

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Jonáš Turan



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

**MODELOVÁNÍ PLC KOMUNIKACE S VYUŽITÍM
NETWORK SIMULATOR-3**

MODELING OF POWER LINE COMMUNICATION USING NETWORK SIMULATOR-3

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jonáš Turan

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. Jonáš Turan

ID: 155252

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Modelování PLC komunikace s využitím Network Simulator-3

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s datovou komunikací po silnoproudém vedení (PLC) a frameworkem pro simulaci PLC v prostředí NS3. Analyzujte tento framework a ukázkové kódy pro simulaci PLC. Realizujte vlastní simulační scénáře pro tři reálné topologie lišící se velikostí a způsobem zapojení. Dále proveďte simulační scénáře pro point-to-point zapojení PLC modemů a určete maximální dosah komunikace a vliv vzdálenosti na přenosovou rychlost. Realizujte simulační scénář pro reálnou síť se změnou charakteristik sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] AALAMIFAR, Fariba, Alexander SCHLOGL, Don HARRIS a Lutz LAMPE. 2013. Modelling power line communication using network simulator-3: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 99(6): 2969-2974. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6831526>

[2] HOŠEK, J. Pokročilé komunikační techniky – laboratorní cvičení. Skripta, 2013. VUT v Brně.

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

Diplomová práce se zabývá problematikou analýzy a modelování komunikace po silnoproudém vedení. S využitím PLC frameworku, vytvořeného v simulátoru NS-3, je hlavním cílem zkoumání různých vlivů na přenosové funkce a teoretickou kapacitu PLC kanálu. V úvodu práce jsou shrnuty teoretické poznatky z oblasti přenosu dat po silnoproudém vedení a distribučních sítí. Dále jsou popsány různé typy rušení a možnost výpočtu přenosové kapacity. V praktické části je realizováno několik jednoduchých simulací, které zkoumají vlivy, jako vzdálenost mezi vysílacím a přijímacím modemem, délku, impedanci a počet odboček mezi těmito body, vliv rušení či typu modulace jak na přenosovou funkci, tak kapacitu linky. Součástí praktické části je také realizace simulací pro rozsáhlou topologii založenou na reálném rozložení elektroměrů. Cílem je nalézt umístění opakováčů pro komunikaci různých uzlů.

KLÍČOVÁ SLOVA

PLC, NS-3, přenosová funkce, kapacita linky, simulace

ABSTRACT

This thesis deals with analysis and modelling of power line communications. The main aim is to examine the effects influencing transmission of communication signals on power-line networks and theoretical capacity of the PLC channel using PLC framework created in NS-3. The introduction summarizes the theoretical knowledge in the area of data transmission over power line distribution network. Different types of noise and possibilities of calculation of theoretical transmission capacity are described as well. Several simple simulations are realized in practical part of this paper. These simulations explore the influence of the distance between the transmitter and receiver, length, impedance and number of branches between these nodes, affect of the type of modulation and noise on the transfer function as well as the capacity of the channel. There are also some simulations for large topology based on real position of electrometer. The main focus is to find positions of repeaters to ensure that some nodes of the topology can communicate.

KEYWORDS

PLC, NS-3, transfer function, channel capacity, simulation

TURAN, Jonáš *Modelování PLC komunikace s využitím Network Simulator-3*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 83 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Modelování PLC komunikace s využitím Network Simulator-3“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petrovi Mlýnkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Poděkování patří také mé rodině a přítelkyni, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



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

PODĚKOVÁNÍ

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

Brno

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	14
1 Technologie PLC	15
1.1 Úzkopásmová technologie PLC	16
1.2 Širokopásmová technologie PLC	17
2 Charakteristika PLC přenosového kanálu	18
2.1 Elektrická rozvodná síť	18
2.2 Model přenosového kanálu	19
2.2.1 Primární parametry	20
2.2.2 Sekundární parametry	21
2.2.3 Další přístupy k výpočtům primárních parametrů	21
2.2.4 Výpočet primárních parametrů pro nadzemní vedení	22
3 Rušení	24
3.1 Rušení v NS-3	25
4 Kapacita linky	26
4.1 Přenosový výkon	27
4.2 Algoritmus water filling	28
5 Modulace používané v PLC	30
5.1 Modulace s jednou nosnou	31
5.2 Modulace s rozprostřeným spektrem	31
5.3 Ortogonální kmitočtový multiplex (OFDM)	32
5.4 Porovnání jednotlivých modulací z hlediska chybovosti BER k od- stupu signálu od šumu	33
6 Simulace jednoduchých topologií	36
6.1 Simulátor NS-3	36
6.2 Point-to-point zapojení PLC modemů	37
6.2.1 Parametry kabelu CYKY 3x2,5 a NAYY150 SE	37
6.2.2 Kabel CYKY 3x2,5	38
6.2.3 Kabel NAYY150 SE	39
6.2.4 Vliv typu modulace na přenosovou kapacitu	40
6.2.5 Vliv barevného šumu na přenosovou kapacitu	41
6.2.6 Vliv bílého šumu na přenosovou kapacitu	42
6.3 Topologie s jednou odbočkou	43

6.3.1	Vliv odbočky při měnící se vzdálenosti mezi Tx a Rx	43
6.3.2	Vliv délky odbočky	45
6.3.3	Vliv změny impedance uzlu	46
6.3.4	Vliv změny pozice odbočky	47
6.3.5	Vliv jednotlivých parametrů na kapacitu linky	48
6.4	Topologie s více odbočkami	49
7	Simulace náhodně vygenerovaných topologií	52
7.1	Topologie 1 a 2	52
7.2	Topologie 3	54
7.3	Shrnutí	56
8	Simulace rozsáhlé topologie	57
8.1	Použitá kabeláž	57
8.2	Srovnání přenosové kapacity jednotlivých kabelů	58
8.3	Přenosová kapacita mezi body n1 a n32	60
8.3.1	Záměna kabelu na úseku n17-n20	62
8.3.2	Změna limitní přenosové kapacity úseku na 5 Mbit/s	64
8.3.3	Změna hodnoty bílého šumu na pozadí z 1e-9 mW/Hz na 1e-12 mW/Hz	64
8.3.4	Shrnutí	67
8.4	Přenosová kapacita mezi uzly n1 a n310od	70
8.4.1	Nalezení optimálního umístění a počtu opakovačů	71
8.4.2	Optimální rozmístění opakovačů v případě úrovně šumu na pozadí 1e-12 mW/Hz	72
8.5	Shrnutí	73
9	Závěr	74
	Literatura	76
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	80
	Seznam příloh	81
A	Obsah přiloženého CD	82
B	Rozsáhlá topologie	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	PLC přístupová síť[16].	16
2.1	Rozdělení elektrické rozvodné sítě podle přenášeného napětí [16].	18
2.2	Elementární úsek vedení [22].	19
3.1	Zobecněné schéma PLC přenosové cesty a možných zdrojů rušení [30].	24
3.2	Průběhy všech dostupných šumů na pozadí [18].	25
4.1	Režijní přenášená data [25].	28
4.2	Kapacita linky při zohlednění režijních dat a velikosti přenášených dat.	28
4.3	Water filling algoritmus [42].	29
5.1	Modulační metody pro PLC [5].	30
5.2	Frekvenční spektrum jednotlivých subnosných (nahore) OFDM systému a jejich suma (dole) [41].	33
5.3	Závislost chybovosti BER na normovaném odstupu signálu od šumu [40].	34
6.1	P2P topologie.	37
6.2	Závislost přenosové funkce a kapacity linky na vzdálenosti mezi Tx a Rx, kabelu CYKY 3x2,5.	38
6.3	Závislost přenosové funkce a kapacity linky na vzdálenosti mezi Tx a Rx, kabelu NAYY150 SE.	39
6.4	Srovnání přenosových kapacity kabelů v závislosti na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem.	40
6.5	Závislost přenosové kapacity na úrovni bílého šumu.	42
6.6	Topologie s jednou odbočkou.	43
6.7	Vliv odbočky na přenosovou funkci pro různé vzdálenosti mezi Tx a Rx: (a) 1,2 km, (b) 600 m, (c) 300 m, (d) 150 m [2].	44
6.8	Vliv odbočky na přenosovou funkci pro různé vzdálenosti mezi Tx a Rx.	45
6.9	Vliv délky odbočky na přenosovou funkci.	46
6.10	Vliv změny impedance uzlu.	47
6.11	Vliv změny pozice odbočky na přenosovou funkci.	48
6.12	Vliv předešlých scénářů na kapacitu linky.	49
6.13	Topologie s více odbočkami.	50
6.14	Vliv počtu odboček na kapacitu linky.	51
6.15	Vliv počtu odboček na přenosovou funkci mezi Tx a Rx.	51
7.1	Simulované náhodné topologie.	53
7.2	Přenosová funkce mezi Tx a Rx topologie 1 (nahore) a topologie 2 (dole).	54
7.3	Náhodná topologie 3.	55
7.4	Vliv zátěže Z_2 na přenosovou funkci.	55
8.1	Přenosová funkce jednotlivých kabelů na úseku mezi uzly n1 a n7. . .	59

8.2	Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1 - n32.	61
8.3	Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (záměna kabelu na úseku n17-n20)	63
8.4	Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (limit 5 Mbit/s).	65
8.5	Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (limit 1 Mbit/s, šum 1e-12 mW/Hz).	66
8.6	Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (limit 5 Mbit/s, šum 1e-12 mW/Hz).	67
8.7	Přenosové funkce na trase mezi uzly n1 a n310od.	70

SEZNAM TABULEK

1.1	Rozdělení frekvenčních pásem CENELEC [34].	17
5.1	Hodnoty normovaného odstupe signálu od šumu pro BER 10^{-7}	34
5.2	Hodnoty k_b pro požadované četnosti symbolových chyb [32].	35
6.1	Technická specifikace kabelu CYKY 3x2,5 [39].	37
6.2	Technická specifikace kabelu NAYY150 SE [28].	38
6.3	Přenosová kapacita pro různé typy modulací kabelu NAYY150 SE.	40
6.4	Přenosová kapacita pro různé typy modulací kabelu NAYY150 SE při dodržení symbolové chybovosti 10^{-6}	41
6.5	Přenosová kapacita pro různé úrovně barevného šumu na pozadí.	42
6.6	Přenosová kapacita pro různé úrovně bílého šumu na pozadí.	42
7.1	Hodnoty impedancí topologie 1.	53
7.2	Hodnoty impedancí topologie 2.	53
7.3	Hodnoty impedancí topologie 3.	53
7.4	Přenosové kapacity ovlivněné zapojením odbočky Z2.	56
8.1	Technická specifikace kabelu AYKY [36].	57
8.2	Technická specifikace kabelu AlFe [37].	58
8.3	Technická specifikace kabelu AES [38].	58
8.4	Přenosové kapacity jednotlivých kabelů.	59
8.5	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32.	61
8.6	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (zá- měna kabelu na úseku n18-n20).	62
8.7	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (zá- měna kabelu na úseku n18-n20) po optimalizaci.	63
8.8	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 5 Mbit/s).	64
8.9	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 1 Mbit/s, šum $1e-12$ mW/Hz).	65
8.10	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 1 Mbit/s, šum $1e-12$ mW/Hz) po optimalizaci.	66
8.11	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 5 Mbit/s, šum $1e-12$ mW/Hz).	67
8.12	Srovnání přenosových kapacit jednotlivých úseků při různé PSD šumu, pro limit 1Mbit/s.	68
8.13	Srovnání přenosových kapacit jednotlivých úseků při různé PSD šumu, pro limit 5 Mbit/Hz.	68
8.14	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n310od.	71

8.15	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n310od po optimalizaci rozmístění opakovačů (šum $1e-9$ mW/Hz).	72
8.16	Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n310od po optimalizaci rozmístění opakovačů (šum $1e-12$ mW/Hz).	72

ÚVOD

Nejefektivnější způsob, jak v dnešní době vybudovat přístupovou telekomunikační síť a implementovat tak nejmodernější telekomunikační technologie, je vybudování nové, vlastní infrastruktury. Avšak realizace, instalace a údržba takové sítě tvoří mnohdy i více než 50 % celkové investice, což je dostatečnou motivací, nejen pro poskytovatele služeb, hledat různé alternativy, které by využily některé jiné, stávající infrastruktury [16].

Jednou z těchto možností, která se v posledních letech používá pro sdělovací systémy, je silnoproudá elektrická rozvodná síť. K tomu byla vyvinuta technologie, která se označuje jako PowerLine Communication (PLC). Počátky této technologie spadají již do začátku 20. století, kdy se v energetice začaly zavádět tzv. systémy hromadného dálkového ovládání (HDO). Ty sloužily pro interní komunikaci a provádění různých řídicích úkonů z jediného centrálního místa (např. dálkový odečet elektroměrů) [28]. Dnes jsou požadavky kladeny zejména na vysokorychlostní datové přenosy, jejichž realizaci v širokopásmových systémech umožnily pokročilé komunikační technologie (technika rozprostřeného spektra, OFDM, CDMA), které byly vyvinuty zejména pro přenos telekomunikačních signálů v rádiových prostředích s vysokou úrovní rušení [27].

S vývojem této technologie a s jejím reálným nasazením se stalo nutností vyvinout i simulační prostředí, které by sloužilo nejen pro testování samotného systému před nasazením, ale také pro zkoumání a hledání různých přístupových technik. Jde zejména o modelování přenosového vedení, které pro datový přenos není primárně určeno. V současné době není k dispozici mnoho volně dostupných nástrojů pro simulaci PLC. Tato práce se zabývá frameworkem pro simulační prostředí NS-3. Framework byl autory vytvořen v prostředí NS-3 zejména kvůli jeho popularitě a již mnoha implementovaných telekomunikačních modulů a funkcionalit [1]. Cílem je analyzovat dostupný simulační software a s využitím nabytých znalostí realizovat vlastní simulace zaměřené zejména na zkoumání různých vlivů na přenosovou funkci, a hlavně na přenosovou kapacitu linku.

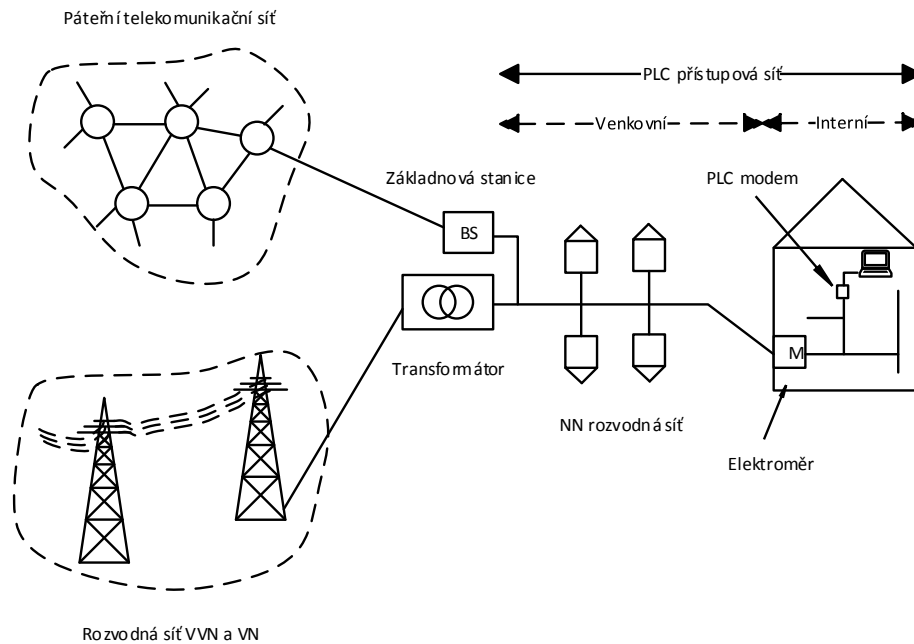
Práce je členěna do několika kapitol. První kapitola se zabývá teoretickým úvodem do dané problematiky. Druhá kapitola se zabývá charakteristikou přenosového média. Další tři kapitoly popisují různé typy rušení, možnost výpočtu přenosové kapacity linky a používané modulace v PLC technologii. Další dvě kapitoly se zabývají navrženými scénáři a zkoumáním určitých vlivů na přenosovou funkci a kapacitu linky. Poslední kapitola je zaměřena na simulaci rozsáhlé topologie, přičemž scénáře jsou zaměřeny na nalezení vhodných míst opakovačů pro zajištění komunikace mezi určitými uzly.

