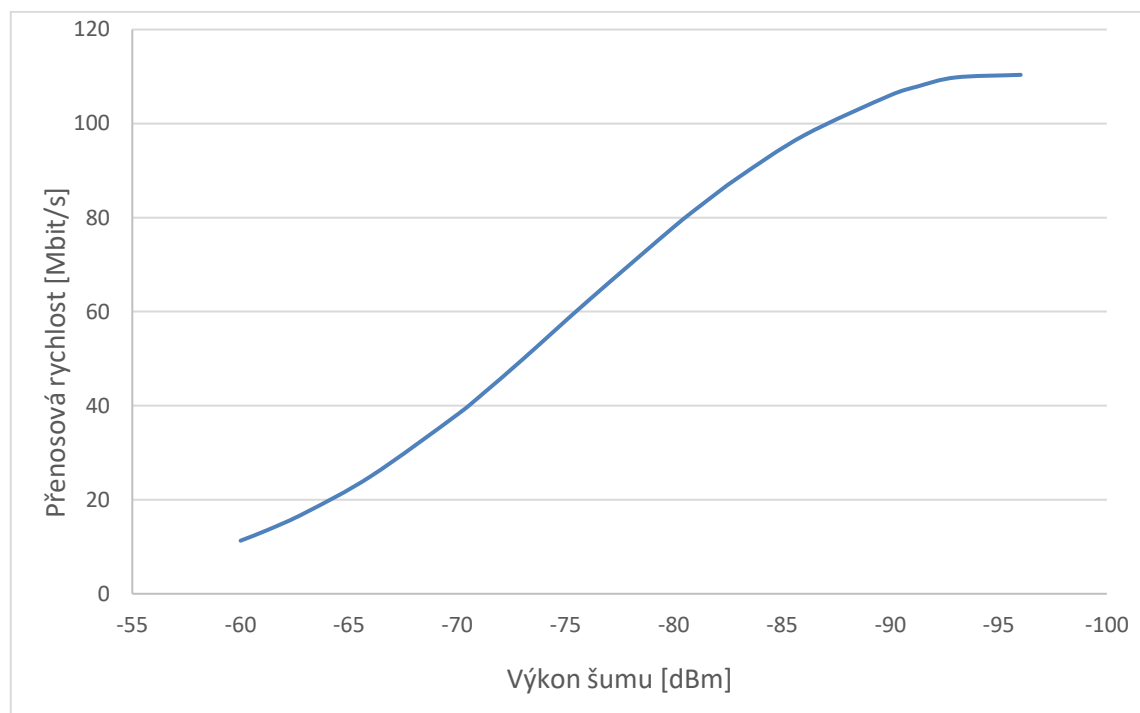
- Impedance 50 Ω : vyšší hodnota ideálního zakončení.
- Impedance 10 000 Ω : tzv. vedení zakončené na prázdko, kdy hodnota zakončení se blíží nekonečnu.

Z Obr. 28 vyplývá, že nejstabilnější křivka je se zakončením 25 Ω (červená), což představuje ideální zakončení. Naopak nejvíce rozkmitaná je křivka označená 10 000 Ω (zelená), takové zakončení může velmi silně negativně ovlivnit komunikaci. U křivky 5 Ω (modrá) jsou velmi dobře patrné tři velké výstupky na cca 7,5 MHz, 15 MHz a 22,5 MHz. Tyto výstupky představují tři odbočky podél přenosové cesty.

Na Obr. 29 je podobný průběh jako na předešlém grafu, ale jedná se o znázornění závislosti SINR na frekvenci. Tento graf pouze potvrzuje správnost předešlého grafu, kde jsou opět vidět stejné výstupky reprezentující odbočky topologie.

5.2.3. Simulace přenosové rychlosti v závislosti na hodnotě šumu

V této části byla simulována závislost přenosové rychlosti v závislosti na hodnotě šumu pozadí.



Obr. 30: Závislost přenosové rychlosti na hodnotě šumu pozadí

Obr. 30 zobrazuje závislost přenosové rychlosti v závislosti na hodnotě šumu pozadí. Hodnota šumu byla měněna od -60 dBm do -95 dBm pro pokrytí jak nízkých tak i vysokých hodnot šumu. Tato simulace byla měřena pro topologii se třemi odbočkami.

Vlastnosti zapojení:

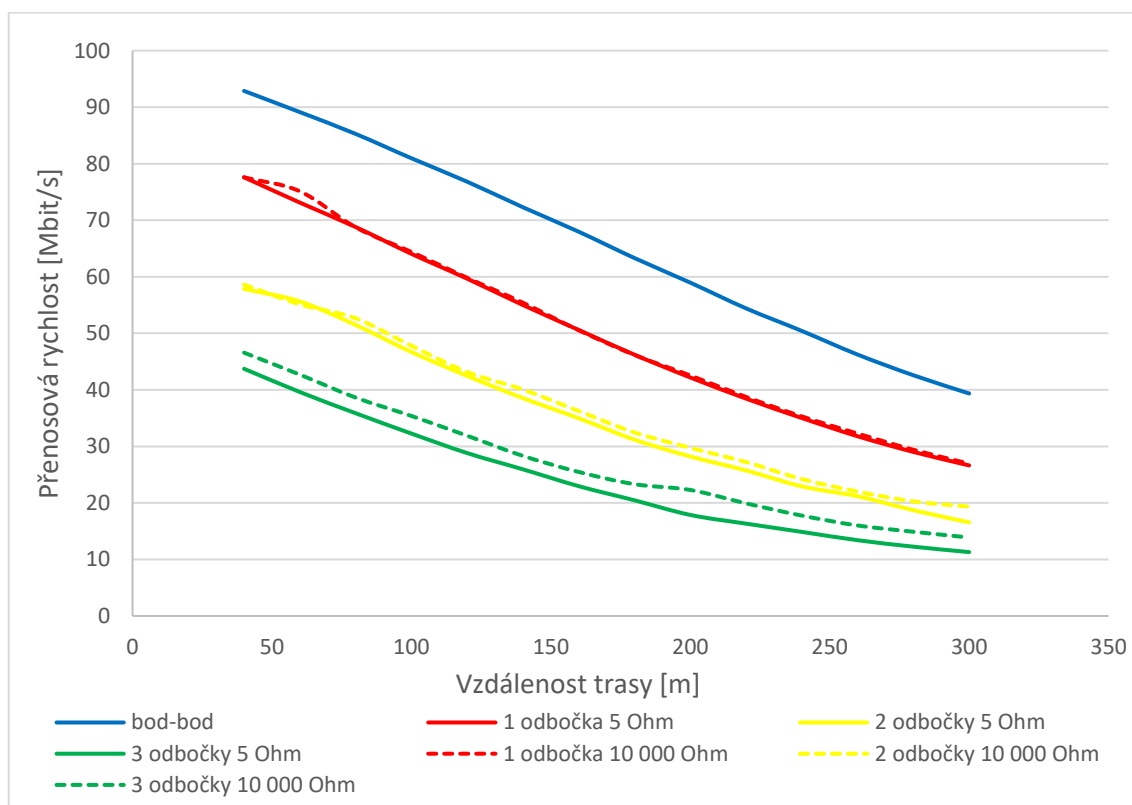
- Délka celkové trasy je 300 m.
- Body n1, n2, n3, n4 a n5 jsou od sebe rovnoměrně vzdáleny 75 m.

- Všechny tři odbočky n6, n7 a n8 mají stejnou délku, a to 100 m a stejnou hodnotu impedance 5 Ω .
- Bod n1 je nastaven jako vysílač s impedancí 40 Ω a bod n5 je nastaven jako přijímač s impedancí 100 Ω .

Graf znázorňuje stoupající tendenci přenosové rychlosti se snižující se hodnotou šumu pozadí. Skok přenosové rychlosti při změně hodnoty šumu o jednu dekádu se pohybuje kolem 40 Mbit/s.

5.3. Porovnání topologií

V této podkapitole jsou zobrazeny výsledky simulace přenosové rychlosti v závislosti na vzdálenosti celkové trasy a různé hodnotě odboček trasy.



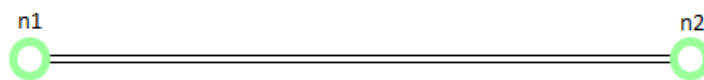
Obr. 31: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti trasy pro různé topologie

Na Obr. 31 je zobrazena závislost jednotlivých topologií se vzrůstajícím počtem odboček. Kromě modré křivky označené „bod-bod“ je pro každou topologii varianta s impedančním zakončením 5 a 10 000 Ω . Všechny varianty byly změřeny pro modulaci QAM64. Délka celkové trasy byla vždy měněna od 40 do 300 m.

Vlastnosti jednotlivých topologií:

Bod-bod (viz Obr. 32):

- Byly pouze dva body n1 a n2.
- Bod n1 je nastaven jako vysílač s impedancí 40 Ω a bod n2 je nastaven jako přijímač s impedancí 100 Ω .



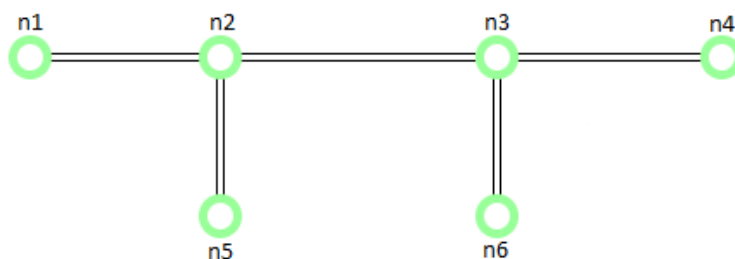
Obr. 32: Topologie bod-bod

1 odbočka (viz Obr. 16)

- Byly použity 4 body n1, n2, n3 a n4.
- Bod n1 je nastaven jako vysílač s impedancí 40Ω a bod n3 je nastaven jako přijímač s impedancí 100Ω .
- Délka odbočky n3 byla nastavena na hodnotu 100 m.
- Pozice středového bodu n2 a odbočky n3 se nacházela vždy ve středu trasy pro každou její délku.