1 TECHNOLOGIE PLC

Budování nových telekomunikačních přístupových sítí je v dnešní době příliš komplikované a drahé, a proto se nabízí možnost využití již realizovaných, celoplošných sítí budovaných pro jiné účely. Technologie PLC se jeví jako slibnou alternativou pro řešení problému tzv. poslední míle, tj. připojení koncových uživatelů (bytů, domů, kanceláří) do sítě WAN, a to pomocí silnoproudé elektrické rozvodné sítě. Pro přenos se využívají mnohonásobně vyšší frekvence, než je jmenovitá frekvence napěťové soustavy (50 Hz), a naopak amplituda přenášeného signálu musí být výrazně nižší než elektrické sítě (230 V). Signál je nejdříve vhodně namodulován a následně přes kapacitní nebo induktivní vazební člen injektován do rozvodné sítě. PLC síť se může chovat jako zdroj elektromagnetického rušení pro své okolí a z tohoto důvodu musí pracovat s omezenou úrovní signálu, což má za následek redukci přenosových rychlostí a komunikačních vzdáleností. Na druhou stranu silnoproudé rozvodné sítě nejsou určeny pro datový přenos a PLC přenosový kanál je charakterizován různými negativními vlivy, zejména frekvenčně závislým útlumem, měnící se impedancí, či rušením, které bývá způsobeno připojenými spotřebiči.

Pro zprostředkování PLC datových komunikací je zapotřebí tzv. *PLC modem*. Ten zajišťuje konverzi signálu z komunikujících zařízení na signál vhodný pro přenos po rozvodné síti a naopak. Modem může být umístěn buď v elektroměru nebo kterékoli zásuvce v domovní instalaci. V prvním případě jsou uživatelé v domě k PLC modemu připojeni s použitím jiné komunikační technologie, v druhém je přenos zprostředkován domovní elektroinstalací. Dalším důležitým prvkem je *PLC základnová stanice*. Ta slouží pro připojení přístupové sítě do WAN, a bývá umístěna buď v transformátoru nebo na hranici určitých segmentů sítě [16]. Posledním prvkem PLC sítě je tzv. opakovač. Ten slouží zejména pro překonání větších vzdáleností a jeho funkce je přijatý signál zesílit a v nezměněné podobě přeposlat dál. Struktura PLC přístupové sítě pak může vypadat např. jako na obr. 1.1.

V základu se PLC, dle využívané šířky pásma, dělí na dva typy: úzkopásmové a širokopásmové. Úzkopásmová technologie pracuje podle evropského standardu CE-NELEC EN 50065 ve frekvenčním pásmu od 3 kHz do 148,5 kHz, dle Amerických a Japonských pak až do 500 kHz. Přenosové rychlosti jsou v řádu jednotek až stovek kbit/s. Širokopásmová technologie využívá mnohem vyšších frekvencí, standardně v rozsahu od 1,6 MHz do 30 MHz a dosahuje i mnohem vyšších přenosových rychlostí v řádu jednotek, desítek, ale i stovek Mbit/s [34], [16].



Obr. 1.1: PLC přístupová síť[16].

1.1 Úzkopásmová technologie PLC

V Evropě definuje úzkopásmový přenos norma CENELEC EN 50065 [34]. Tato norma dělí pásmo od 3 kHz do 148,5 kHz do několika kategorií podle tab. 1.1. Technologie disponuje přenosovými rychlostmi v řádu desítek až stovek kbit/s do vzdálenosti 1 km. Pro překonání větších vzdáleností je zapotřebí použít tzv. opakovač [16]. Pro Ameriku definuje přenosová omezení norma UC FCC (Federal Communications Commission) v pásmu od 10 kHz do 490 kHz, pro Japonsko pak norma ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) v pásmu od 10 kHz do 450 kHz [13]. Jelikož uvedené přenosové rychlosti jsou pro přenos velkého objemu dat nedostačující, technologie se využívá zejména pro automatizaci a sběr dat.

Podle oblasti použití se využívají různá pásma CENELEC. Pásmo A slouží pro tzv. energetický dohled a distributoři elektrické energie ho využívají pro interní komunikaci, různé vzdálené kontrolní funkce, dálkový odečet elektroměrů atd. Pásma B a C se využívají pro automatizační systémy v budovách a domácnostech, čímž se dají značně redukovat nutné náklady pro vybudování nové interní sítě.

Tab. 1.1: Rozdělení frekvenčních pásem CENELEC [34].

Pásmo	Frekvenční rozsah [kHz]	Max. amplituda	Použití pro
	3 až 9	-	Dodavatele
A	9 až 95	10	Dodavatele
B	95 až 125	1,2	Odběratele
C	125 až 140	1,2	Odběratele
D	140 až 148,5	1,2	Odběratele

1.2 Širokopásmová technologie PLC

Širokopásmová technologie PLC disponuje oproti úzkopásmové značně většími přenosovými rychlostmi a jeví se tak odpovídajícím konkurentem moderních telekomunikačních sítí. Je schopna přenosu několika hlasových spojení, vysokorychlostního přenosu dat a dalších sofistikovanějších telekomunikačních služeb. Širokopásmová PLC tak poskytuje reálné řešení problému tzv. „poslední míle“ bez nutnosti pokládání nových kabelů. Dosahované rychlosti se pohybují v jednotkách až stovkách Mbit/s. Standardizací se celosvětově zabývá několik na sobě nezávislých organizací a proto se udávané přenosové rychlosti mohou lišit.

I tato technologie však má svá omezení. PLC sítě se chovají jako anténa vysílající do svého okolí elektromagnetické rušení, což může ovlivňovat ostatní zařízení pracující v podobném frekvenčním pásmu, a proto musí pracovat s omezeným výkonem signálu, což má za následek degradaci přenosové rychlosti a maximální vzdálenosti komunikace [16]. Protože elektrický proud a datový signál vibrují na jiných frekvencích, tak se navzájem neruší. Toto je však možné pouze pro vysokonapěťové a nízkonapěťové vedení. Velmi vysokonapěťové vedení disponuje vysokofrekvenčním impulzním rušením, které tvoří špičky s vysokou amplitudou a ruší tak datový přenos.

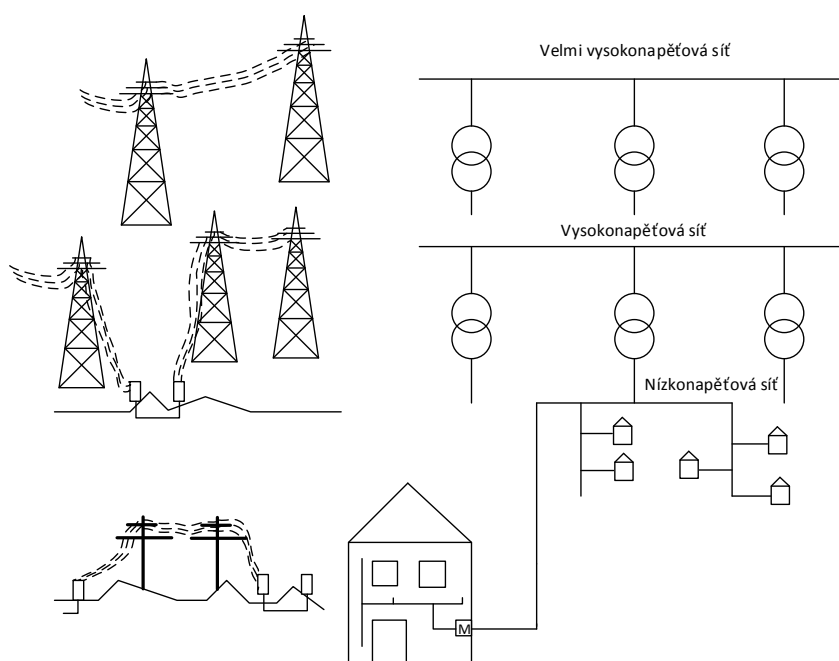
Vysokonapěťové vedení se většinou používá jako spojení point-to-point dvou míst vzdálených několik stovek metrů. Typicky spojení dvou LAN sítí mezi budovami či připojení antén, nebo základnových stanic do páteřní sítě. Nízkonapěťová soustava se pak používá pro realizaci „poslední míle“. V neposlední řadě se tato technologie používá ve vnitřních rozvodech pro propojení počítačů a dalších zařízení s ethernetovým portem. Představitelem je např. HomePlug AV s uváděnou přenosovou rychlostí až 200 Mbit/s [35].

2 CHARAKTERISTIKA PLC PŘENOSOVÉHO KANÁLU

V PLC se využívá přenosové médium, které pro datový přenos není primárně určeno, je zde tak třeba použít i jiný teoretický přístup než u klasických sdělovacích vedení. K pochopení funkčnosti a proveditelnosti PLC je tedy důležité nejdříve studovat a pochopit strukturu a vlastnosti elektrických rozvodných sítí, které v mnoha aspektech liší od klasických sdělovacích sítí.

2.1 Elektrická rozvodná síť

Elektrickou rozvodnou síť lze rozdělit do tří úrovní, podle velikosti přenášeného napětí. Strukturu elektrické rozvodné sítě ukazuje obr.2.1.



Obr. 2.1: Rozdělení elektrické rozvodné sítě podle přenášeného napětí [16].

Velmi vysoké napětí (VVN, 110–380 kV)

Používá se pro přenos elektrické energie na velké vzdálenosti (až stovky kilometrů) a slouží k zásobování velkých oblastí nebo k připojení velkých zákazníků. VVN tvoří páteřní síť dodavatelů elektrické energie a většinou jsou realizovány nadzemním vedením. Hlavními ztrátami ve VVN jsou tepelné ztráty způsobené odporem

materiálu. Z hlediska PLC jsou u VVN problémy s vysokofrekvenčním impulzním rušením, které má díky vysokým napětím velkou amplitudu. Díky tomuto rušení a vysokým hodnotám útlumu je VVN pro datový přenos nevhodné. V současné době však narůstá podíl vzdušných trojfázových vedení, u kterých je do ochranného metalického lana vestavěn speciální optický kabel, který umožňuje přenášet vysoké datové toky, obvyklé podobné těm v klasických optických sítích [27], [14].

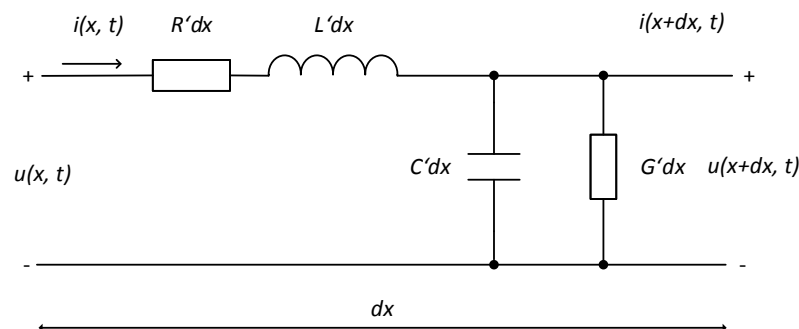
Vysoké napětí (VN, 10–30 kV)

Slouží k zásobování elektrickou energií měst a velkých industriálních a komerčních zákazníků. Přenosové vzdálenosti jsou značně menší než u VVN. Můžou být realizovány jak nadzemním, tak podzemním vedením, kdy podzemní kabely jsou využívány ve více zalidněných oblastech. Co se datového přenosu týče, můžou sloužit jako páteřní síť pro spojení jednotlivých přístupových PLC sítí.

Nízké napětí (NN, 230/400 V, USA 110 V)

Slouží k připojení koncových zákazníků. Délka je většinou několik stovek metrů. Ve městech jsou realizovány podzemním vedením a ve venkovských oblastech převážně nadzemním. Z hlediska využití pro PLC slouží NN k připojení koncových uživatelů (domů, bytů, kanceláří) k telekomunikační síti či k vytvoření interní komunikační sítě.

2.2 Model přenosového kanálu



Obr. 2.2: Elementární úsek vedení [22].

Silnoproudá vedení se dají obecně popsat pomocí elementárních úseků označeného dx (obr. 2.2). Tento elementární úsek je složen z pasivních prvků, přičemž

je uvažován směr proudu zleva doprava. Pro charakteristiku tohoto úseku se pak používají čtyři veličiny označované jako primární parametry. Tyto veličiny slouží k základnímu popisu elektrických vlastností vedení. Délka úseku je x , z čehož vyplývá, že jednotlivé parametry jsou vztaženy na jednotku délky.

Jednotlivé primární parametry jsou následující:

- odpor – R [Ω/m],
- indukčnost – L [H/m],
- kapacita – C [F/m],
- svod – G [S/m].

Z primárních parametrů jsou odvozeny sekundární parametry:

- charakteristická impedance – Z_C (Ω),
- měrný činitel přenosu – γ (-).

2.2.1 Primární parametry

Z následujících rovnic vyplývá, že parametry závisí nejen na fyzikálních rozměrech vedení, ale taktéž na fyzikálních vlastnostech použitých vodičů a izolací [24]:

Odpor

$$R' = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 f}{\pi \sigma a^2}} \left(\frac{\frac{d}{2a}}{\sqrt{\left(\frac{d}{2a}\right)^2 - 1}} \right), \quad (2.1)$$

kde

- μ_r – relativní magnetická permeabilita,
- μ_0 – permeabilita vzduchu,
- σ – konduktivita,
- a – poloměr vodiče,
- d – vzdálenost mezi středy vodičů.

Indukce

$$L' = \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right). \quad (2.2)$$

Kapacita

$$C' = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right)}, \quad (2.3)$$

kde

- ϵ_r – relativní permitivita,
- ϵ_0 – permitivita vakua.

Svod

$$G' = 2\pi fC \tan \delta. \quad (2.4)$$

2.2.2 Sekundární parametry

Mezi sekundární parametry, které jsou odvozeny od primárních se řadí charakteristická impedance Z_C a měrný činitel přenosu γ .

Charakteristická impedance

Charakteristickou impedanci lze vyjádřit vztahem:

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (2.5)$$

Měrný činitel přenosu

Měrný činitel přenosu lze vyjádřit rovnicí:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta, \quad (2.6)$$

kde

- α – měrný útlum,
- β – měrný fázový posuv.

2.2.3 Další přístupy k výpočtům primárních parametrů

Pro výpočet primárních parametrů lze také použít zjednodušenou metodu výpočtů, které vychází z předešlých rovnic [20].

Odpor

$$R' = \sqrt{\frac{\rho\mu_0\pi}{r^2}}, \quad (2.7)$$

kde

- ρ [$\Omega \cdot mm^2 \cdot km^{-1}$] je rezistivita materiálu vodiče.

Indukce

$$L' = \mu_0 \frac{\vartheta}{2r}, \quad (2.8)$$

kde

- ϑ je vzdálenost mezi kraji vodiči,
- r je poloměr vodiče.

Kapacita

$$C' = 2\epsilon_r\epsilon_0\frac{r}{l}. \quad (2.9)$$

Svod

$$G' = 2\pi fC \tan \delta. \quad (2.10)$$

Tyto výpočty jsou původně implementovány pro výpočet primárních parametrů v PLC frameworku NS-3.

2.2.4 Výpočet primárních parametrů pro nadzemní vedení

V rámci diplomové práce Martina Horáka byly do používaného simulátoru NS-3 implementovány následující výpočty pro primární parametry nadzemních vedení [15].

Odpor

$$R' = R_{0k} \left(r \sqrt{\frac{f\mu_r}{\rho}} + 0,2 \right), \quad (2.11)$$

kde

- R_{0k} [Ω/km] je jmenovitý odpor lana při 20 °C,
- r [mm] je poloměr vodiče

Indukce

U těchto vedení dochází k tzv. skin efektu. Což je situace, kdy se střídavý elektrický proud soustřeďuje v blízkosti povrchu vodiče. To má za následek větší indukčnost.

$$L' = 0,4 \left(\ln \frac{d}{r} + 0,25 \right), \quad (2.12)$$

kde

- d [mm] je osová vzdálenost vodičů,

Kapacita

$$C' = \frac{29\epsilon_r}{\ln \frac{d}{r}}. \quad (2.13)$$

Svod

$$G' = G_{0k} + vf, \quad (2.14)$$

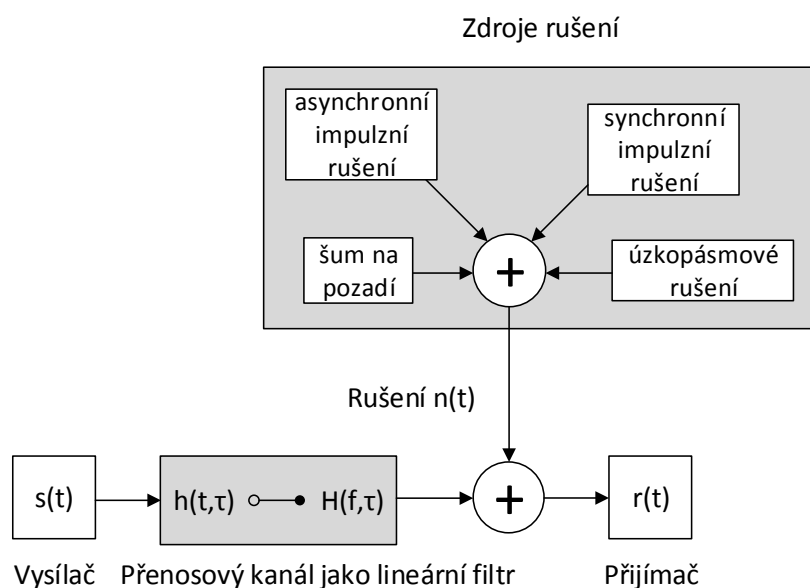
kde

- G_{0k} [$\mu\text{S}/\text{km}$] je svod při průchodu stejnosměrného proudu vedením o délce 1 km,
- v je činitel svodu,
- f [kHz] je frekvence použitého signálu.

G_{0k} může být za sucha zhruba 0,1 S/km a za deště zhruba 0,5 S/km. Činitel svodu se za sucha pohybuje přibližně 0,1 S/km, za deště 0,25 S/km a při námraze 0,75 S/km.

3 RUŠENÍ

Jelikož elektrická rozvodná síť nebyla primárně určena pro datový přenos, nehledělo se na vlastnosti tohoto média ve vysokofrekvenční oblasti. Navíc jsou do rozvodné sítě připojeny různé spotřebiče s různými vlastnostmi. Na PLC může být nahlíženo jak na objekt, na který působí rušení okolními zařízeními, tak na objekt, který je zdrojem rušení. Např. podle [30] či [16] se dá rušení klasifikovat jako superpozice několika různých typů rušení, jehož grafické zobrazení je zachyceno na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Zobecněné schéma PLC přenosové cesty a možných zdrojů rušení [30].

- **Šum na pozadí** – zde se řadí tzv. bílý šum, což je šum s konstantní úrovní a barevný šum, jehož úroveň je proměnná. Barevný šum vzniká složením velkého počtu zdrojů rušení. Jeho spektrální výkonová hustota (PSD) s rostoucím kmitočtem klesá a jeho hodnoty jsou vysoké zhruba do 20 kHz.
- **Úzkopásmové rušení** – průběh má tvar úzkých špiček s vysokou spektrální hustotou. Je způsoben zejména spínanými procesy, zářivkami, CRT monitory atd.
- **Impulzní rušení** – je charakterizováno krátkými napěťovými špičkami a vyskytuje se poměrně často. Je způsobeno např. spínanými zdroji či kolektorovými motory. Toto rušení se dále dělí na synchronní (s dobou trvání od μs po ms) a asynchronní (s dobou trvání v řádu μs).

3.1 Rušení v NS-3

V rámci PLC frameworku pro NS-3 autoři implementovali dva typy rušení. Jedná se šum na pozadí a asynchronní impulzní rušení. V rámci šumu na pozadí lze nastavit bílý šum, který má konstantní hodnotu úrovně PSD, která se nemění v čase ani frekvenci a barevný šum založený na měření, který je definován rovnicí:

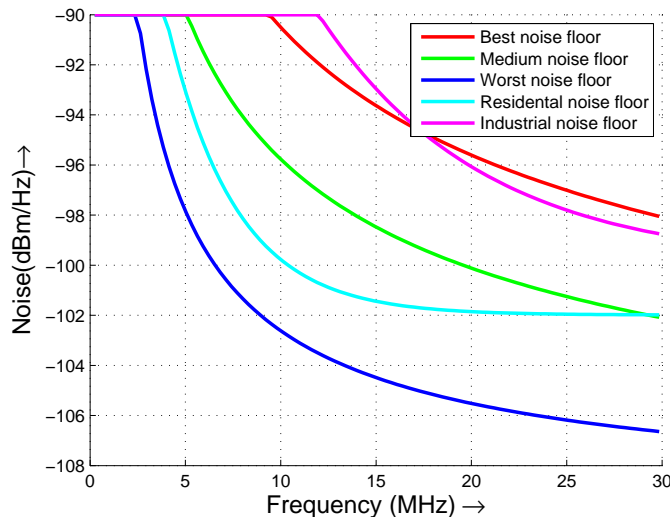
$$S_n(f) = a + b|f|^c \quad [\text{dBm/Hz}], \quad (3.1)$$

kde a , b a c jsou parametry založené na měření v literatuře [11] a f je frekvence v MHz. V základu bylo možné nastavit dva případy barevného šumu a to nejhorší s hodnotami (a, b, c) $(-140; 38,75; -0,720)$ a nejlepší s hodnotami $(-145; 53,23; -0,337)$. V rámci diplomové práce Jana Koláře [18] došlo k rozšíření simulátoru o další tři typy rušení. Jedná se o barevný šum střední úrovně s hodnotami (a, b, c) $(-142, 45.75, -0.45)$ a další dva typy, které jsou založeny na definici šumu v literatuře [16] a vychází z rovnic:

$$N_{BN}(f) = -35 + 35 \cdot e^{-\frac{f[\text{MHz}]}{3,6}} \quad (3.2)$$

$$N_{BN}(f) = -33 + 40 \cdot e^{-\frac{f[\text{MHz}]}{8,6}} \quad (3.3)$$

První rovnice vyjadřuje šum pro obytnou zónu (residential noise floor) a druhá pro průmyslovou zónu (industrial noise floor). Průběhy všech použitých rušení jsou vykresleny na obr.3.2.



Obr. 3.2: Průběhy všech dostupných šumů na pozadí [18].

4 KAPACITA LINKY

Veškeré zkoumané zdroje zabývající se přenosovou kapacitou [2], [10], [19], [31], [33] a další, využívají ke zkoumání přenosové kapacity linky tzv. Shannon-Hartleyův teorém viz 4.1, který popisuje maximální přenosovou rychlost s jakou může být přenesena informace přes komunikační kanál o specifické šířce pásma. Taktéž využívaný PLC framework v NS-3 umožňuje vypočítat kapacitu kanálu podle tohoto teorému pro SINR (označení SNR v simulátoru, tedy odstup signálu od šumu) v rozsahu $[-10 : 1 : 40]$ Veškeré zkoumané zdroje, zabývající se přenosovou kapacitou dB. Pro AWGN (Additive White Gaussian Noise) kanál, tj. kanál s přidaným bílým šumem, s omezenou šířkou pásma je přenosová kapacita dána vztahem:

$$C = B \cdot \log_2 \cdot \left(1 + \frac{S_R}{N} \right) \quad [bit/s], \quad (4.1)$$

kde C je přenosová kapacita, B je šířka pásma kanálu a S_R/N je odstup signálu od šumu na straně přijímače [19]. Při znalosti spektrální hustoty výkonu (PSD) přijatého signálu Φ_{RR} , vyslaného signálu Φ_{TT} , šumu Φ_{NN} a přenosové funkce $H(f)$ lze přenosová kapacita kanálu vyjádřit dle [19]:

$$C = \int_{finB} \log_2 \cdot \left(1 + \frac{\Phi_{RR}(f)}{\Phi_{NN}(f)} \right)$$

$$C = \int_{finB} \log_2 \cdot \left(1 + \frac{\Phi_{TT}(f) \cdot |H(f)|^2}{\Phi_{NN}(f)} \right) \quad [bit/s]. \quad (4.2)$$

Frekvenční pásmo, ve kterém PLC pracuje, je rozděleno na N subpásem neboli subkanálů. Šířka subpásma Δf je dána podílem šířky frekvenčního pásma B a počtem vzorků přenosové funkce N . Vztah 4.2 tedy udává přenosovou kapacitu jednoho subpásma. Celková kapacita lze vypočítat součtem dílčích kapacit jednotlivých subpásem a vynásobením šířkou subpásma [19]:

$$C \approx \Delta f \cdot \sum_{\nu=1}^N \log_2 \cdot \left(1 + \frac{\Phi_{TT}(\nu f) \cdot |H(\nu f)|^2}{\Phi_{NN}(\nu f)} \right) \quad [bit/s]. \quad (4.3)$$

Autoři frameworku pro výpočet přenosové kapacity implementovali vztah 4.2. To umožňuje funkce `getCapacity()`, kdy výstupem je přenosová kapacita jednotlivých subpásem v jednotkách bit/s. Vstupními parametry funkce jsou SINR, typ použité modulace a počet stavů modulace.

Počet subpásem se ve frameworku zadává při definici spektrálního modelu:

```
PLC_SpectrumModelHelper smHelper ;
Ptr < const SpectrumModel > sm , sm1;
sm = smHelper . GetSpectrumModel (0, 500e3 , N) ;
```

Použití funkce `getCapacity()` v simulátoru vypadá následovně:

```
Ptr<SpectrumValue> capacity= Create<SpectrumValue> (sm);
(*capacity) = GetCapacity(*sinr, PSK, 64);
NS_LOG_UNCOND("Capacity:\n" << *capacity << "\n");
```

Jak bylo řečeno, výstupem funkce je kapacita pro jednotlivá pásma v jednotce bit/s. Pro zjednodušení zpracování dat a výpočtů byl upraven výstup funkce v souboru *plc-dcmc-capacity.cc* tak, aby funkce vracela kapacitu v jednotce Mbit/s pro používané pásmo 1,6 – 30 MHz, při rozdělení na 1000 subpásem. Upravená návratová funkce pak vypadá následovně:

```
return (capacityPerHertz*28400)/1048576;
```

Hodnota 28400 reprezentuje šířku subpásma a 1048576 je hodnota 1 Mbit v bitech. Hodnota 28400 by tak musela být měněna při každé změně přenosového pásma.

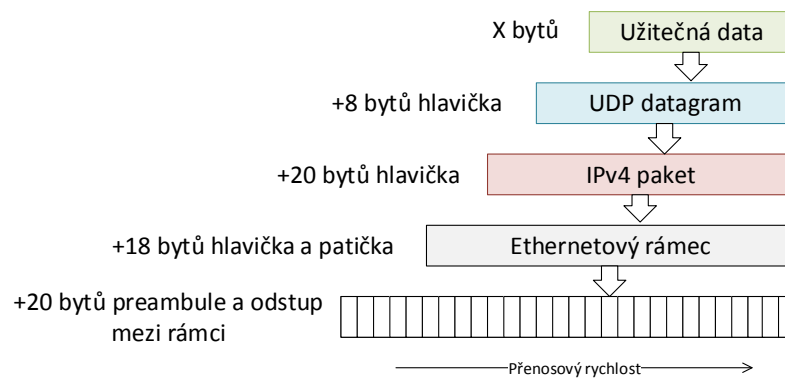
4.1 Přenosový výkon

Těž efektivní přenosová rychlost, skutečně dosahovaná rychlost, či propustnost. Na rozdíl od přenosové rychlosti, tedy výše popsané kapacity linky, která je nominální a vypovídá o tom, jak dlouho trvá přenos jednoho bitu, přenosový výkon rozlišuje, zda se jedná o užitečný nebo režijní bit. Skutečná hodnota přenosové rychlosti pak může být značně nižší [25]. Režijními daty se zde myslí různé hlavičky a patičky bloků (segmentů, rámců, buněk...). Příklad režijních dat, které jsou přenášeny společně s užitečnými daty je uveden na obr. 4.1.

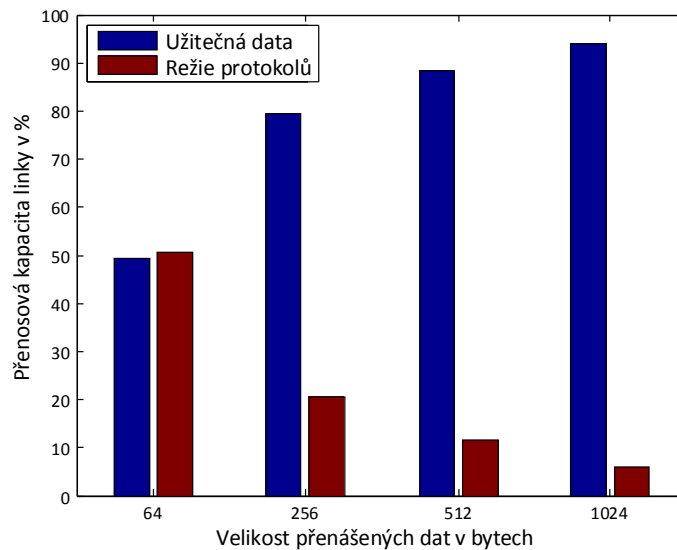
Celkový objem režijních dat u ethernetového rámce, při použití IPv4 a protokolu UDP, je 66 bajtů na jeden užitečný blok dat. To znamená, že:

- Pro užitečná data velikosti 64 bajtů dochází ve skutečnosti k přenosu 64 + 66 bajtů a tedy přenosový výkon bude 49,24 %, zbylých 50,76 % kapacity linky slouží pro režii.
- Pro užitečná data o velikosti 1024 bajtů je fakticky přenášeno 1024 + 66 bajtů a tedy přenosový výkon bude 93,95 %.

V praxi dochází ještě ke komplexnější režii jako např. na agregaci, zajištění spolehlivosti přenosu, či na umělá omezení (FUP – Fair Use Policy) [25]. Na obr.4.2 je graficky znázorněn výše uvedený příklad pro různou velikost přenášovaných dat.