2 odbočky (viz Obr. 33)

- Bylo použito 6 bodů n1 až n6.
- Bod n1 je nastaven jako vysílač s impedancí 40Ω a bod n4 je nastaven jako přijímač s impedancí 100Ω .
- Délky odboček n5 a n6 byly nastaveny na hodnotu 100 m.
- Rozestup, mezi středovými body n2 a n3 s odbočkami n5 a n6, byl vždy stejný pro každou variantu délky trasy.



Obr. 33: Topologie se dvěma odbočkami

3 odbočky (viz Obr. 25)

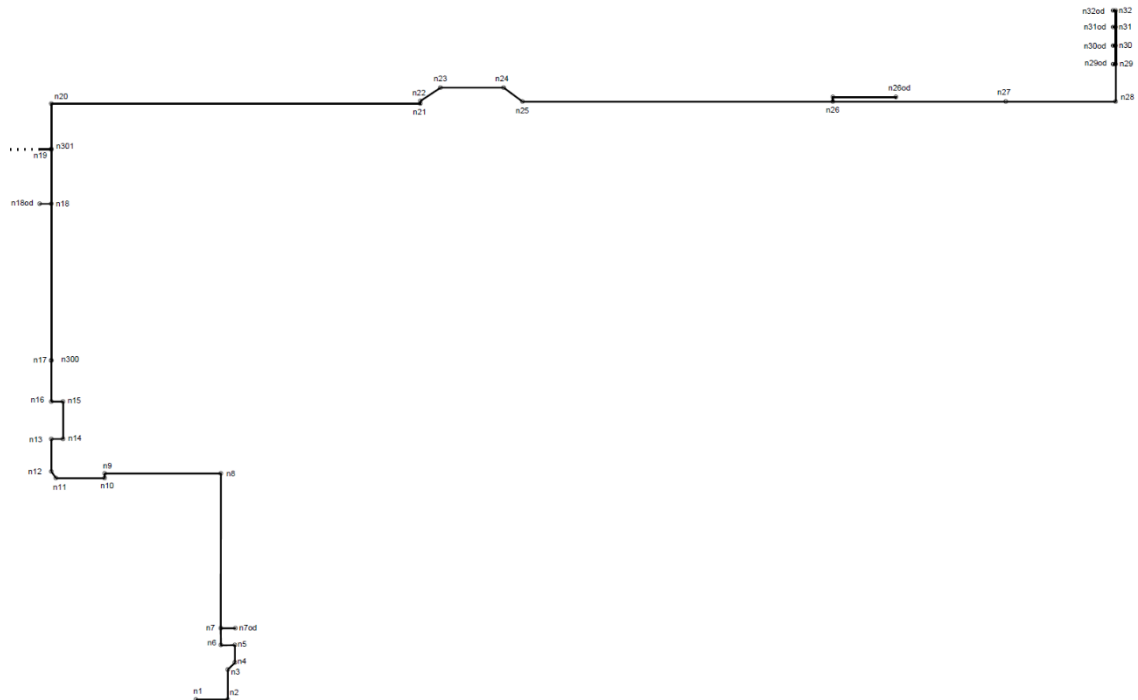
- Bylo použito 8 bodů n1 až n8.
- Bod n1 je nastaven jako vysílač s impedancí 40Ω a bod n5 je nastaven jako přijímač s impedancí 100Ω .
- Délky odboček n6, n7 a n8 byly nastaveny na hodnotu 100 m.
- Rozestup mezi středovými body n2, n3 a n4 s odbočkami n6, n7 a n8 byl vždy stejný pro každou variantu délky trasy.

Výstupem tohoto grafu je ověření předpokladu, že přidáním jedné odbočky (červená křivka) k topologii bod-bod (modrá křivka) se přenosová rychlost sníží. Z grafu vyplývá, že topologie jedné odbočky vykazuje pokles o cca 17 Mbit/s oproti topologií bod-bod. Tento pokles pak zůstal konstantní pro celou délku trasy 300 m. Podobnou tendenci má i křivka pro 2 odbočky (žlutá křivka), kdy rozestup mezi červenou a žlutou křivkou je přibližně 20 Mbit/s. Tento rozestup se však snižoval se vzrůstající vzdáleností celkové trasy. Stejný výsledek je i pro následující rozestup mezi žlutou a zelenou křivkou (3 odbočky).

Modrá křivka (bod-bod) klesá zcela lineárně bez jakýchkoliv viditelných výkyvů. Podobně tomu je i pro červenou křivku (1 odbočka). Pro žlutou (2 odbočky) a zelenou (3 odbočky) křivku, je patrné nelineární klesání, což je způsobeno větším množstvím odboček a jejich vlivu na celkovou rychlost trasy.

6. Simulace PLC komunikace pro velkou topologii

Tato kapitola je zaměřena na simulaci parametrů pro velkou topologii, která představuje menší vesnici (viz Příloha A). Tato topologie byla převzata z diplomové práce na téma Modelování PLC komunikace s využitím network simulátor 3 (NS3) [18].

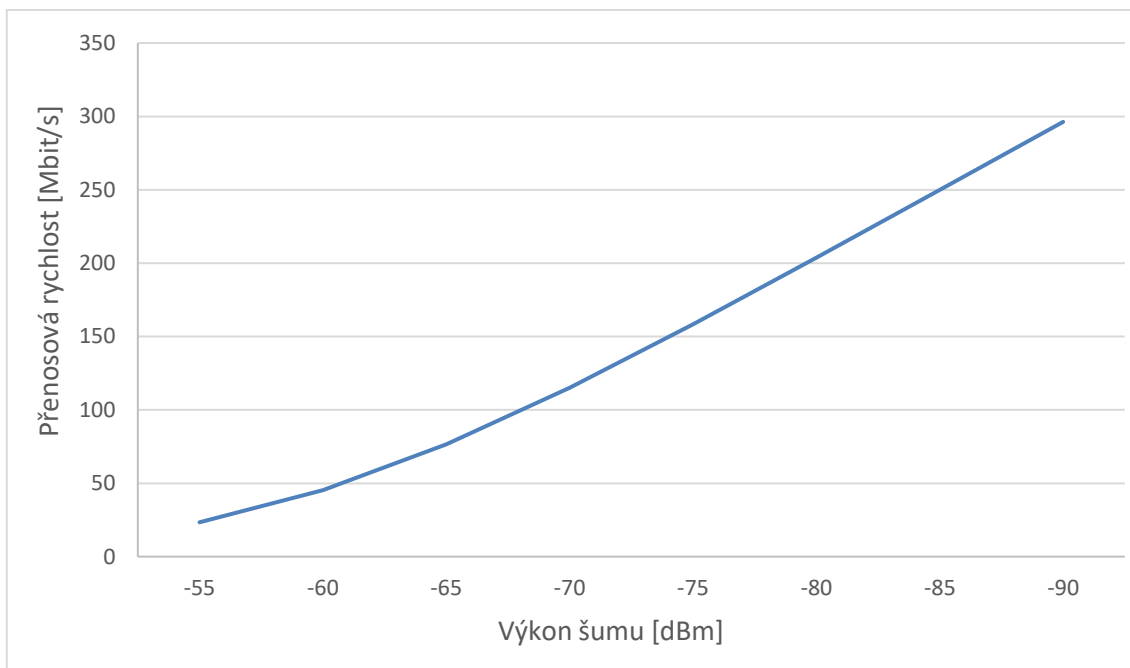


Obr. 34: Výřez z velké topologie pro trasu n1 až n32

Cílem této simulace je zjištění minimálního počtu opakovačů pro zadanou trasu, a pak následné rozložení pro nalezení optimálního rozestupu opakovačů s dosažením nejvyšších hodnot přenosové rychlosti. Simulace byly provedeny pro zadanou trasu od bodu n1 až n32, což je zobrazeno na Obr. 34. Simulace byly provedeny pro různé hodnoty šumu na pozadí. Závislost přenosové rychlosti na hodnotě šumu na pozadí lze vidět na Obr. 35, kde byla simulace provedena na trase bod-bod o délce 300 m.

Použité hodnoty šumu:

- **-90 dBm:** představuje hodnotu, kdy je šum velice nízký, a tudíž by měl představovat ideální podmínky. V přepočtu na watty hodnota šumu odpovídá $1 \cdot 10^{-12} \text{ W} = 1 \text{ pW}$.
- **-70 dBm:** tato hodnota naopak představuje normálně zašuměné prostředí pro přenos. V přepočtu na watty hodnota šumu odpovídá $1 \cdot 10^{-10} \text{ W} = 100 \text{ pW}$. Uvedená hodnota byla použita v této literatuře [19].

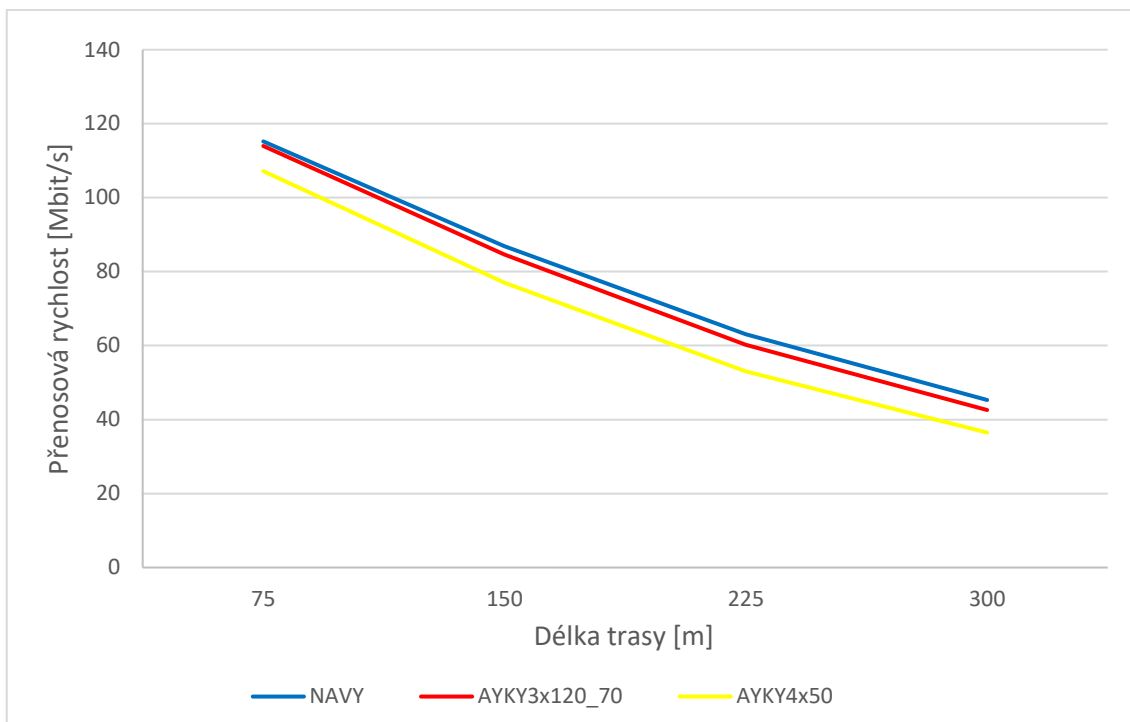


Obr. 35: Závislost přenosové rychlosti na úrovni šumu na pozadí (propojení bod-bod na trase 300 m)

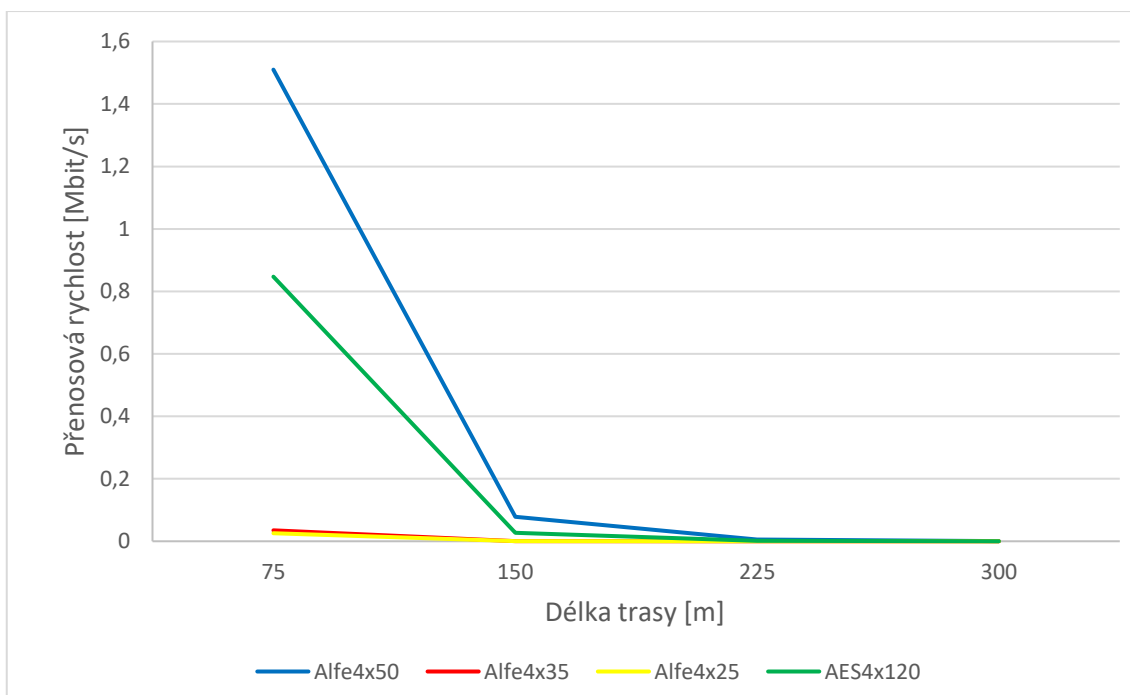
V této topologii bylo použito 7 typů kabelů:

- Podzemní kabeláže:
 - NAVY 4x150
 - AYKY 3x120+70
 - AYKY 4x50
- Venkovní kabeláže
 - AlFe 4x50
 - AlFe 4x35
 - AlFe 4x25
 - AES 4x120

Porovnání jednotlivých kabelů z hlediska přenosové rychlosti je zobrazeno na Obr. 36 pro podzemní kabeláž a na Obr. 37 pro venkovní kabeláž. Simulace byla provedena na trase dlouhé od 75 m do 300 m. Podrobnosti o kabelážích jsou dohledatelné v této publikaci [18].



Obr. 36: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti pro podzemní kabeláž (trasa od 75 m do 300 m)



Obr. 37: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti pro venkovní kabeláž (trasa od 75 m do 300 m)

6.1. Simulace pozice a počtu opakovačů při hodnotě šumu -90 dBm

V této podkapitole jsou popsány simulace přenosové rychlosti. Hlavním cílem bylo zjistit umístění opakovačů pro danou trasu a jejich počet, který je nutný pro udržení zadané hranice přenosové rychlosti při hodnotě šumu -90 dBm.

Vlastnosti zapojení:

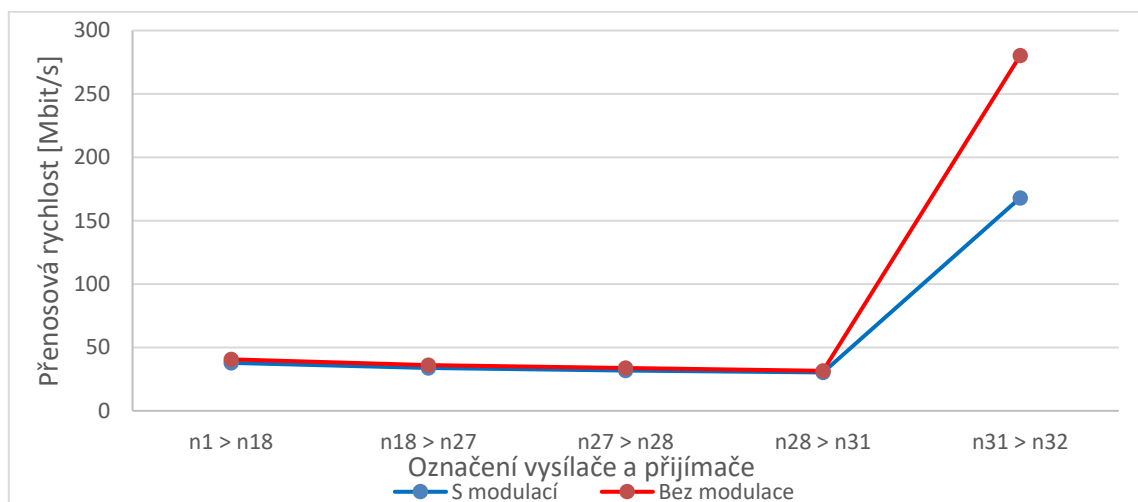
- Byla použita jednotná modulace QAM64 pro všechny simulace.
- Vysílací výkon byl nastaven na hodnotu 13,8 nW dle zdroje [20].
- Hodnota vysílače byla nastavena na 40 Ω a přijímače na 100 Ω .

6.1.1. Simulace pro minimální hranici 30 Mbit/s

Pro tuto simulaci bylo nutné, aby se hodnota přenosové rychlosti pohybovala na 30 Mbit/s nebo nad touto hodnotou.