Obr. 4.1: Režijní přenášená data [25].

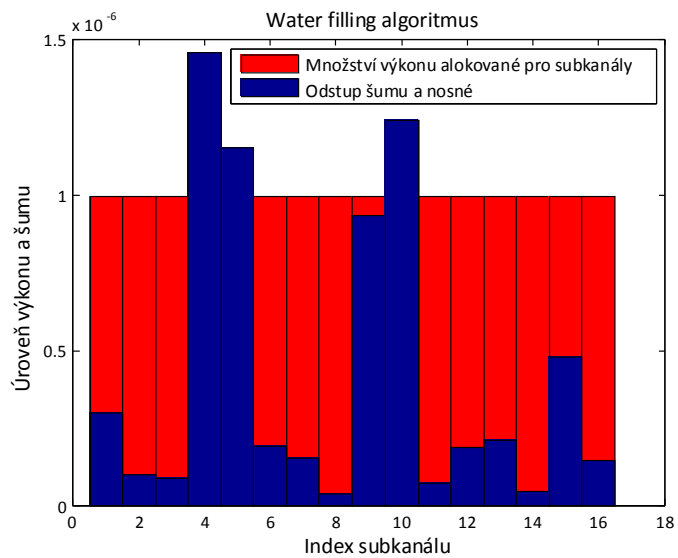


Obr. 4.2: Kapacita linky při zohlednění režijních dat a velikosti přenášených dat.

4.2 Algoritmus water filling

Při použití OFDM dochází k rozdělení frekvenčního pásma do N úzkopásmových subpásem. To má vliv zejména na robustnost proti rušení, jak je vysvětleno v kapitole 5.3. Tento systém také umožňuje zcela vyřadit některé subkanály, které se pro přenos nedají použít. Water filling algoritmus slouží pro výběr takových subpásem a případně jejich vyřazení. Algoritmus přiřazuje jednotlivým subkanálům hodnotu vysílacího výkonu v závislosti na jeho stavu. To znamená, že pokud je daný subkanál zarušený nad určitou úroveň, nemusí mu být přidělen žádný vysílací výkon.

Dochází tedy k maximalizaci kapacity frekvenčně selektivního kanálu tak, že subkanálům s dobrým stavem je přidělen větší vysílací výkon a horším kanálům nižší nebo žádný [7]. S využitím [26] je princip demonstrován na obr. 4.3.



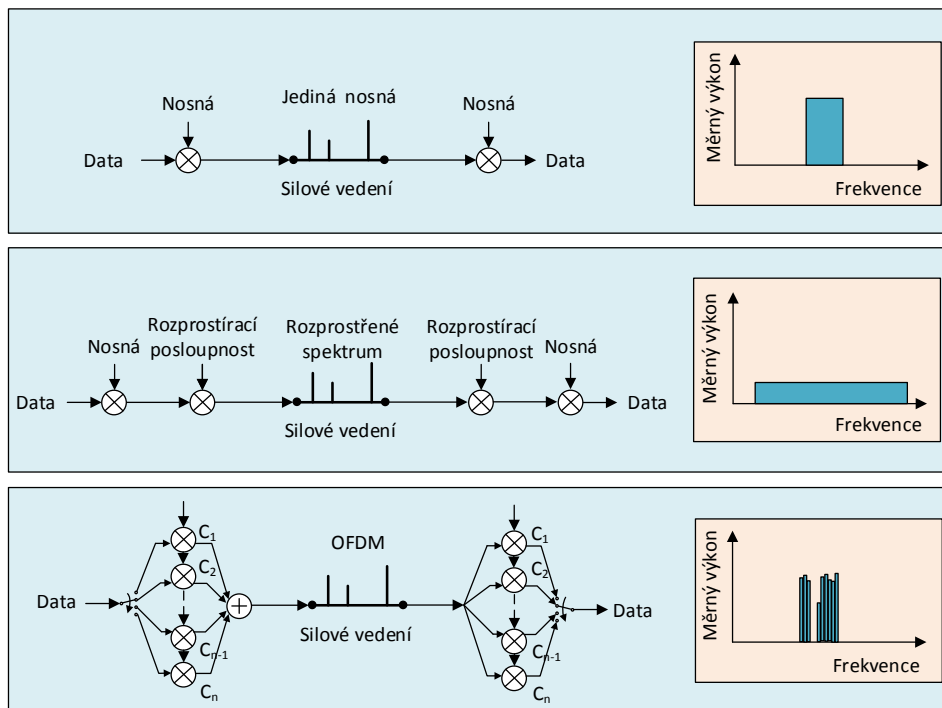
Obr. 4.3: Water filling algoritmus [42].

5 MODULACE POUŽÍVANÉ V PLC

S ohledem na vlastnosti a náchylnost PLC systémů na různé typy rušení, se při výběru vhodného modulačního schématu musí zvážit zejména tyto tři hlavní problémy [6]:

- Citlivost systému na různé druhy rušení, mimo jiné impulzní rušení s relativně velkou úrovní šumu, což vede k menšímu SNR,
- přenosový kanál je časově proměnný a frekvenčně selektivní,
- vysílací výkon je kvůli elektromagnetické kompatibilitě omezen na určitou maximální hodnotu.

V následující části jsou popsány některé vhodné modulační schémata pro PLC systémy.



Obr. 5.1: Modulační metody pro PLC [5].

5.1 Modulace s jednou nosnou

U těchto typů modulací dochází k modulování datového signálu na jednu nosnou o kmitočtu f_0 . Mezi několik základních modulací patří:

- Modulace s klíčováním amplitudy **ASK**,
- modulace s klíčováním kmitočtu **FSK**,
- modulace s klíčováním fáze **PSK**,
- kvadraturní amplitudová modulace **QAM**.

U ASK datový signál moduluje amplitudu nosného signálu bez vlivu na frekvenci či fázi. V základní formě není odolná vůči rušení a v komunikačních systémech se tak téměř nepoužívá. U FSK dochází ke změně frekvence nosného signálu. V závislosti na datovém signálu dochází k přepínání mezi frekvencemi f_1 a f_2 harmonického nosného signálu. Technika je jednoduchá a odolnější proti rušení. PSK je docíleno změnou fáze nosného signálu. Jedná se o jednu z nejběžnější typů modulací. Nejjednodušší PSK modulace je dvoustavová, označována **BPSK**. Používá pouze dva signálové prvky -1 a 1. Dalším známým typem je **QPSK**, tedy kvadraturní fázové klíčování. Používá čtyři signálové prvky, vyjádřené nosnou vlnou s odlišnou počáteční fází. Sousední fáze signálových prvků se vždy liší o $\pi/2$ [8]. Kombinací PSK a ASK vzniká QAM. U QAM tedy dochází ke klíčování fáze i amplitudy nosného signálu. Toto se děje za účelem zvyšování stavů a obecně lze vícestavovou modulaci označit zkratkou **MQAM**, kde M označuje počet signálových prvků (celkový počet stavů) signálu. Důvodem zvyšování stavů je zvýšení přenosové rychlosti.

I přesto, že uvedené modulace našly reálné uplatnění, zejména v úzkopásmové PLC (např. modem ST7538 (FSK), či ST7580 (QPSK) [21]), pro širokopásmovou technologii se tyto modulace jeví jako nedostačující pro vysokorychlostní přenos dat. Hlavním problémem je zejména frekvenční selektivita kanálu, která je způsobena mnohacestným šířením a způsobuje minima ve frekvenční odezvě. Ovlivněné frekvence jsou nepředvídatelné a mění se s časem, umístěním a vlastnostmi dané sítě, což má při zasažení přenosové frekvence neblahé následky na výkon systému [9].

5.2 Modulace s rozprostřeným spektrem

Pro širokopásmové PLC se jeví jako vhodný kandidát a to hlavně z hlediska odolnosti proti různým druhům úzkopásmového rušení a frekvenční selektivitě. Dalším důvodem je, že vykazuje nízkou PSD vysílaného signálu. Původně byla vyvinuta pro armádní účely s cílem zvýšit robustnost systému proti cílenému rušení (jamming).

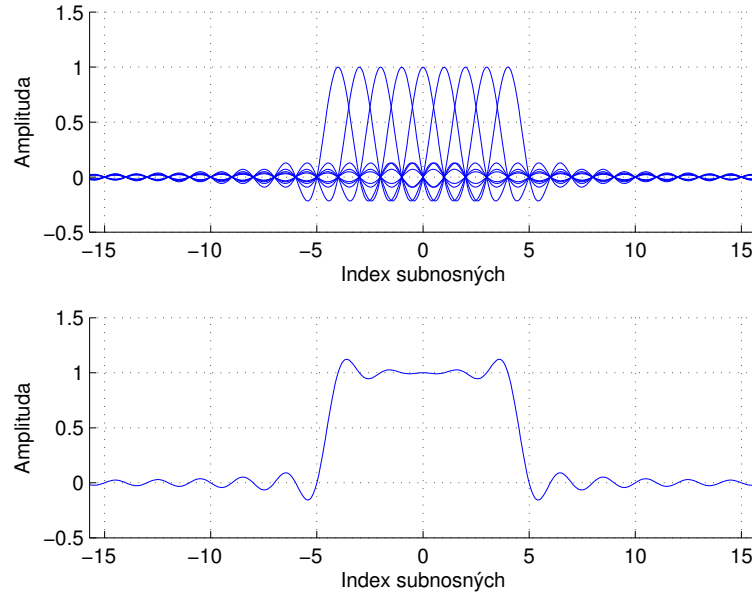
Principem je rozprostření úzkopásmového signálu do širšího frekvenčního spektra. V prvním kroku je nosná o frekvenci f_0 modulována datovým signálem a v dalším

je násobena s pseudonáhodnou posloupností, jejíž přenosová rychlost R_{ch} je mnohonásobně větší než přenosová rychlost vstupní posloupnosti R_b [8]. Tato metoda je označována jako rozprostření s přímou posloupností DS. Další metodou je tzv. frekvenční přeskokování FH, kdy je na základně náhodné posloupnosti měněn kmitočet místního oscilátoru. Na straně přijímače pak musí být použita stejná posloupnost v obou případech. Šířka pásma signálu s rozprostřeným spektrem je tak mnohonásobně větší než minimální šířka pásma potřebná pro přenos. Pro vysokorychlostní přenos dat je tak třeba velká šířka pásma, která v PLC nemusí být vždy dostupná.

5.3 Ortogonální kmitočtový multiplex (OFDM)

OFDM je širokopásmová modulace, která využívá frekvenční dělení kanálu. Je relativně složitá, ale disponuje odolností vůči úzkopásmovému, impulznímu rušení i frekvenční selektivitě kanálu. Používané spektrum je rozděleno do několika úzkopásmových subkanálů. Datový tok je přenášén frekvenčním multiplexem, který používá N ortogonálních nosných. Jinými slovy je rychlý sériový datový proud rozdělen do několika paralelních pomalých datových toků, které jsou zároveň přenášeny přes ortogonální subkanály. V jednotlivých subkanálech jsou použity klasické modulace uvedené v kapitole 5.1. Z uvedeného principu je jasná výhoda oproti modulacím s jednou nosnou. U jedno nosných systému může jedno zarušení nosné vést k selhání celého systému, kdežto u OFDM dojde k poškození pouze několik subnosných. Další výhodou je, že pro každý subkanál lze zvolit jiný typ modulace v závislosti na jeho kvalitě, navíc lze některé subkanály úplně vyřadit vynulováním daných subnosných [5]. Pro vysokorychlostní přenos v PLC se tak jeví OFDM jako nejvhodnější.

Na obr. 5.2 je zobrazeno frekvenční spektrum jednotlivých subnosných OFDM systému a jejich suma. V každé špičce je pouze jedna subnosná, která nemá nulovou hodnotu, všechny ostatní jsou nulové. To znamená, že i přestože existuje několik subnosných, jsou vzájemně nezávislé a navzájem se neovlivňují (neruší), tedy jsou ortogonální.



Obr. 5.2: Frekvenční spektrum jednotlivých subnosných (nahore) OFDM systému a jejich suma (dole) [41].

5.4 Porovnání jednotlivých modulací z hlediska chybovosti BER k odstupu signálu od šumu

Chybovost je obecně dána poměrem chybně přenesených elementů digitálního signálu k celkovému počtu přenesených elementů [32]. Řádově je vyžadována velice nízká hodnota, např. hodnota 10^{-3} (tj. 1 chyba z tisíce) je limit pro provoz linkových systémů PCM pro telefonii, či hodnota 10^{-7} je limit pro provoz přípojek xDSL.

Pravděpodobnost vzniku symbolové chyby pro více stavové modulace M-QAM lze obecně vyjádřit vztahem:

$$P_{se} = \left(1 - \frac{1}{M}\right) \cdot \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3 \cdot \text{SNR}}{2 \cdot (M^2 - 1)}}, \quad (5.1)$$

kde M je počet stavů modulace a erfc je komplementární chybová funkce, jejíž zjednodušený aproximovaný vztah vypadá takto:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi} \cdot x}. \quad (5.2)$$

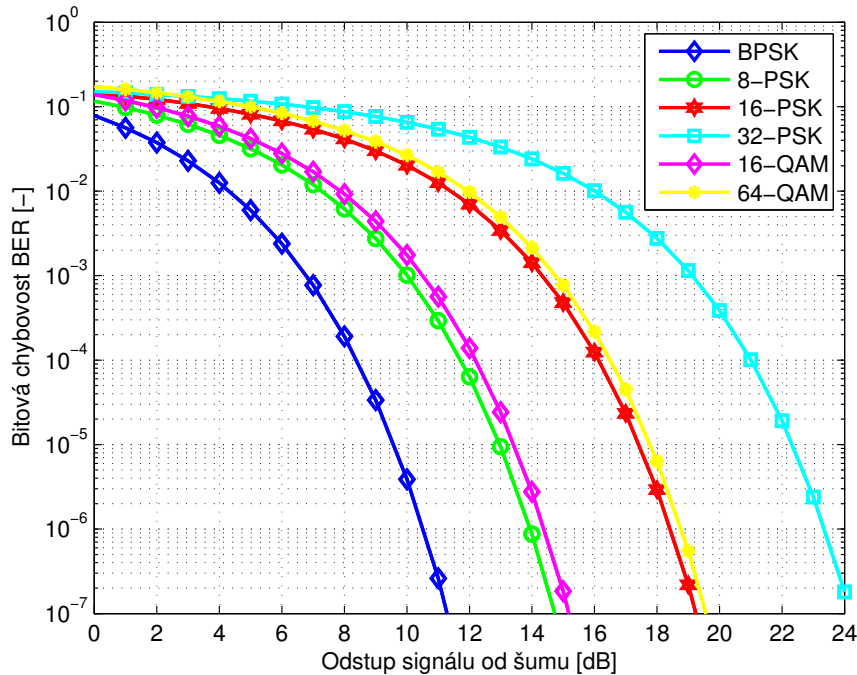
Pro bitovou chybovost pak platí:

$$\text{BER} \approx P_{be} \approx P_{se} \frac{1}{\log_2 M} \quad (5.3)$$

Pro symbolovou chybovost M stavové M-PSK modulace pak platí:

$$P_{se} = \text{erfcn} \sqrt{SNR \cdot \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)}. \quad (5.4)$$

Pro bitovou chybovost opět platí vztah 5.3. Pro porovnání byly pomocí matlabu s použitím výše uvedených vztahů vyneseny křivky závislosti bitové chybovosti BER na normovaném odstupu signálu od šumu. Porovnání jednotlivých modulací lze vidět na obr. 5.3. Pokud pak stanovíme požadovanou hodnotu BER, lze z grafu vyčíst nutný poměr signálu k šumu. Při pohledu na graf tak lze vidět, že nejmenší nutný poměr signálu k šumu náleží modulaci BPSK, největší pak 32-PSK. Pro požadovanou hodnotu BER = 10^{-7} jsou jednotlivé hodnoty odstupů signálu od šumu znázorněny v tab.5.1. Toto porovnání je nutné brát v úvahu u jednotlivých teoretických přenosových kapacit, které jsou simulovány v následujících kapitolách.