Tabulka 6: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při minimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)

Označení vysílače a přijímače	Přenosová rychlost s modulací [Mbit/s]	Přenosová rychlost bez modulace [Mbit/s]
n1 → n18	37,7236	40,6959
n18 → n27	33,8491	36,1384
n27 → n28	31,7398	33,8894
n28 → n31	30,2882	31,5539
n31 → n32	168	280,128

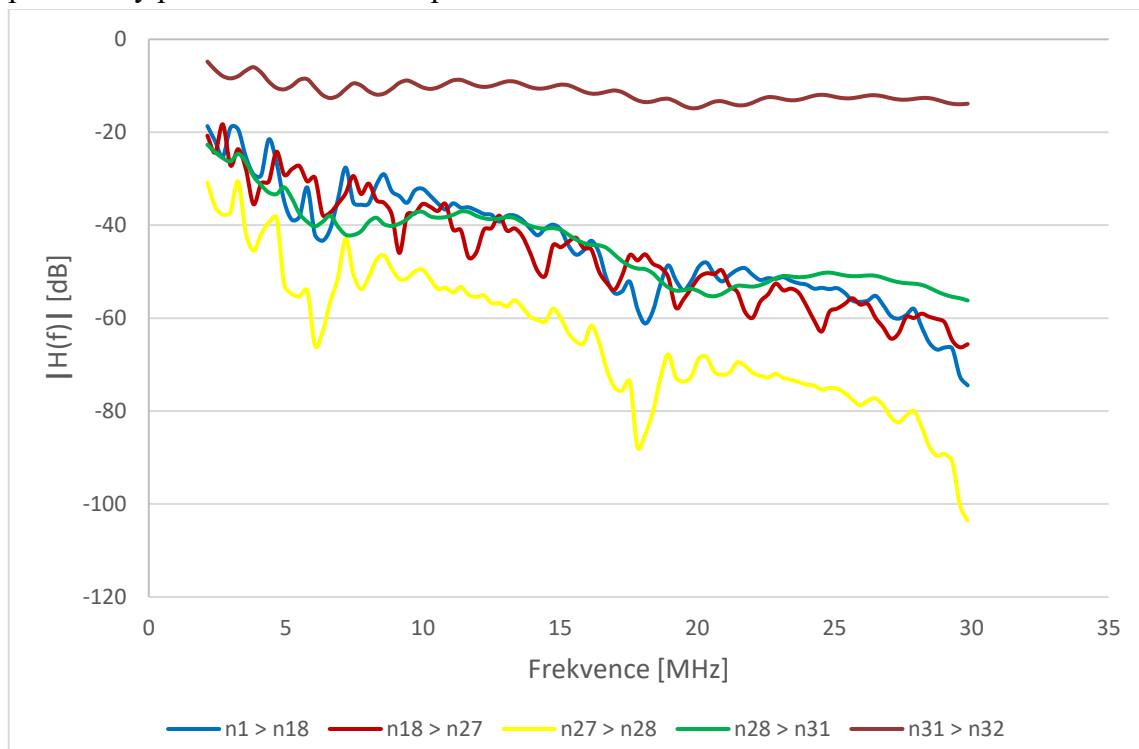


Obr. 38: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 → n32 a jejím udržením při minimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)

Tabulka 6 obsahuje hodnoty přenosových rychlostí na jednotlivých úsecích trasy od n1 do n32. Cílem této simulace bylo udržet hodnotu přenosové rychlosti nad 30 Mbit/s, což bylo splněno. V tabulce je uvedena hodnota při použití modulace, která odpovídá více skutečnosti. Dále je zde hodnota bez použití modulace, která představuje teoretickou hranici.

Obr. 38 ukazuje hladiny hodnot přenosové rychlosti podél trasy, které jsou vypsány v tabulce. V grafu jsou dvě křivky. Červená křivka představuje hodnoty bez použití modulace a modrá křivka s použitím modulace. Podél většiny trasy se podařilo udržet vždy hodnotu nad požadovaných 30 Mbit/s. Skok na konci představuje konec trasy, kde se poslední dva body nacházely velmi blízko sebe.

Výsledkem simulace bylo zjištění, že pro udržení hranice 30 Mbit/s je nutno podél trasy použít minimálně 4 opakovače.



Obr. 39: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 → n32 při minimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)

Na Obr. 39 je zobrazena závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy mezi bodem n1 až n32, při udržení hranice 30 Mbit/s.

6.1.2. Simulace pro optimální hranici 30 Mbit/s

V této simulaci bylo zjišťováno optimální rozestoupení opakovačů z předešlé kapitoly, kde se měřilo umístění pro minimální hranici 30 Mbit/s.

Tabulka 7: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při optimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)

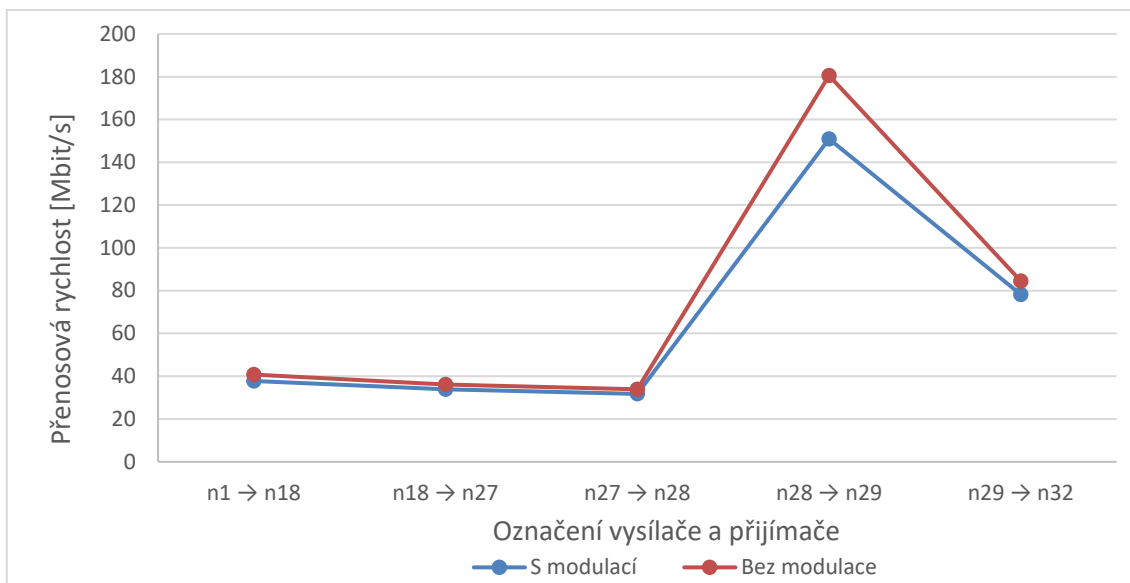
Označení vysílače a přijímače	Přenosová rychlost s modulací [Mbit/s]	Přenosová rychlost bez modulace [Mbit/s]
n1 → n18	37,7236	40,6959
n18 → n27	33,8491	36,1384
n27 → n28	31,7398	33,8894
n28 → n29	150,914	180,537
n29 → n32	78,2369	84,4855

Při simulaci byl změněn pouze konec trasy, kde místo úseku n28 → n31 a n31 → n32 (viz Obr. 38) byly použity úseky n28 → n29 a n29 → n32, což je vidět v Tabulka 7. Graficky je tento průběh zobrazen na Obr. 40, kde původní velký skok na konci trasy u úseku n31 → n32 byl umístěn na bod n29 pro optimální rozložení přenosové rychlosti.

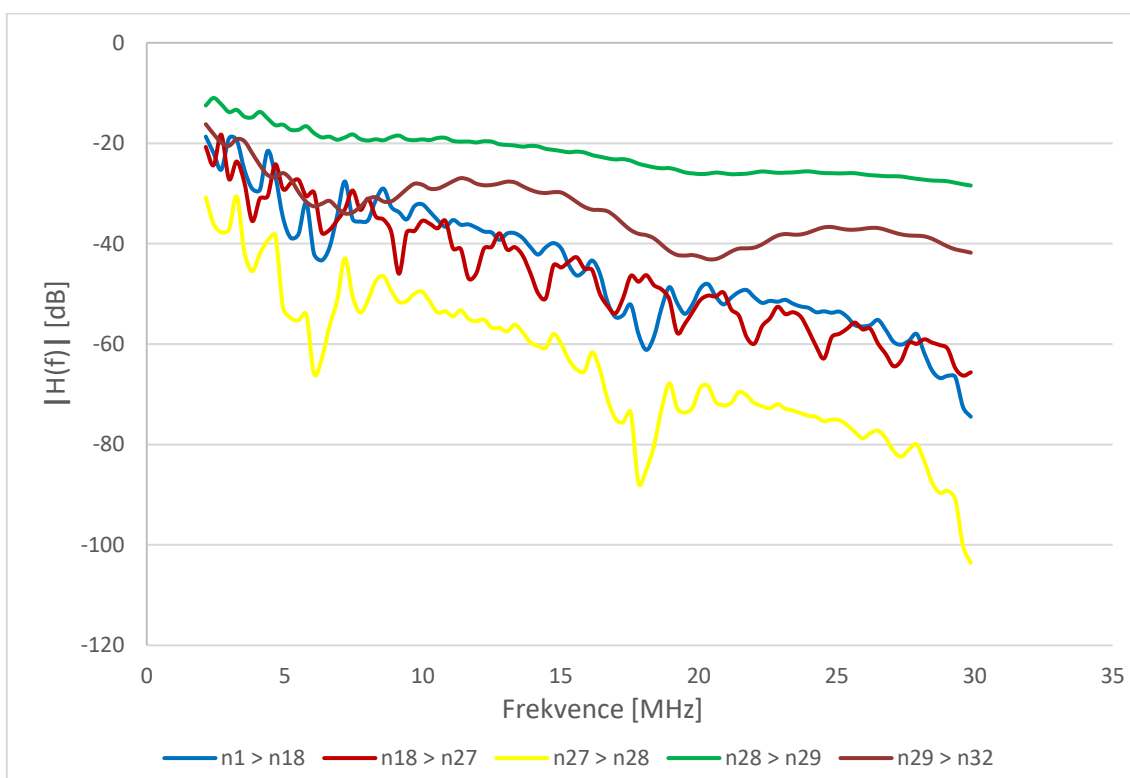
Úseky na začátku n1 → n18, n18 → n27 a n27 → n28 nelze přemístit nebo jakýmkoliv způsobem upravit pro lepší rozložení přenosové rychlosti. Je to z důvodu změny kabelů v těchto místech:

- V úseku **n17 → n18** je použita kabeláž Alfe4x50, která velmi výrazně snižuje přenosovou rychlost, jak lze vidět na Obr. 37.
- V úseku **n18 → n27** je použito několik kabeláží, ale v tomto místě nemá smysl měnit pozici opakovače, protože se už nachází na optimálním místě.
- V úseku **n27 → n28** je použita Alfe4x35, která také výrazně snižuje přenosovou rychlost, jak je vidět na Obr. 37.

Celková trasa se částečně rozložila a v nejužším místě byla hodnota přenosové rychlosti 31,7398 Mbit/s při použití modulace.



Obr. 40: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 → n32 a jejím udržením při optimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)



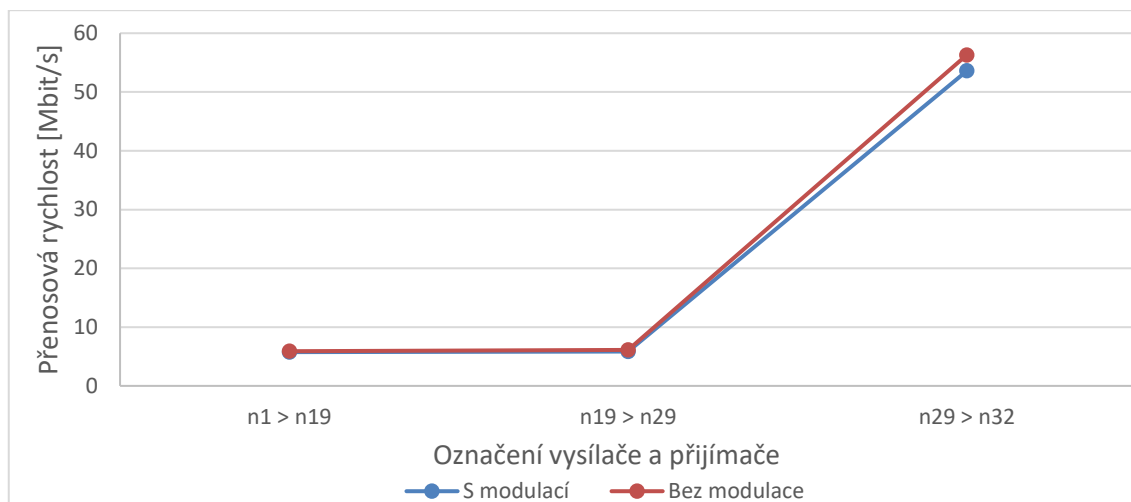
Obr. 41: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 → n32 při optimální hranici 30 Mbit/s (šum -90 dBm)

6.1.3. Simulace pro minimální hranici 5 Mbit/s

Pro druhou simulaci bylo nutné, aby se hodnota přenosové rychlosti pohybovala na 5 Mbit/s nebo nad touto hodnotou.

Tabulka 8: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při minimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)

Označení vysílače a přijímače	Přenosová rychlost s modulací [Mbit/s]	Přenosová rychlost bez modulace [Mbit/s]
n1 → n19	5,7462	5,9019
n19 → n29	5,8638	6,126
n29 → n32	53,5867	56,3056

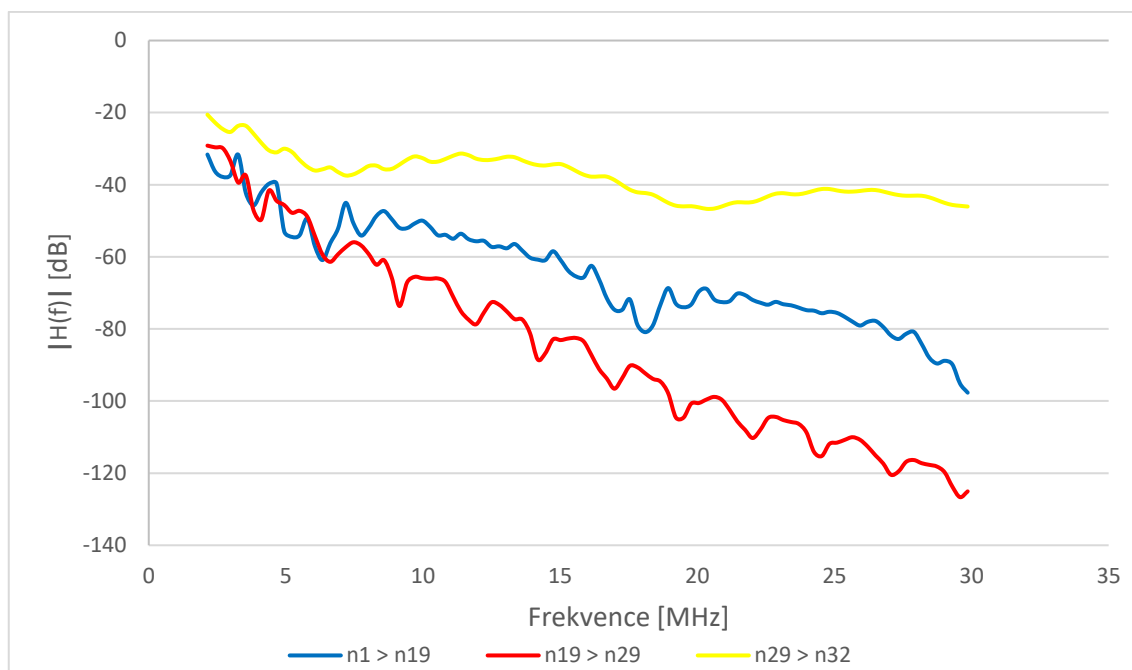


Obr. 42: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 → n32 a jejím udržením při minimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)

V tomto případě bylo cílem udržet hodnotu přenosové rychlosti kolem 5 Mbit/s, což bylo splněno (viz Tabulka 8).

Obr. 42 ukazuje, podobně jako v předchozích grafech, hladiny hodnot přenosové rychlosti, které byly vypsány v tabulce. Na konci se nachází skok, který představuje konec trasy, kde se poslední dva body nacházely velmi blízko sebe.

Výsledkem simulace bylo zjištění, že pro udržení hranice kolem 5 Mbit/s, je pro správnou komunikační trasu nutné použít minimálně 2 opakovače.



Obr. 43: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 → n32 při minimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)

6.1.4. Simulace pro optimální hranici 5 Mbit/s

V této simulaci bylo zjišťováno, podobně jako v kapitole 6.1.2, optimální rozestoupení opakovačů, kde se měřilo umístění pro minimální hranici 5 Mbit/s.

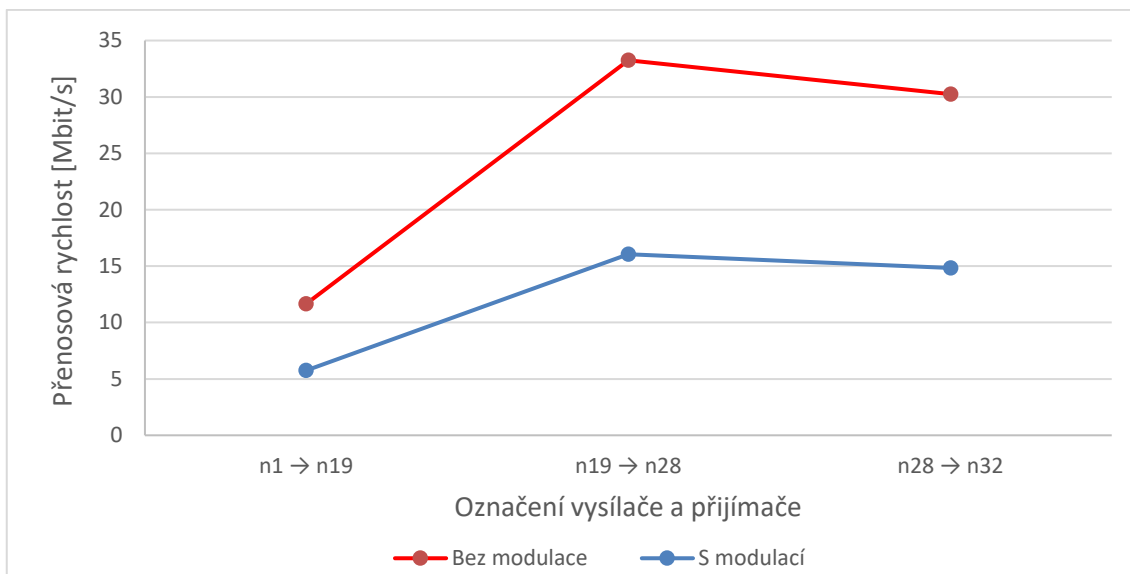
Tabulka 9: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při optimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)

Označení vysílače a přijímače	Přenosová rychlost s modulací [Mbit/s]	Přenosová rychlost bez modulace [Mbit/s]
n1 → n19	5,7462	5,9019
n19 → n28	16,0529	17,1948
n28 → n32	14,8289	15,40602