Obr. 5.3: Závislost chybovosti BER na normovaném odstupu signálu od šumu [40].

Tab. 5.1: Hodnoty normovaného odstupů signálu od šumu pro BER 10^{-7} .

Typ modulace	BPSK	8-PSK	16-PSK	32-PSK	16-QAM	64-QAM
Potřebný SNR [dB]	11,1	14,4	19,1	24,5	15,1	19,5

V praxi se stanovuje přenosová kapacita s ohledem na maximální přípustnou hodnotu chybovosti. Lze pak vyjádřit modifikovaný Shannon-hartleyův teorém, který je popsán v kapitole 4, vztahem:

$$C = B \cdot \log_2 \cdot \left(1 + \frac{SNR}{k_b} \right), \quad [bit/s], \quad (5.5)$$

kde koeficient k_b je tzv. Shannonova mezera, který je odvozen od hodnoty přípustné chybovosti. Hodnota k_b pro různé četnosti symbolových chyb pro Gaussovské rozložení šumu je v tab. 5.2. Koeficient se navíc zvyšuje o šumovou rezervu a snižuje o kódový zisk při použití opravného kódu.

Tab. 5.2: Hodnoty k_b pro požadované četnosti symbolových chyb [32].

P_{se}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
k_b	3,6	5	6,5	8	9,5	11	12,4

6 SIMULACE JEDNODUCHÝCH TOPOLOGIÍ

Cílem jednotlivých simulací bylo prozkoumat závislost přenosové funkce a teoretické kapacity linky na různých parametrech. V rámci kapitoly 6.2.2 a 6.2.3 je také zkoumán přenosový výkon popsáný v kapitole 4.1. Uvedené, zjednodušené topologie slouží zejména pro zřetelnost výstupů. Reálně jsou topologie mnohem komplexnější, avšak dané změny jednotlivých parametrů by neměly takovou vypovídací hodnotu. Každá podkapitola obsahuje popis scénářů, konfiguraci simulace a dosažené výsledky.

Simulace jsou realizovány pro širokopásmovou technologii. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2, frekvenční pásmo se pohybuje v rozsahu 1,6 – 30 MHz. Některé nové standardy však využívají i širší pásmo. Pokud to bylo možné, dané simulace jsou vztaženy a porovnány s různými publikacemi, a proto se šířka daného pásma v průběhu mění. Hodnoty jsou uvedeny v popisu jednotlivých simulací. V základní konfiguraci jsou všechny simulace provedeny s modulací 64PSK, šumem na pozadí s hodnotou $1e-9$ mW/Hz a vysílacím výkonem $1e-8$ mW/Hz. Celé frekvenční pásmo je rozděleno do 1000 subpásem. Typické úrovně šumu na základě měření měření jsou uvedeny v kapitole 6.2.6. Záměrně byla volena horší úroveň šumu a je tak možné počítat s jistou rezervou.

Výstupem simulátoru NS-3 jsou buď textové, nebo datové soubory. Ty je pak třeba externě zpracovat. Pro vykreslení následujících grafů byl použit matlab i excel. V některých případech byly s využitím matlabu provedeny i externí výpočty, či různá zohlednění.

6.1 Simulátor NS-3

Z důvodu nedostatku simulačních nástrojů pro modelování PLC kanálu byl na univerzitě ve Vancouveru vyvinut framework pro NS-3, který si klade za cíl toto umožnit [1]. Jak tvrdí autoři, hlavním cílem je integrace modulů do simulátoru NS-3, tj. možnost využití komplexnějších simulací využívajících již stávajících knihoven NS-3, které obsahují velké množství komunikačních technologií. Framework umožňuje definovat různé topologie a zahrnout do simulace časově proměnné chování kanálu.

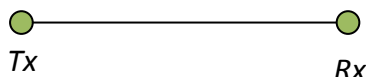
V rámci simulací umožňuje modul konfigurovat různé rozpoložení uzlů, definovat mezi nimi různé typy kabelů, definovat vysílací výkon, úroveň šumu na pozadí, či typ použité modulace. Zároveň je velkou výhodou, že simulátor je poskytován formou otevřeného kódu, což znamená, že veškeré moduly jsou přístupné a dají se různě modifikovat.

Pro práci s NS-3 je využíván eclipse, což je C++ editor, který umožňuje soubory měnit a ladit.

Autoři také implementovali grafické rozhraní simulátoru, které však disponuje pouze omezenými možnostmi, např. nelze zahrnout vliv rušení, či typ použitých modulací. V rámci této práce není grafické prostředí nijak využíváno.

6.2 Point-to-point zapojení PLC modemů

V tomto scénáři byla zkoumána závislost přenosové funkce a kapacity linky na vzdálenosti dvou PLC modemů. Topologie je znázorněna na obr. 6.1. Byly zde porovnány dva typy kabelů a to zejména z důvodů vlivu na kapacitu linky. Kabel CYKY 3x2,5 je používán pro vnitřní elektroinstalaci a dané výsledky jsou tak vztaženy zejména k provozu datových služeb v rámci velkých budov, rodinných domů či bytů. Kabel NAYY150SE je typ venkovní podzemní kabeláže.



Obr. 6.1: P2P topologie.

6.2.1 Parametry kabelu CYKY 3x2,5 a NAYY150 SE

Následující parametry jsou důležité pro výpočet primárních a sekundárních parametrů, které jsou popsány v kap. 2.2.3, proto jsou zde i uvedeny. Parametry kabelu CYKY 3x2,5 v tab. 6.1 a parametry kabelu NAYY150 SE pak v tab. 6.2.

Tab. 6.1: Technická specifikace kabelu CYKY 3x2,5 [39].

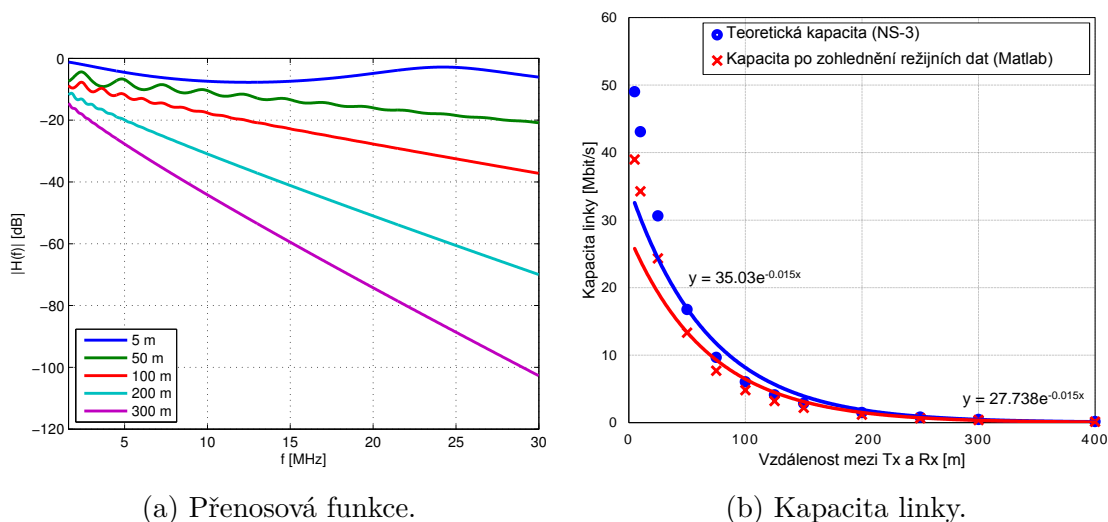
Počet žil x jmenovitý průřez vodiče [mm^2]	3x2,5
Jmenovitá tloušťka izolace [mm]	0,8
Vnější průměr kabelu [mm]	9,3
Činný odpor jádra při 20 °C [Ω/km]	0,253
Proudová zatížitelnost ve vzduchu/zemi [A]	25/38
Informativní hmotnost kabelu [kg/m]	0,163

Tab. 6.2: Technická specifikace kabelu NAYY150 SE [28].

Počet žil x jmenovitý průřez vodiče [mm^2]	4x150
Jmenovitá tloušťka izolace [mm]	1,8
Vnější průměr kabelu [mm]	46
Informativní hmotnost kabelu [kg/km]	3000

6.2.2 Kabel CYKY 3x2,5

Zkoumané frekvenční pásmo bylo 1,6 – 30 MHz. Impedance obou uzlů byly nastaveny na konstantní hodnotu 100 Ω . Typ použité modulace byl 64PSK. Ve scénáři docházelo k postupnému navyšování vzdálenosti a to z hodnoty 5 m na 50, 100, 200 a 300 m. Výsledné přenosové funkce pro různé vzdálenosti jsou zobrazeny na obr. 6.2a. Na obr. 6.2b je zobrazena závislost kapacity linky na vzdálenosti modemů.



Obr. 6.2: Závislost přenosové funkce a kapacity linky na vzdálenosti mezi Tx a Rx, kabelu CYKY 3x2,5.

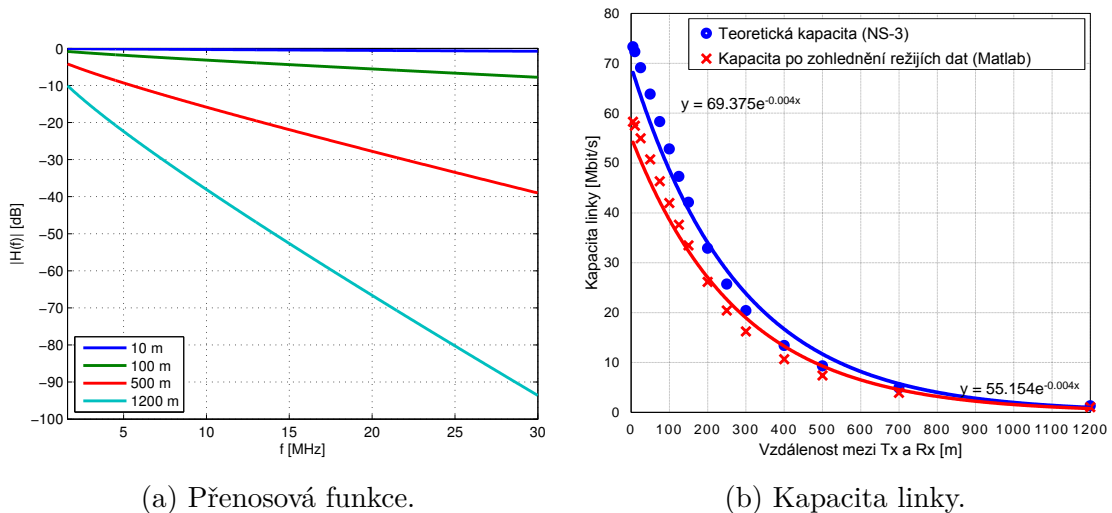
Ztrátami kabelu je způsobeno, že se zvětšující se vzdáleností a frekvencí mezi vysílacím a přijímacím modemem, se zvyšuje útlum, což má vliv i na přenosovou kapacitu linky. Na obr. 6.2b je porovnávána teoretická kapacita linky a kapacita při uvažování režijních dat ethernetového rámce. Teoretická přenosová kapacita byla vypočítána v simulátoru NS-3, kdežto přenosová kapacita se zohledněním režijních dat je externě dopočítána v matlabu dle kapitoly 4.1. Uvažovaná velikost užitečných dat je 256 B, celkově je tedy přenášeno 256 + 66 B (režijní data). Při uvažování režii dochází k poklesu teoretické kapacity linky o 20,5 %, tj. 79,5 % kapacity linky je

využito pro přenos užitečných dat. Maximální teoretická přenosová kapacita v daném scénáři je 49,0191 Mbit/s a to při vzdálenosti 5 m.

Při uvažování režii je maximální efektivní přenosová kapacita 38,9702 Mbit/s. Rapidní pokles, téměř na třetinu maximální kapacity, nastává již v prvních 50 m. Při vzdálenosti přibližně 230 m dochází k poklesu pod hodnotu 1 Mbit/s. Pro překonání větších vzdáleností je tak nutné použít opakováč.

6.2.3 Kabel NAYY150 SE

Frekvenční pásmo je stejné jako u kabelu CYKY. Impedance obou uzlů jsou rovny charakteristické impedanci kabelu NAYY. Vzdálenosti byly postupně nastaveny na hodnoty 10, 100, 500 a 1200 m. Výsledné přenosové funkce pro různé vzdálenosti jsou zobrazeny na obr. 6.3a. Na obr. 6.3b je zobrazena závislost přenosové kapacity linky na vzdálenosti modemů.

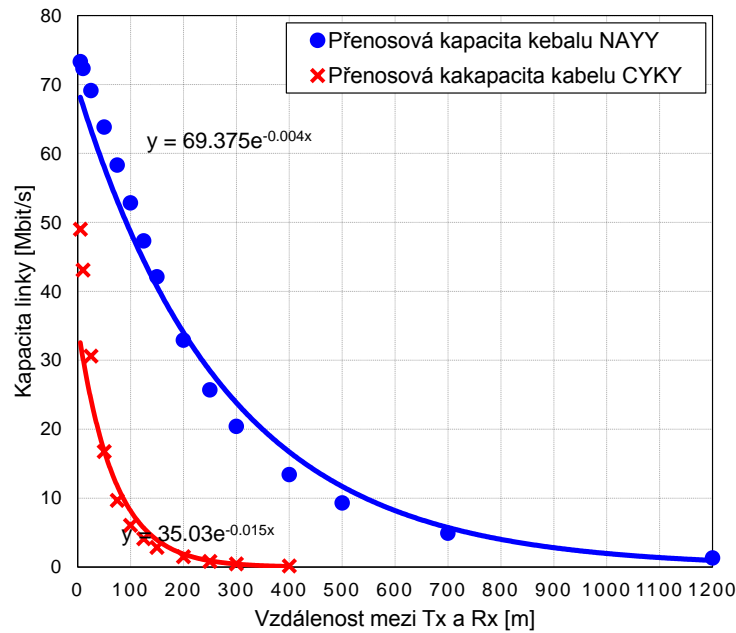


(a) Přenosová funkce.

(b) Kapacita linky.

Obr. 6.3: Závislost přenosové funkce a kapacity linky na vzdálenosti mezi Tx a Rx, kabelu NAYY150 SE.

Při vzdálenosti 1200 m vykazuje přenosová funkce kabelu NAYY150 podobné hodnoty jako kabel CYKY 3x2.5 při vzdálenosti 300 m. Kabel NAYY tedy vykazuje nižší hodnoty útlumu a tudíž i vyšší hodnoty přenosové kapacity. S kabelem je také možné dosáhnout větších komunikačních vzdáleností. Kabel vykazuje maximální přenosovou teoretickou kapacitu 73,3 Mbit/s. Po zohlednění režii klesla kapacita na 58,3 Mbit/s. Pokles pod hranici 1 Mbit/s nastává až při vzdálenosti přibližně 1200 m. Pro zřetelnost jsou přenosové kapacity obou kabelů porovnány na obr. 6.4



Obr. 6.4: Srovnání přenosových kapacity kabelů v závislosti na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem.

6.2.4 Vliv typu modulace na přenosovou kapacitu

V rámci tohoto scénáře bylo provedeno porovnání některých dostupných modulací z hlediska vlivu na přenosovou kapacitu. Použit byl kabel NAYY150 SE společně se stejným nastavením jako v předešlém scénáři. Vzdálenost mezi vysílacím a přijímacím uzlem byla 10 m. Výsledkem simulací v NS-3 jsou hodnoty kapacity linky, které jsou zobrazeny v tab. 6.3.

Tab. 6.3: Přenosová kapacita pro různé typy modulací kabelu NAYY150 SE.

Modulace	BPSK	32-PSK	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Kapacita [Mbit/s]	24,8	72,28	27,08	82,80	85,23

Z výsledků lze usoudit, že vliv použité modulace na přenosovou kapacitu je markantní. Simulace také potvrdila teoretický předpoklad, že s modulací QAM lze dosáhnout vyšších přenosových kapacit. Toto jsou však pouze teoretické hodnoty bez ohledu na chybovost BER. Určité typy modulací jsou totiž v reálném prostředí náchylnější na rušení a potřebují větší odstup signálu od šumu, jinak dochází k vyšší pravděpodobnosti výskytu bitových chyb. Pravděpodobnost výskytu bitové chyby vyjadřuje hodnota BER, kterou je nutno brát v úvahu u jednotlivých modulací. Chybovost je blíže popsána, společně s porovnáním nutného odstup signálu od šumu pro jednotlivé simulace, v kapitole 5.4.

Na základě poznatků z této kapitoly byly provedeny další simulace v NS-3 s tím, že hodnota SNR byla vydělena koeficientem k_b (tzv. Shannonovou mezerou) s hodnotou pro požadovanou maximální symbolovou chybovost 10^{-6} (což je prakticky jedna chyba z miliónu). Hodnota SNR byla upravena až při načítání proměnné pro výpočet přenosové kapacity linky v souboru *plc-dcmc-capacity.cc*. Konkrétně:

```
while (SINR_dB_it != SINR_dB.ConstValuesEnd() && cit !=
    capacityPerHertz.ValuesEnd())
{
    double sc_SINR = *SINR_dB_it/k_b;
    ...
    ...
}
```

Kde hodnota k_b vyjadřuje Shannonovu mezeru a v tomto konkrétním případě měla hodnotu 8.

Výsledky přenosových kapacit, pro symbolovou chybovost 10^{-6} , jednotlivých modulací jsou uvedeny v tabulce 6.4. Lze vidět, že při tomto zohlednění se dostávají jednotlivé modulace na podobnou úroveň přenosové kapacity. Např. u 64-QAM dochází k poklesu z hodnoty 85,23 Mbit/s na hodnotu 29,25 Mbit/s, což je pokles téměř o 66 %.

Tab. 6.4: Přenosová kapacita pro různé typy modulací kabelu NAYY150 SE při dodržení symbolové chybovosti 10^{-6} .

Modulace	BPSK	32-PSK	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Kapacita [Mbit/s]	20,57	28,83	20,57	29,17	29,25

6.2.5 Vliv barevného šumu na přenosovou kapacitu

V rámci této simulace byly porovnány jednotlivé úrovně barevného šumu na pozadí, které jsou popsány v kapitole 3.1. Simulace proběhly na kabelu CYKY 3x2,5 při vzdálenosti vysílače a přijímače 10 m a vysílacím výkonu $1e-11$ mW/Hz (-110 dBm/Hz). Daná hodnota výkonu zde musela být přizpůsobena z důvodu, aby vynikly jednotlivé rozdíly v kapacitách. Výsledky jsou znázorněny v tab. 6.5, kde lze vidět rozdíly při nastavení jednotlivých typů šumu, jejichž průběhy jsou znázorněny v kapitole 3.1.

Tab. 6.5: Přenosová kapacita pro různé úrovně barevného šumu na pozadí.

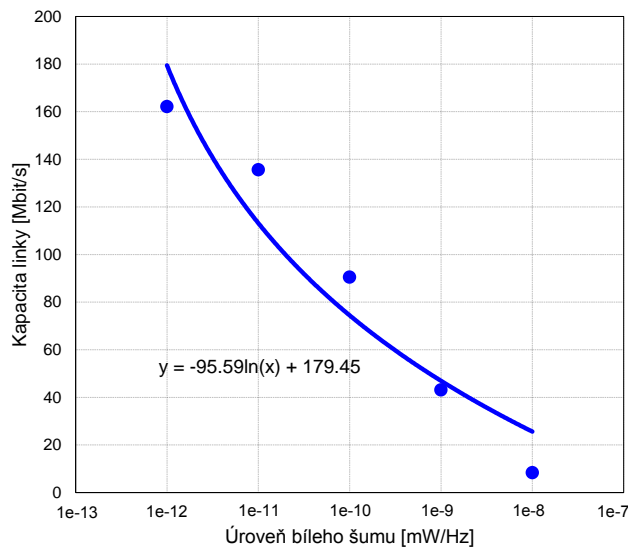
Hladina rušení	Best	Medium	Worst	Industrial	Residential
Kapacita [Mbit/s]	30,42	39,24	52,06	30,48	44,03

6.2.6 Vliv bílého šumu na přenosovou kapacitu

Cílem této kapitoly bylo porovnat vliv jednotlivých hodnot bílého šumu na přenosovou kapacitu. Průměrná spektrální hustota výkonu šumu pro vedení vysokého napětí se podle měření v [17] pohybuje kolem hodnoty -105 dBm/Hz. Pro rozvody nízkého napětí je pak PSD o něco nižší a pohybuje se přibližně kolem hodnoty -120 dBm/Hz. Na tuto hodnotu lze také nahlížet z hlediska použitého vedení, kdy pro podzemní vysokonapěťové vedení se hodnota pohybuje průměrně kolem -135 dBm/Hz a pro nadzemní vysokonapěťové vedení -105 dBm/Hz [4]. Na základě tohoto zjištění pak byly voleny experimentální hodnoty PSD šumu 1e-8 mW/Hz (-80 dBm/Hz), 1e-9 mW/Hz (-90 dBm/Hz), 1e-10 mW/Hz (-100 dBm/Hz), 1e-11 mW/Hz (-110 dBm/Hz) a 1e-12 mW/Hz (-120 dBm/Hz), při vysílacím výkonu 1e-8 mW/Hz. Jednotlivé výsledky jsou graficky znázorněny na obr. 6.5 a jednotlivé hodnoty pak v tab. 6.6.

Tab. 6.6: Přenosová kapacita pro různé úrovně bílého šumu na pozadí.

Hladina rušení [mW/Hz]	1e-8	1e-9	1e-10	1e-11	1e-12
Kapacita [Mbit/s]	8,35	43,09	90,45	135,59	162,15



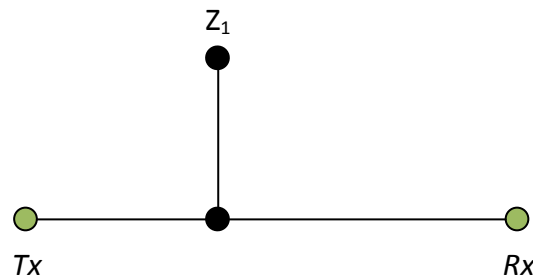
Obr. 6.5: Závislost přenosové kapacity na úrovni bílého šumu.

Jak vyplývá ze simulací, zvyšující se hodnota šumu vysoce ovlivňuje přenosovou kapacitu linky. Se snižující se hodnotou dochází k většímu odstupům signálu od šumu, což vede i k lepším přenosovým vlastnostem.

6.3 Topologie s jednou odbočkou

V několika následujících scénářích je uvažována topologie z obr. 6.6. Cílem bylo prozkoumat vliv různých parametrů odbočky na přenosovou funkci a kapacitu linky mezi vysílacím a přijímacím modemem. Jako podklad byla použita publikace [2], a to zejména z důvodu možnosti porovnání výstupů. Mezi zkoumané vlivy patří:

- Vliv odbočky při měnící se vzdálenosti mezi Tx a Rx,
- vliv délky odbočky,
- vliv impedance odbočky,
- vliv změny pozice odbočky.

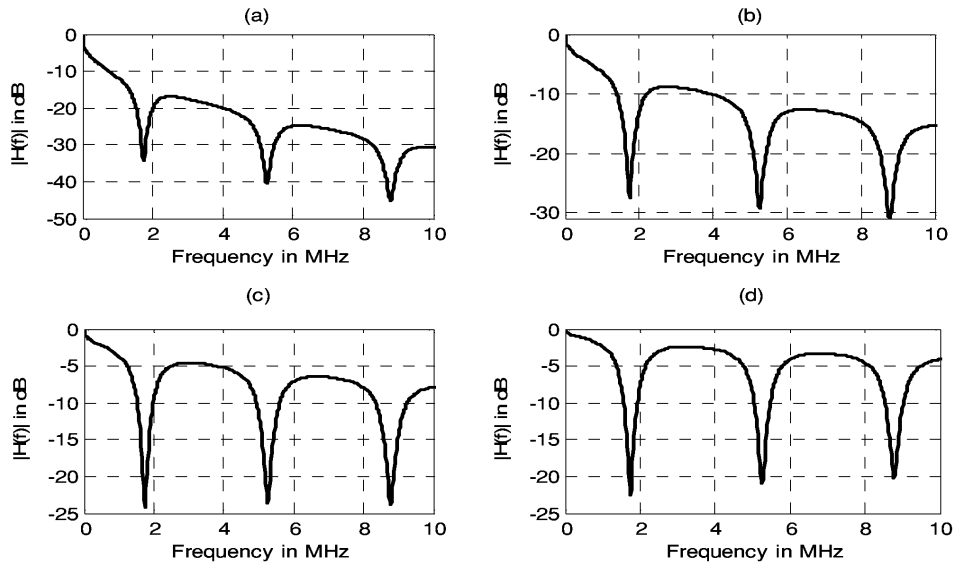


Obr. 6.6: Topologie s jednou odbočkou.

Pro hlavní linku byl použit kabel NAYY150 SE, pro odbočku musel být implementován kabel NAYY35 RE, který v základní sadě simulátoru nebyl dostupný. Impedance Tx a Rx jsou rovny charakteristické impedanci. Impedance odbočky je nastavena na konstantní hodnotu $10\text{ k}\Omega$ a délka odbočky na 20 m. Odbočka se nachází vždy uprostřed. Pokud je některý z parametrů měněn, je tak uvedeno v popisu daného scénáře.

6.3.1 Vliv odbočky při měnící se vzdálenosti mezi Tx a Rx

Na obr. 6.8 lze vidět vliv odbočky při různě nastavených vzdálenostech mezi Tx a Rx. Postupně byla vzdálenost navyšována ze 150 m na 300, 600 a 1200 m. Výsledky se

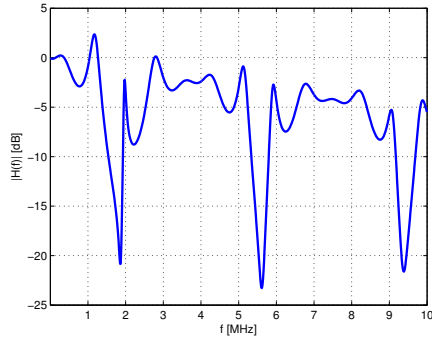


Obr. 6.7: Vliv odbočky na přenosovou funkci pro různé vzdálenosti mezi Tx a Rx: (a) 1,2 km, (b) 600 m, (c) 300 m, (d) 150 m [2].

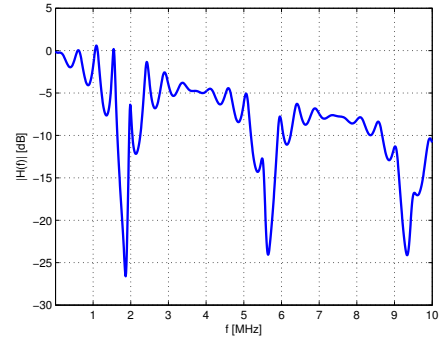
dle grafického porovnání shodují s výsledky v uvedeném dokumentu. Pro dosažení těchto výsledků však musela být upravena délka odbočky a to z původních 15 m na 20 m. Pro porovnání je zde i uveden obr. 6.7 z příslušného dokumentu, na kterém je vidět, že se přenosové funkce téměř shodují.

Z výsledků lze vidět, že odbočka má vliv na přenosovou funkci ve formě tvoření minim na určitých frekvencích. To je způsobeno odrazy signálu v odbočce, kdy se signál nešíří pouze mezi Tx a Rx, ale šíří se vícecestně. Dále pak simulace vypovídá o tom, že s zvětšující se vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem se nemění frekvenční pozice minim, dochází však ke zvyšování útlumu, jako v předchozích případech.

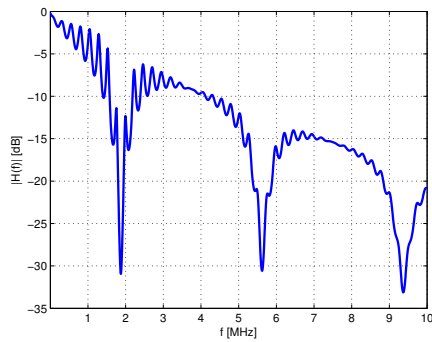
Na této simulaci by se také dal prakticky popsat princip algoritmu water filling popsaného v kap. 4.2. Celé pásmo 0-10 MHz je v rámci konfigurace simulace rozděleno do 1000 subpásem. Na obr. 6.8a lze vidět vytvoření minim na frekvencích přibližně 1,1-2 MHz, 5,1-6 MHz a 9-9,9 MHz. Tyto minima zasahují určitý počet subpásem, podle odečtených frekvencí by to byly pásma přibližně 110-200, 510-600 a 900-990. Nyní by záleželo na nastavené limitní hodnotě jednotlivých minim a od toho by se odvíjel konkrétní počet vyřazených subpásem. Například po překročení hodnoty -15 dB by byly všechny zasažené subkanály vyřazeny a dostupný vysílací výkon by mohl být přiřazen subkanálům s lepšími vlastnostmi.



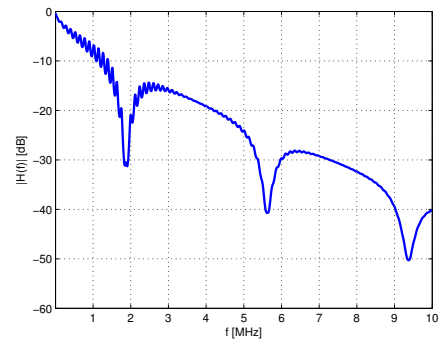
(a) 150 m



(b) 300 m



(c) 600 m



(d) 1200 m

Obr. 6.8: Vliv odbočky na přenosovou funkci pro různé vzdálenosti mezi Tx a Rx.

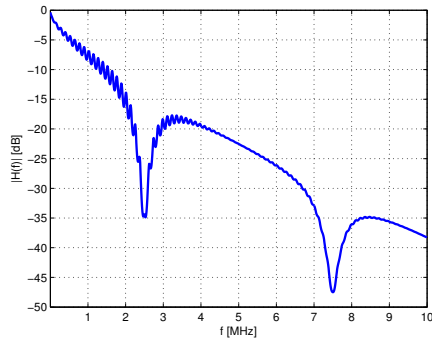
6.3.2 Vliv délky odbočky

Konfigurace je stejná jako v předešlém případě. V simulaci se postupně navyšovala délka odbočky z hodnoty 15 m na 25, 35 a 45 m, při konstantní vzdálenosti mezi Tx a Rx 1200 m. Výsledky simulace jsou vidět na obr. 6.9.