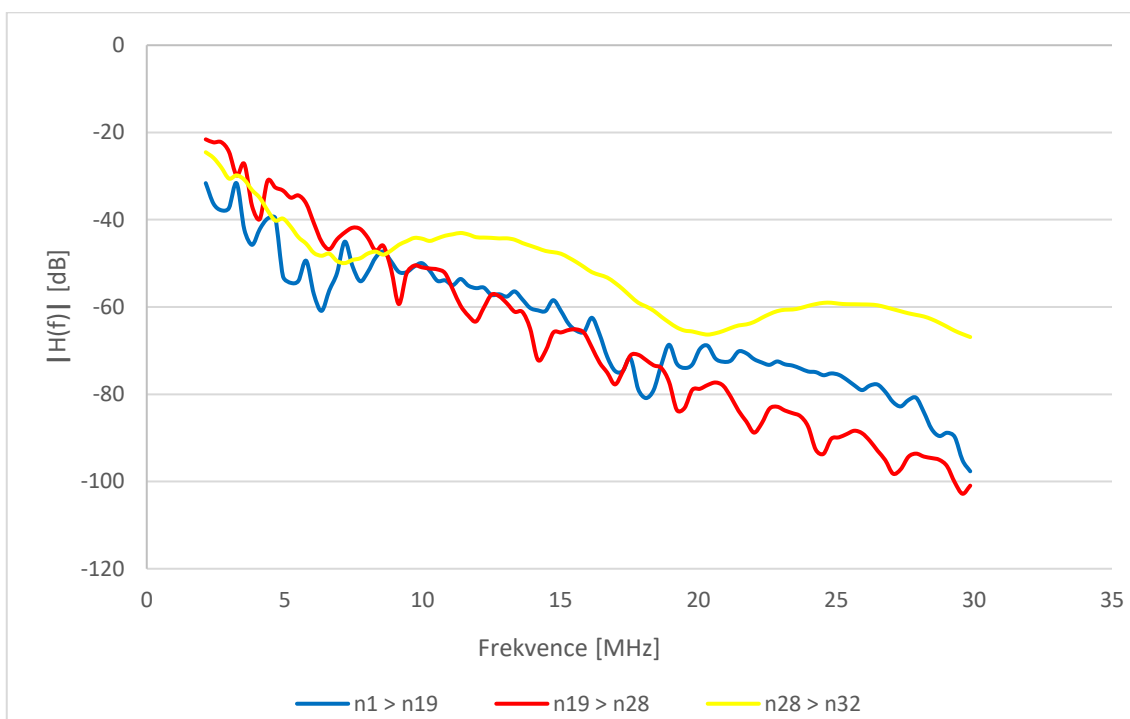
Z Tabulka 9 lze vidět, že poslední dva úseky byly změněny oproti Tabulka 8 v předchozí kapitole. Poslední skok n29 → n32, který se pohyboval kolem 50 Mbit/s byl optimálně rozložen mezi úseky n19 → n28 a n28 → n32 na hodnoty cca 15 Mbit/s při modulaci.

Úsek n1 → n19 nemohl být změněn, protože ve spoji mezi n17 a n18 byla použita kabeláž Alfe4x50, která velmi výrazně snižuje přenosovou rychlost, což je vidět na Obr. 37. Tento bod se už nachází ve své optimální poloze a není ho tedy nutné přemísťovat. Graficky je tento průběh znázorněn na Obr. 44.

Tímto způsobem byla trasa optimalizována a v nejužším místě je hodnota přenosové rychlosti 5,7462 Mbit/s při použití modulace.



Obr. 44: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou n1 → n32 a jejím udržení při optimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)



Obr. 45: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy n1 → n32 při optimální hranici 5 Mbit/s (šum -90 dBm)

6.2. Simulace pozice a počtu opakovačů při hodnotě šumu -70 dBm

V následující podkapitole byly provedeny stejné simulace přenosové rychlosti od bodu n1 až n32 (viz Obr. 34). Opět je zde hlavním cílem zjištění umístění opakovačů pro

danou trasu a jejich počet, který je nutný pro udržení zadané hranice přenosové rychlosti. Nyní při hodnotě šumu -70 dBm, která představuje podmínky pro silnější rušení prostředí oproti -90 dBm.

Vlastnosti zapojení:

- Byla použita jednotná modulace QAM 64 pro všechny simulace.
- Vysílací výkon byl nastaven na hodnotu 13,8 nW.
- Hodnota vysílače byla nastavena na 40 Ω a přijímače na 100 Ω .

6.2.1. Simulace pro minimální hranici 5 Mbit/s

Pro tuto simulaci bylo nutné, aby se hodnota přenosové rychlosti pohybovala na 5 Mbit/s nebo nad touto hodnotou.

Tabulka 10: Tabulka výsledků simulace pro zjištění polohy opakovače při hranici 5 Mbit/s (šum -70 dBm)

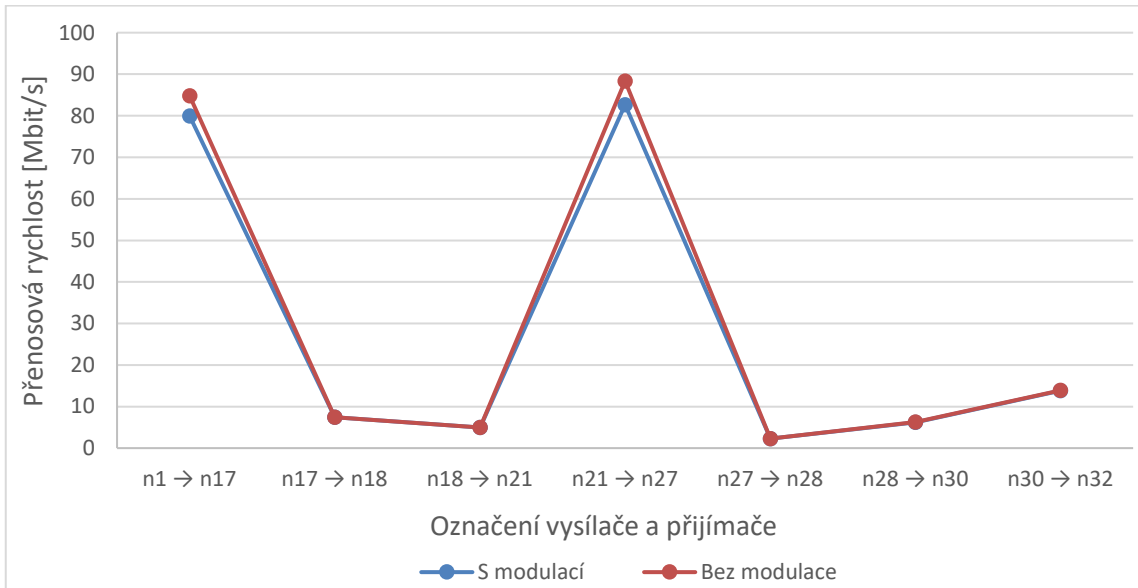
Označení vysílače a přijímače	Přenosová rychlost s modulací [Mbit/s]	Přenosová rychlost bez modulace [Mbit/s]
n1 → n17	79,9238	84,8002
n17 → n18	7,40271	7,44617
n18 → n21	4,96211	4,97624
n21 → n27	82,6557	88,3489
n27 → n28	2,28494	2,29065
n28 → n30	6,2332	6,27643
n30 → n32	13,8162	13,907

Tabulka 10 obsahuje hodnoty přenosových rychlostí pro jednotlivé úseky trasy od n1 do n32. Úkolem této simulace bylo udržet hodnotu přenosové rychlosti při 5 Mbit/s, což nebylo možné splnit.

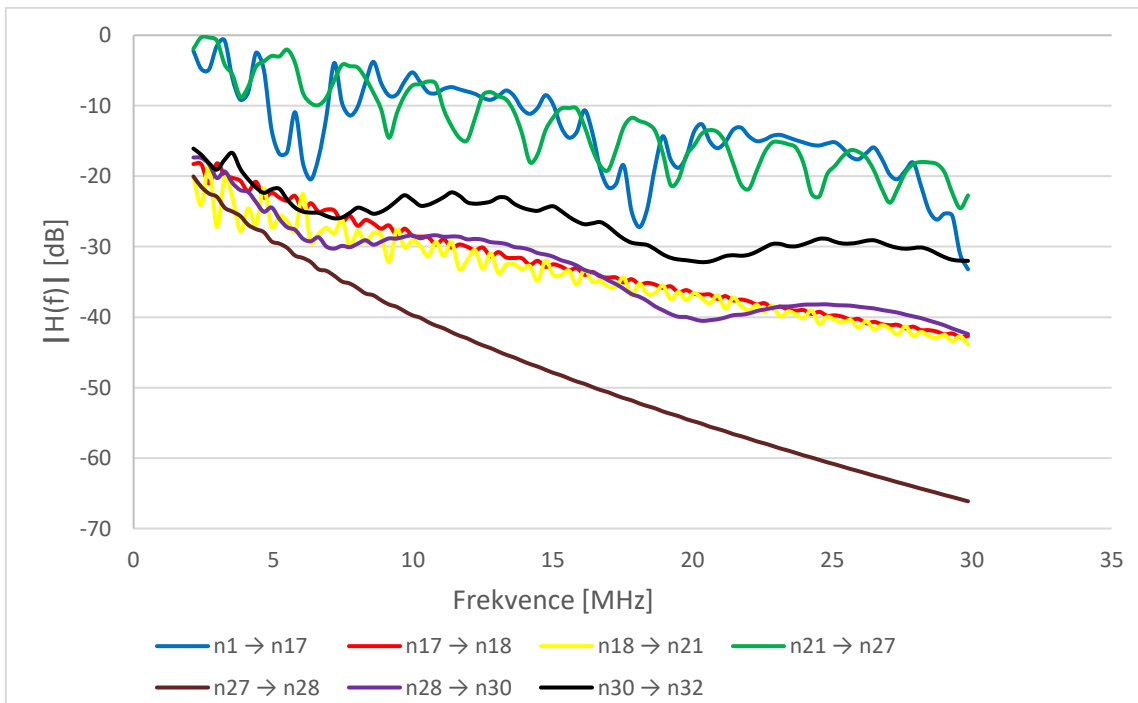
Obr. 46 ukazuje hladiny hodnot přenosové rychlosti podél trasy, které jsou vypsány v tabulce. Zde bylo velice obtížné udržet přenosovou rychlost při hranici 5 Mbit/s. Při pokusu o přenos z bodu n1 do n18 hodnota rychlosti klesla na 2 Mbit/s, což představuje s porovnáním u n1 → n17 pokles až o více jak 70 Mbit/s. Pokles může být způsoben přechodem dvěma různými kabely v bodě n17 nebo vlivem připojení druhé velké větve u uzlu n19. V bodě n17 je přechod z kabelu z NAVY 4x150 na Alfe 4x50, který výrazně snižuje přenosovou rychlost. Porovnání těchto dvou kabelů je zobrazeno na Obr. 36 pro kabel NAVY 4x150, který je podzemním kabelem a Obr. 37 pro Alfe 4x50, který je venkovním kabelem.