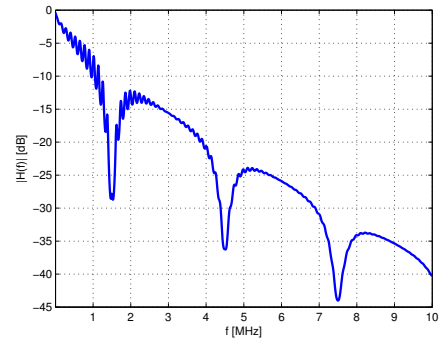
Z výsledků lze vyzorovat, že pozice minim v přenosové funkci je závislá na délce odbočky. Se zvyšující se vzdáleností dochází ke zhušťování minim. Výsledky vykazují stejný vliv odbočky jako v uvedeném dokumentu, ale při zvětšující se vzdálenosti jsou minima více zhuštěná. Neodpovídají tak jednotlivé frekvence minim. Obecně lze pozici minim vyjádřit jako:

$$f_i = \frac{38}{X}(1 + 2i) \quad \forall i \in 0, 1, 2, \dots \quad [MHz]. \quad (6.1)$$

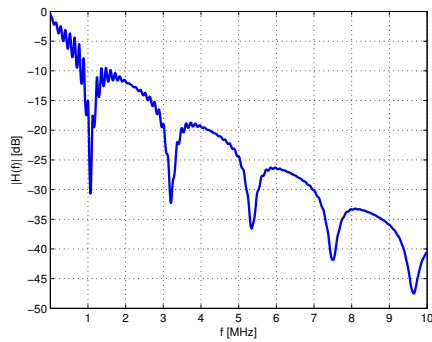
Kde f_i je frekvenční pozice minima, X je délka odbočky a i je pořadí minima.



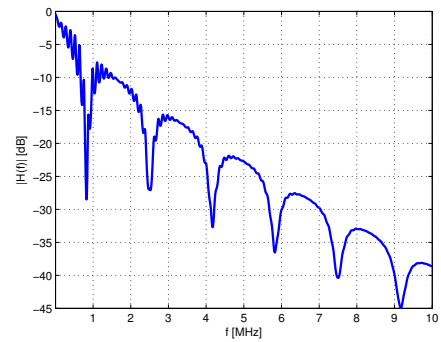
(a) 15 m



(b) 25 m



(c) 35 m

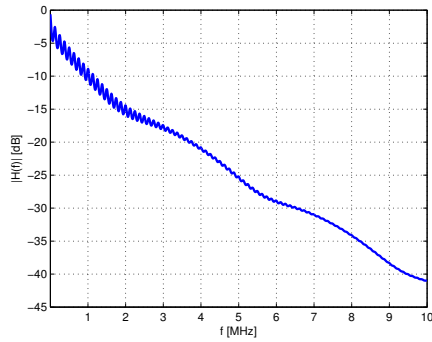


(d) 45 m

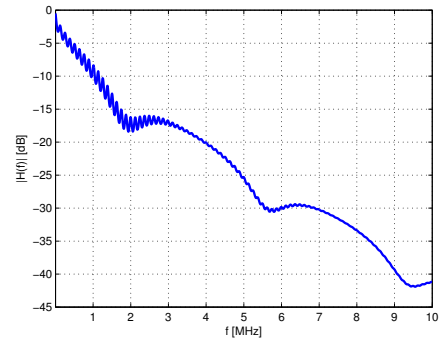
Obr. 6.9: Vliv délky odbočky na přenosovou funkci.

6.3.3 Vliv změny impedance uzlu

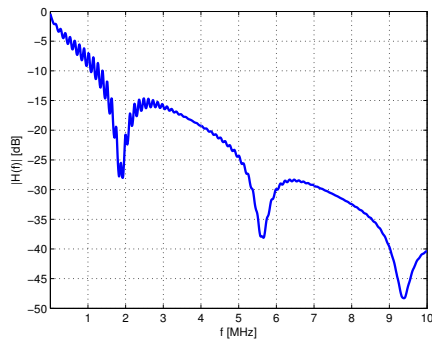
Konfigurace je stejná jako v předešlém případě. Postupně docházelo ke změně impedance odbočky, a to z hodnoty $50\ \Omega$ na 100 , 1000 a $10000\ \Omega$. Odbočka se nachází uprostřed linky mezi Tx a Rx a její délka je $20\ \text{m}$. Z výsledků na obr. 6.10 vyplývá, že zvyšující se impedance má vliv na hloubku minim. Se zvyšující se impedancí se prohlubují jednotlivé minima.



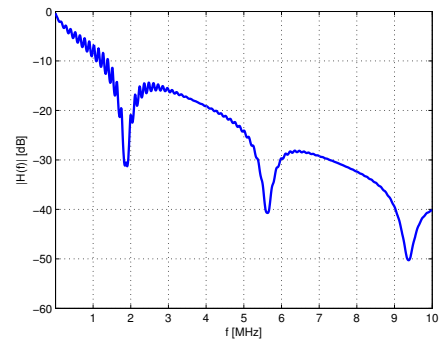
(a) 50Ω



(b) 100Ω



(c) 1000Ω



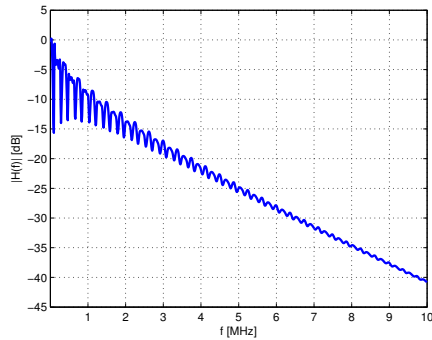
(d) $10\ 000 \Omega$

Obr. 6.10: Vliv změny impedance uzlu.

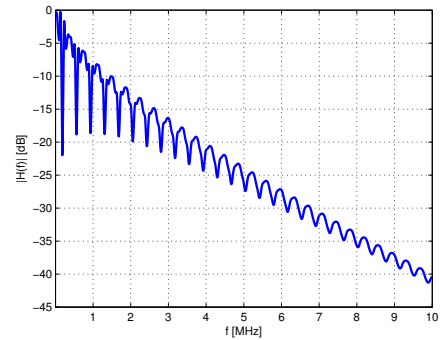
6.3.4 Vliv změny pozice odbočky

V posledním scénáři byl zkoumán vliv změny pozice odbočky. Vzdálenost mezi Tx a Rx byla opět nastavena na 1200 m, a pozice odbočky, vzhledem k vysílači, byla postupně měněna z hodnoty 200 na 400, 800 a 1000 m.

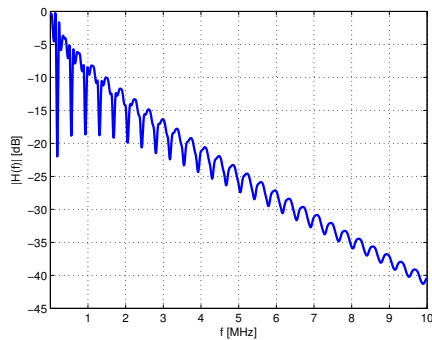
Z výsledků na obr. 6.11 lze vidět, že pozice odbočky má vliv na zvlnění přenosové funkce a výsledky jsou, vzhledem ke středu, zrcadlově stejné. To znamená, že přenosové funkce se při vzdálenosti např. 400 m od Tx a 400 m od Rx (800 m od Tx) shodují.



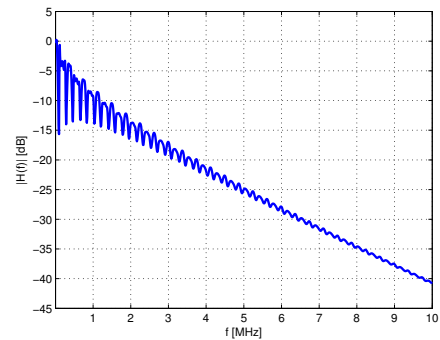
(a) 200 m



(b) 400 m



(c) 800 m



(d) 1000 m

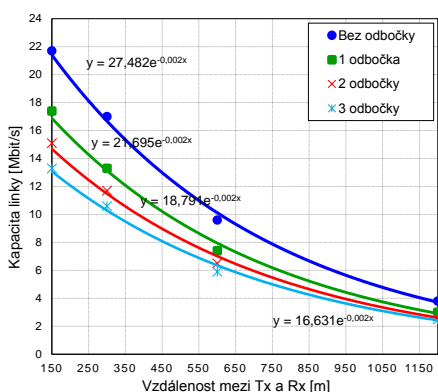
Obr. 6.11: Vliv změny pozice odbočky na přenosovou funkci.

6.3.5 Vliv jednotlivých parametrů na kapacitu linky

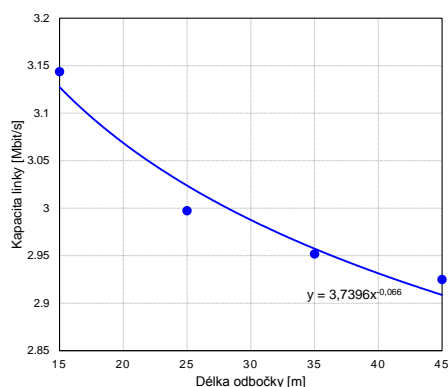
V rámci jednotlivých scénářů byl také zkoumán vliv na přenosovou kapacitu linky. Výsledky jednotlivých scénářů jsou shrnuty na obr. 6.12.

Pro měnící se vzdálenost mezi Tx a Rx (obr. 6.12a) opět dochází s rostoucí vzdáleností ke snižování kapacity linky. Byl zde porovnán vliv přítomnosti odbočky a v grafu lze vidět, že samotná odbočka, při vzdálenosti 150 m, sníží přenosovou kapacitu přibližně o 4 Mbit/s a to z hodnoty 22 Mbit/s na 18 Mbit/s. S dalším navyšováním počtu odboček (dvě a tři) lze pozorovat přibližně stejný pokles kapacity linky a to 2 Mbit/s. Tento odstup se se zvětšující vzdáleností snižuje. Při zvětšování délky odbočky (obr. 6.12b) dochází opět ke snižování kapacity linky, avšak při vzdálenosti Tx a Rx 1200 m není tento pokles tak markantní. Při změně délky odbočky z hodnoty 15 m na 45 m dojde k poklesu přenosové kapacity z hodnoty 3,15 Mbit/s na hodnotu 2,92 Mbit/s. Při zvyšování impedance, obr. 6.12c, docházelo ke zvyšování přenosové kapacity. I přesto, že se zvyšující se impedancí dochází k prohlubování minim, zároveň dochází k vytváření maxim, které při vyšších impedancích, v porovnání s nižšími, vedou ke zmenšení útlumu na určitých frekvencích, tudíž dochází

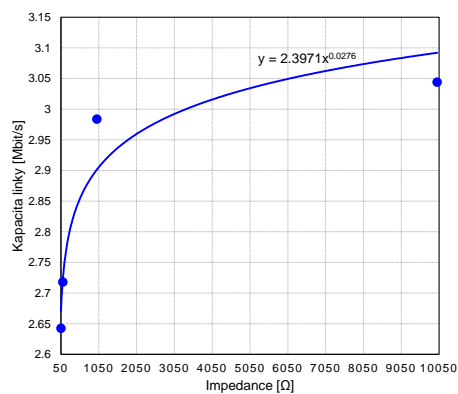
i k zvýšení přenosové kapacity. Konkrétně z hodnoty 2,65 Mbit/s při impedanci odbočky 50Ω na hodnotu 3,05 Mbit/s při impedanci odbočky $10\ 000 \Omega$. Při změně pozice odbočky dochází k výraznému zvlnění přenosové funkce. Pokud se odbočka nachází uprostřed mezi Tx a Rx, nachází se v přenosové funkci pouze několik minim, jejichž počet se odvíjí od délky odbočky. To se projevuje i na kapacitě linky, kdy se při délce odbočky 20 m v přenosové funkci nachází pouze tři minima. Přenosová kapacita je tak největší, pokud se odbočka nachází uprostřed Tx a Rx, to lze vidět na obr. 6.12d.



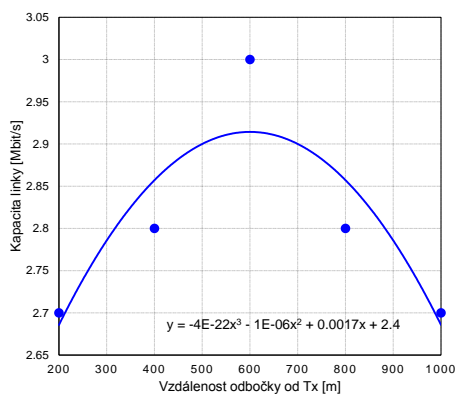
(a) Mění se vzdálenost mezi Tx a Rx.



(b) Mění se délka odbočky.



(c) Mění se impedance odbočky.



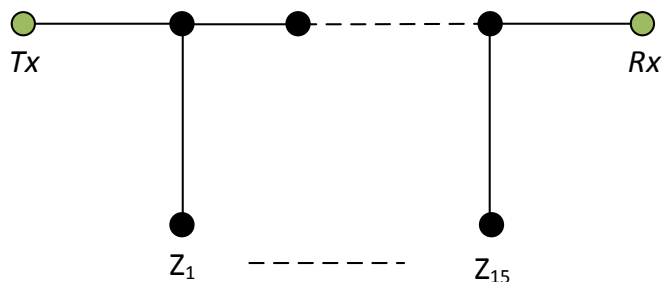
(d) Mění se pozice odbočky.

Obr. 6.12: Vliv předešlých scénářů na kapacitu linky.

6.4 Topologie s více odbočkami

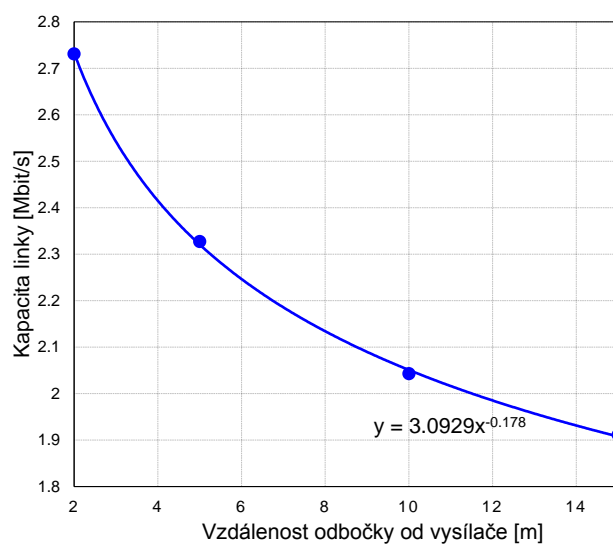
Konfigurace simulace je stejná jako u předešlé topologie, tj. vzdálenost mezi Tx a Rx je 1200 m, impedance Tx a Rx je rovna charakteristické impedanci kabelu NAYY150 SE, délka odbočky je 20 m a její impedance nastavena na konstantní

hodnotu $10000\ \Omega$. Cílem simulace, jejíž topologie je znázorněna na obr. 6.13, bylo zjistit vliv počtu odboček na přenosovou funkci a kapacitu. Počet odboček byl postupně měněn ze 2 na 5, 10 a 15. Odbočky byly vždy rovnoměrně rozprostřeny mezi vysílačem a přijímačem. Výsledné přenosové funkce jsou zobrazeny na obr. 6.15.