Další velký pokles se nachází mezi body n27 a n28. Při pokusu o přenos mezi body n21 a n28 klesla rychlost na 2 Mbit/s, což představuje pokles o téměř 80 Mbit/s

s porovnáním mezi body $n21 \rightarrow n27$. Tento pokles může být způsoben opět přechodem mezi dvěma různými kabely. V bodě $n27$ je přechod mezi AYKY4x50 na Alfe4x35, který výrazně snižuje rychlost. Porovnání těchto dvou kabelů je opět na Obr. 36 pro kabel AYKY 4x50, který je podzemním kabelem a Obr. 37 pro Alfe 4x35, který je venkovním kabelem.



Obr. 46: Graf průběhu přenosové rychlosti trasou $n1 \rightarrow n32$ a jejím udržení při hranici 2 Mbit/s (šum -70 dBm)

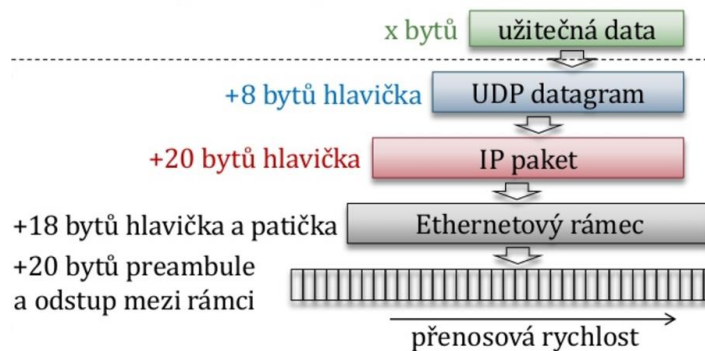


Obr. 47: Závislost přenosové funkce na frekvenci pro jednotlivé úseky trasy $n1 \rightarrow n32$ při hranici 5 Mbit/s (šum -70 dBm)

Pro tuto simulaci je velmi obtížné odhadnout optimální počet a pozici opakovačů. Rozhodně je nutné umístit opakovače do míst, kde se nacházely velké poklesy rychlosti, které jsou způsobeny přechody mezi kabely. Z výsledků simulace vyplývá, že pro tuto trasu s danou hladinou šumu (-70 dBm) je nutné použít minimálně 7 a v ideálním případě 8 opakovačů.

7. Přenosová rychlost a vliv hlaviček protokolů

Veškeré naměřené hodnoty v předchozích kapitolách byly hodnoty přenosové rychlosti na fyzické vrstvě. Tato hodnota je však osvobozena od tzv. režii protokolů. Širokopásmová komunikace se převážně používá pro připojení internetové komunikace a stejně jako jakákoliv jiná entita na internetu podléhá vrstvomému modelu TCP/IP, kdy užitečná data musí nejprve projít vrstvomým modelem, než dorazí k uživateli. Obr. 48 ukazuje průběh užitečných dat skrze vrstvomý model, jak se postupně přidávají bajty představující hlavičky vrstev [21].



Obr. 48: Režie jednotlivých hlaviček skrze vrstvomý model [21]

První vrstva, kde se přidává hlavička, je transportní vrstva. Zde je použitý buď protokol UDP (User Datagram Protocol) nebo TCP (Transmission Control Protocol). TCP je spojově orientovaný transportní protokol a je využíván pro přenos dat, u kterých je nutné zaručit doručení, a proto se nehodí pro přenos vysokých objemů dat. Pro tyto účely je určen protokol UDP, který nedává žádnou záruku na doručení zpráv, a proto se hodí pro přenos velkých objemů dat (VoIP, RTP stream, video konference, ...). Oba dva protokoly přidávají hlavičky, které zvětšují objem užitečných dat.

Druhá vrstva, kde se přidává hlavička je internetová vrstva (síťová vrstva). Na této vrstvě je využíván protokol IP (Internet protocol). Hlavička internetové vrstvy je mnohem větší kvůli množství informací, které musí nést (směrování, fragmentace, QoS, ...).

Poslední vrstva, kde se přidává hlavička je vrstva síťového rozhraní. Tato vrstva je specifikována na každou síť v závislosti na její implementaci, v tomto případě Ethernet.

Dle Obr. 48 tvoří režii 66 bytů na jeden blok užitečných dat, tedy pokud neproběhla segmentace na transportní vrstvě nebo fragmentace na internetové vrstvě.

Příklad:

- Při přenosu 66 B užitečných dat, s režii se přenesou $64+66= 100$ B. Bude-li přenosová rychlost 1 Mbit/s, režie představuje **50,76 %**.
- Při přenosu 1024 B užitečných dat, s režii se přenesou $1024+66= 1090$ B. Bude-li přenosová rychlost 1 Mbit/s, režie představuje **6,05 %**

Shrnutí výsledků simulací

První simulační část (kapitola 4) práce se zabývala ověřením teoretických předpokladů, kdy při vrůstající vzdálenosti klesá lineárně přenosová rychlost komunikačního PLC kanálu. Ověření správnosti lze vidět při porovnání výsledků na Obr. 9 a Obr. 12. Z obou obrázků je jasná lineárně klesající tendence.

Druhá simulační část (kapitola 5) byla zaměřena na zjištění vlivu odboček a dalších parametrů na přenosovou rychlost.

- Při ověřování vlivu délky odbočky, jak vyplývá z výsledků na Obr. 17 a Obr. 18, bylo zjištěno, že délka odbočky nijak neovlivní hodnotu přenosové rychlosti a hodnota přenosové rychlosti zůstává konstantní při změně délky odbočky.
- Při ověřování vlivu pozice odbočky byl zjištěn stejný výsledek jako v předchozí simulaci, a to, že vliv pozice odbočky neovlivňuje hodnotu přenosové rychlosti. Přestože na Obr. 19 lze vidět různé poklesy, tak v širokém měřítku je vidět, že hodnota rychlosti zůstává konstantní (viz Obr. 20).
- U simulací přenosové funkce při jedné odbočce vznikly závislosti, na kterých bylo jasně patrné, že při změnách délky odbočky (viz Obr. 21 a Obr. 22) se pouze posunuly minima a maxima přenosové funkce v závislosti na frekvenci. Podobných výsledků bylo dosaženo při změnách pozice odbočky, jak lze vidět na Obr. 23 a Obr. 24.
- U topologie se třemi odbočkami byla zjišťována závislost hodnoty přenosové rychlosti na impedančním zakončení odbočky. Na Obr. 26 lze vidět tuto závislost v logaritmickém měřítku a na Obr. 27 naopak v lineárním. Z výsledků bylo zjištěno, že při vrůstající hodnotě impedančního zakončení odbočky mírně vzrůstá hodnota přenosové rychlosti.
- Na konci kapitoly č. 5 je porovnání všech použitých základních topologií (viz Obr. 31). Z grafu je patrné, jak moc se ovlivní hodnota přenosové rychlosti přidáním jedné, dvou a tří odboček.

V poslední třetí simulační části práce (kapitola 6) byla použita část rozsáhlé topologie (viz Obr. 34), na které bylo nalezeno pomocí simulace umístění a počet opakovačů pro docílení optimální přenosové rychlosti.

- Pro hodnotu -90 dBm šumu na pozadí byly nastaveny hranice přenosové rychlosti na 30 a 5 Mbit/s. Tato hodnota šumu představuje prostředí s velmi nízkou hodnotou šumu. Z Obr. 38 je zřejmé, že pro udržení minimální hranice 30 Mbit/s je nutno použít alespoň 4 opakovače. Jejich optimální rozložení lze vidět na Obr. 40, kde první dva opakovače zůstaly na svých místech z původní simulace pro určení minimální hranice. Druhé dva opakovače změnila pozice pro optimální rozložení vysokého skoku na konci trasy. Při simulaci minimální hranice 5 Mbit/s jsou nutné dva opakovače pro docílení této hranice (viz Obr. 42). Pro optimální rozložení je třeba druhý opakovač posunout zpět o jeden uzel na n28 pro rozložení 50 Mbit/s skoku na konci trasy (viz Obr. 44).
- Stejně simulace byly provedeny pro hodnotu -70 dBm šumu na pozadí, které by mělo představovat reálně zašuměné prostředí. Zde bylo pouze provedena simulace pro 5 Mbit/s. Zjištění minimální hranice bylo obtížné a nebylo splněno základní rozestoupení pro udržení 5 Mbit/s. Na trase se projeví dva velké

poklesy přenosové rychlosti, které se předtím při hodnotě -90 dBm neprojevily (viz Obr. 46). Tyto poklesy se projevily v bodě n17 a n27, ve kterých jsou přechody mezi dvěma různými kabely. Přechody byly vždy mezi podzemním a venkovním kabelem a lze vidět, že rozdíl mezi těmito kabely je patrný na Obr. 36 a Obr. 37. Pokles rychlosti je velmi znatelný a pohybuje se kolem 70 Mbit/s. Pro jisté docílení hranice 5Mbit/s je nutné v těchto místech poklesu rychlosti umístit opakovač s vysokou hodnotou vysílacího výkonu, aby prošlo skrze přechod.

V závěrečné části (kapitola 7) byl prostudován vliv hlaviček na celkovou hodnotu přenosové rychlosti. Veškeré hodnoty, které byly nasimulovány v předešlých kapitolách jsou pouze hodnoty na fyzické vrstvě bez jakýchkoliv přidaných hlaviček nebo funkce, které se nacházejí na klasickém TCP/IP spojení. Převážně záleží, jak velké jsou bloky, které jsou posílány. Jestliže jsou bloky o velikosti 66 B, pak hlavičky představují 64 B a při rychlosti 1 Mbit/s je výsledná režie přibližně 50 %, což nám sníží rychlost na 0,5 Mbit/s. Příklad pro hodnoty z této diplomové práce:

- Z naměřených hodnot přenosové rychlosti např. pro 30 Mbit/s.
- Standardní velikost ethernetových rámců se pohybuje kolem 46–1500 B. V případě střední velikosti 500 B se tento rámec skládá z 436 B dat a 64 B dodatečných dat (hlavičky a patička).
- Z následujících hodnot režii tvoří 12,8 %, což představuje pokles rychlosti na cca 26 Mbit/s. Toto však nelze považovat za konečnou hodnotu, protože průchod skrze vrstvý model způsobuje zpoždění a pokles rychlosti při zpracování tohoto bloku dat. Dále jsou zde dodatečné akce, které jsou prováděny na každé vrstvě, jako jsou segmentace, fragmentace, seskládání správného pořadí a provádění kontrolních součtů. Rychlost tak může poklesnout až na 1/3 původní hodnoty, tedy 20 Mbit/s.
- Pokud se na dané trase pro PLC komunikace nachází opakovač, tak vzniká určité zpoždění při zpracování signálů, což může snížit přenosovou rychlost. Čím větší je počet opakovačů na trase, tím více se přenosová rychlost může snížit.

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala PLC komunikací po elektrických rozvodech. Cílem bylo provést různé simulace pro ověření vlivu určitých parametrů na přenosovou rychlost PLC kanálu. Simulace byly prováděny v simulačním prostředí NS-3, které bylo doplněno o framework pro PLC komunikaci.

Cíle této diplomové práce byly splněny a veškeré scénáře byly nasimulovány a výsledky detailně popsány. Podstatným zjištěním této diplomové práce bylo ověření předpokladů, že délka odbočky neovlivňuje hodnotu přenosové rychlosti. Ke stejného závěru se dospělo i u simulace změny pozice odbočky. Při simulaci vlivu impedančního zakončení na přenosovou rychlost byla zjištěna vzrůstající tendence rychlosti v závislosti na hodnotě impedance. U simulací rozsáhlé topologie bylo zjištěno optimální rozložení opakovačů pro docílení požadovaných hodnot rychlosti pro dvě varianty šumu na pozadí.

Touto diplomovou prací bylo ověřeno, že PLC technologie má své rozsáhlé využití pro všechna odvětví průmyslu především v energetice pro chytré měření, kde je nákladné budovat nové komunikační sítě a je možné využít již stávajících elektrických rozvodů. Stejně jako jakákoliv jiná technologie tak i PLC má svá omezení, která snižují efekt přenosu dat a je nutné se těmto omezením přizpůsobit, a tím snížit jejich vliv.

Použitá literatura

- [1] AKINNIKAWA, AYORINDE. *INVESTIGATION OF BROADBAND OVER POWER LINE CHANNEL CAPACITY OF SHIPBOARD POWER SYSTEM CABLES FOR SHIP COMMUNICATIONS NETWORKS*. Texas A&M University, 2008, , 91.
- [2] GALLI, Stefano, Anna SCAGLIONE a Zhifang WANG. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. *Proceedings of the IEEE*. 2011, **99**(6), 998-1027. DOI: 10.1109/jproc.2011.2109670.
- [3] SÝKORA, Tomáš. *Komunikace po silových vedeních PLC technologie: 8. přednáška ZS 2011/2012*. České vysoké učení technické v Praze, 2012.
- [4] SELANDER, L. *Power-Line Communication* [online]. Department of Information Technology at Lund University, , 107 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.enersearch.com/company/knowledgebase/publications/theses/PowerlineCom.pdf>
- [5] FIILKA, Miroslav. *Přenosová média* [online]. VUT v Brně, 2011 [cit. 2016-11-30]. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [6] Modelování silnoproudých vedení II – simulace ukázkové sítě. *Access server* [online]. VUT v Brně, 2010 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=modelovani-silnoproudych-vedeni-ii-%E2%80%93-simulace-ukazkove-site&cislocclanku=2010070002>
- [7] MIŠUREC, Jiří, Petr MRÁKAVA a Daniel ADAMKO. Interference in power lines and data communication over narrow-band PLC. *Elektrorevue*. 2011, 2011(2), 63-67. ISSN 12131539.
- [8] HRASNICA, Halid, Abdelfatteh HAIDINE a R. LEHNERT. *Broadband powerline communications networks: network design*. Chichester: Wiley, c2004. ISBN 0-470-85741-2.
- [9] DUCHE, Dipashree a Vidya GOGATE. *Signal Attenuation in Powerline Communication Channel* [online]. Shah And Anchor Kutchhi Engineering College Mumbai University, 2014 [cit. 2016-11-30]. ISSN 2278-6856.
- [10] PAPALEONIDOPOULOS, I.C., C.G. KARAGIANNOPOULOS, N.J. THEODOROU, C.E.ANAGNOSTOPOULOS a I.E.ANAGNOSTOPOULOS. *MODELLING OF INDOOR LOW VOLTAGE POWER-LINE CABLES IN THE HIGH FREQUENCY RANGE* [online]. National Technical University of Athens [cit. 2016-11-30].
- [11] B. PRAHO, M. TLICH, A. ZEDDAM a F. NOUVEL. *Study of the coexistence of VDSL2 and PLC by analysing the coupling between power line and telecommunications cable in the home network*[online]. Institute of Electronics and Telecommunciations of Rennes, 2011 [cit. 2016-11-30].
- [12] PAPADOPOULOS, Theofilos a Christos G. KALOUDAS. *Application of Narrowband Power-Line Communication in Medium-Voltage Smart Distribution Grids*. 2013. ISSN 0885-8977.

- [13] *NS-3 (Network Simulator)* [online]. 2015 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <https://www.nsnam.org/>
- [14] *NS-3 PLC Framework* [online]. [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: http://www.ece.ubc.ca/~faribaa/ns3_plc_software.htm
- [15] *HomePlug® AV2 Technology* [online]. In: . 2015 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: http://www.homeplug.org/media/filer_public/a1/46/a1464318-f5df-46c5-89dc-7243d8ccfcee/homeplug_av2_whitepaper_150907.pdf
- [16] *G3-PLC Alliance* [online]. 2016 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.g3-plc.com/home/>
- [17] KOLÁŘ, JAN. *SIMULÁTOR PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ SILNOPROUDÉHO VEDENÍ V NS3* [online]. VUT v Brně, 2015 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100546
- [18] HORÁK, Martin. *MODELOVÁNÍ PLC KOMUNIKACE S VYUŽITÍM NETWORK SIMULATOR-3* [online]. 1. Brno, 2016 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/59012>
- [19] KHACH, Eric, Kim Ellegaard Jacobsen, Mikkel Najbjerg Skov, Nikolaj Bové Højholt a René Brandborg Sørensen. *Investigation of QoS in PLC and evaluation of a ns-3 PLC simulator* [online]. 2014 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://kom.aau.dk/group/14gr631/Report.pdf>
- [20] Marc Kuhn, Armin Wittneben. *PLC enhanced wireless access networks: a link level capacity consideration*. University of Saarland, Institute of Digital Communications, 2002 IEEE.
- [21] *Počítačové sítě I, lekce 4: Základy datových komunikací - I. SlideShare* [online]. Praha: MFF UK, 2014 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/jiri.peterka/potaov-st-i-lekce-1>

Seznam zkratek

PLC	-	PowerLine Communication
UNB	-	Ultra Narrow Band
NB	-	Narrowband
AMR-	-	Automatic Meter Reading
TWACS	-	Two-Way Automatic Communications System
CENELEC	-	Comite Europ ´ een de Normalisation ´ Electrotechnique
FCC	-	Federal Communications Commission
ARIB	-	Association of Radio Industries and Businesses
HDR	-	High Data Rate
LDR	-	Low Data Rate
HAN	-	Home Area Network
SNR	-	Signal-to-noise ratio
SINR	-	Signal-To-Interference Noise Ration
UTP	-	Unshielded Twisted Pair
VDSL	-	Very High Speed DSL
GUI	-	Graphical User Interface
CTF	-	Channel Transfer Function
PSD	-	Power Spectral Density
PSK	-	Phase-shift keying
QAM	-	Quadrature amplitude modulation

Seznam příloh

Příloha A. Rozsáhlá topologie

Příloha A