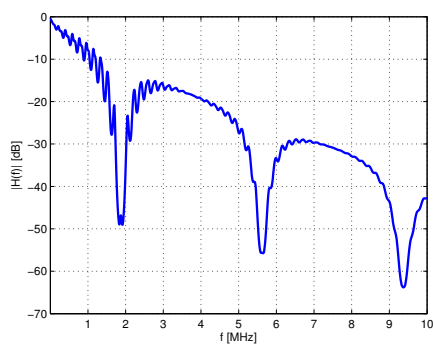


Obr. 6.13: Topologie s více odbočkami.

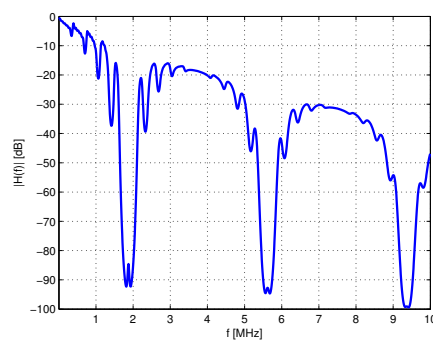
Z výsledku simulace je zřejmé, že se zvyšováním počtu odboček dochází k velkému nárůstu hloubky jednotlivých minim. U 15 odboček se nejhlubší minimum dostává až na hodnotu přibližně 325 dB. Zároveň však dochází ke snižování útlumů jednotlivých maxim, což je způsobeno postupnými odrazy v jednotlivých větvích. To má za následek, že se zvyšováním počtu odboček nedochází k tak markantním ztrátám kapacity linky, viz obr. 6.14, i když některé subpásma jsou pro přenos nepoužitelné. Dále lze z výsledků vyzorovat, že ani v jednom případě nemá počet odboček vliv na pozici minim.



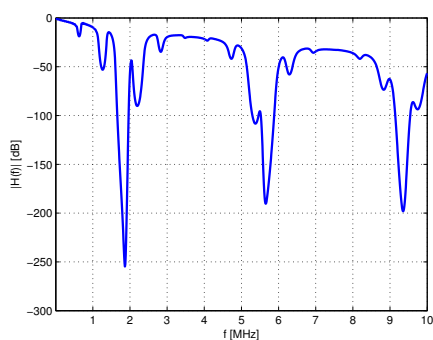
Obr. 6.14: Vliv počtu odboček na kapacitu linky.



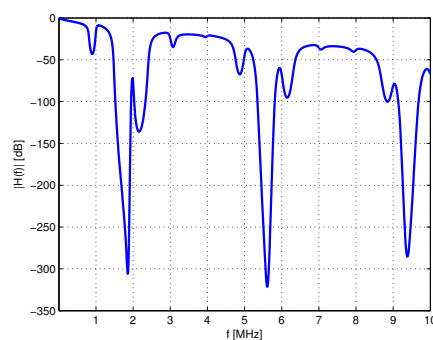
(a) 2 odbočky.



(b) 5 odboček.



(c) 10 odboček.



(d) 15 odboček.

Obr. 6.15: Vliv počtu odboček na přenosovou funkci mezi Tx a Rx.

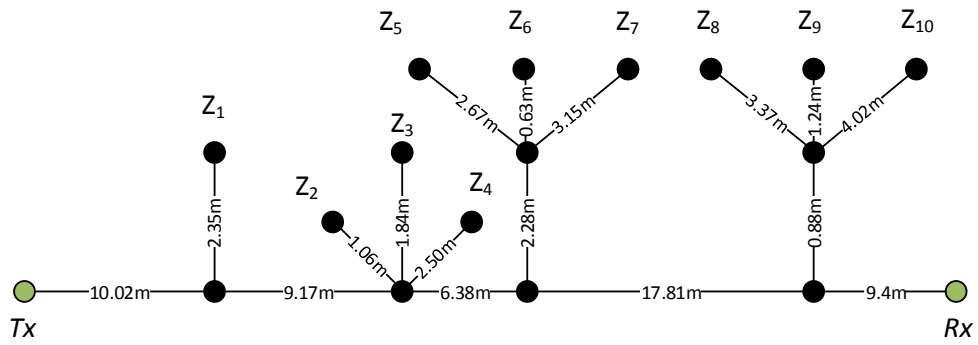
7 SIMULACE NÁHODNĚ VYGENEROVANÝCH TOPOLOGIÍ

Cílem jednotlivých simulací bylo porovnat výstupy frameworku NS-3 s výstupy z dokumentu [29], odkud jsou následující topologie převzaty. Obecně se v literatuře zabývající modelováním PLC kanálu vyskytují dva různé přístupy, *top down* a *bottom up*. První přístup pohlíží na PLC kanál jako na černou skříňku a vícecestnou propagaci signálu popisuje pomocí echo modelu v časové nebo frekvenční oblasti s použitím parametrického modelu, jehož parametry mohou být získány reálným měřením. Tyto modely jsou jednoduché a snadno implementovatelné. Jejich problémem je, že jsou závislé na přenosnosti měření a počtu použitých parametrů. Navíc nejsou schopny popsat fyziku šíření, topologii ani efekt zátěží. Druhý přístup umožňuje získat frekvenční odezvu kanálu ze znalosti vlastností jednotlivých komponent sítě (vedení, odboček a zátěží). Přenosová funkce může být získána buď pomocí síťové matice nebo pomocí teorie přenosových vedení. Druhá možnost zohledňuje vícecestné šíření a odrazy ve vedení [29]. Oba simulátory využívají stejný přístup zdola nahoru a to pro zaručení co nejpřesnějších výsledků.

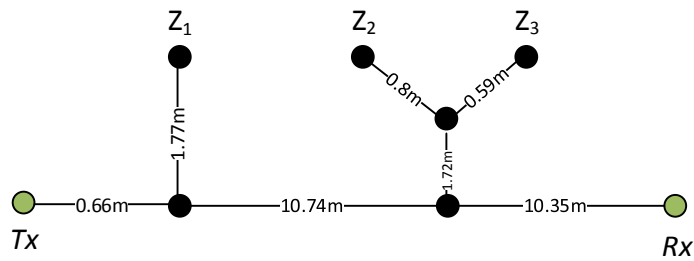
Základní nastavení je pro všechny topologie totožné. Simulace jsou realizovány ve frekvenčním pásmu 1-100 MHz. V dokumentu [29] je uvedeno, že se jedná o realizaci simulací pro domovní elektroinstalace, není zde však specifikován typ kabelu. Pro následující simulace tak byl použit nejrozšířenější kabel v domovních elektroinstalacích v ČR CYKY 3x2,5. Ve všech větvích je nasazen stejný typ kabelu. Dále dokument nespecifikuje ani použité impedance jednotlivých větví, pouze se zde uvádí, že některé větve jsou prázdné, jiné mají nastavenou impedanci klasických domácích spotřebičů (např. varná konvice, PC či monitor). Tyto skutečnosti vedou ke značnému zkreslení výstupů. Dalším cílem tak bylo pokusit se o optimalizaci simulací. To se i do jisté míry, jak je popsáno níže, podařilo.

7.1 Topologie 1 a 2

V simulované topologii na obr. 7.1a se nachází 10 uzlů, vysílač a přijímač. Existuje zde nespočet různých kombinací, kde se impedance nacházet můžou, kde ne a jaká je jejich hodnota. Po optimalizaci měly uzly Tx a Rx impedanci $50\ \Omega$ a zbývající uzly podle tabulky 8.4, kde x označuje větev bez zátěže. V druhé topologii, která je zobrazena na obr. 7.1b se již nachází menší počet uzlů a dalo se tak reálně otestovat, které zátěže se ve větvích nacházely a které na. Velikost impedancí Tx a Rx byla nastavena na $250\ \Omega$ a zbytek impedancí podle tabulky 7.2.



(a) Topologie 1.



(b) Topologie 2.

Obr. 7.1: Simulované náhodné topologie.

Tab. 7.1: Hodnoty impedancí topologie 1.

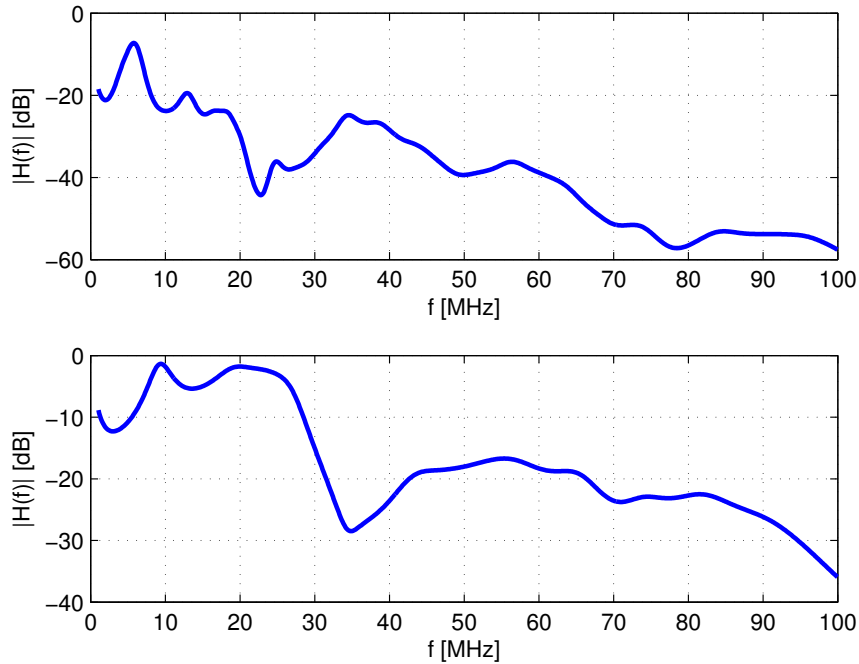
Uzel	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Impedance [Ω]	50	x	250	250	x	250	250	x	250	250

Tab. 7.2: Hodnoty impedancí topologie 2.

Uzel	Z1	Z2	Z3
Impedance [Ω]	x	50	100

Tab. 7.3: Hodnoty impedancí topologie 3.

Uzel	Z1	Z2	Z3	Z4
Impedance [Ω]	120	100	350	180



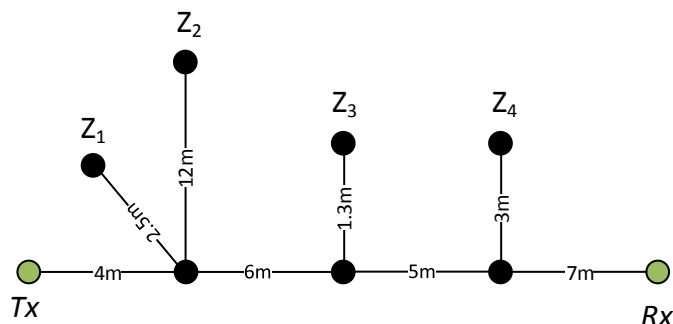
Obr. 7.2: Přenosová funkce mezi Tx a Rx topologie 1 (nahore) a topologie 2 (dole).

Výsledky první simulace se vizuálně podobají těm ve srovnávaném dokumentu. Hlavní minima se nacházejí na stejných frekvencích a dosahují přibližně stejných hodnot útlumu. Topologie z obr. 7.1a má delší linku mezi Tx a Rx a větší počet odboček, což má, jak už bylo zjištěno v kapitole 6, vliv na hodnotu útlumu přenosové funkce. Topologie 1 má oproti topologii 2 větší hodnoty útlumu, viz obr.7.2. Přenosová kapacita mezi Tx a Rx vlivem komplexnější topologie, s více odbočkami a delší vzdáleností mezi Tx a Rx dosahuje hodnoty pouze 5,12 Mbit/s. Výsledky simulace druhé topologie (obr. 7.1b) se liší od výsledků v uvedeném dokumentu a to zejména tvarem a posunutými minimy. První minimum je posunuto zhruba o 15 MHz na ose x směrem doprava. U druhého není jasné zda je posunut nebo chybí. V tomto případě je topologie značně jednodušší a i vzdálenosti uzlů jsou menší. Proto byla výsledná přenosová kapacita 56,54 Mbit/s.

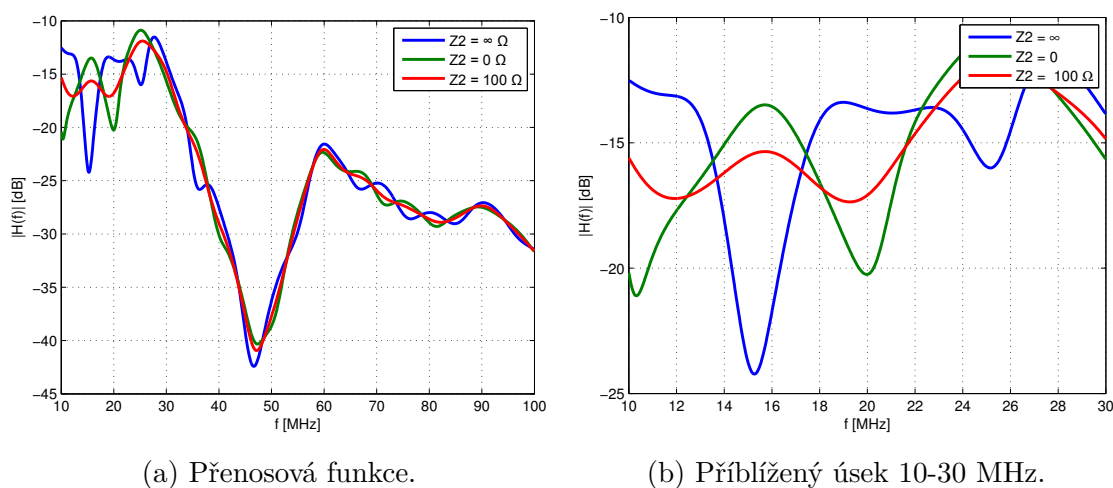
7.2 Topologie 3

Poslední topologii (obr. 7.3) autoři v dokumentu uvedli pro prezentaci zjednodušení výpočtu impedance založené na délce odbočky, viz [29]. V simulaci byl uvažován vliv delší větve se zátěží Z_2 na přenosovou funkci. Impedance Tx a Rx byla nastavena na 250Ω a zbývající podle tab. 7.3. V tomto případě se scénář zabývá vlivem impedance Z_2 v zapojení naprázdno, nakrátko a s určitou hodnotou. V zapojení nakrátko se jedná o případ, kdyby byly svorky v odbočce na přímo spojeny, tudíž by nastal

zkrat, což by teoreticky znamenalo nulový odpor. V zapojení naprázdno se pak jedná o případ, kdyby svorky byly rozpojeny, odpor by tak měl nekonečnou hodnotu.



Obr. 7.3: Náhodná topologie 3.



(a) Přenosová funkce.

(b) Přiblížený úsek 10-30 MHz.

Obr. 7.4: Vliv zátěže Z_2 na přenosovou funkci.

Z výsledků na obr. 7.4 lze vidět, že přenosové funkce jsou téměř identické. Nejvíce se změny zapojení odbočky Z_2 projevují na frekvenci zhruba od 10 MHz po 30 MHz, což je zachyceno na obr. 7.4b. Změny se projevují hlavně v posunutí a hloubce jednotlivých minim. Oproti simulaci v uvedeném dokumentu je hlavní minimum (cca. 47 MHz) posunuto přibližně o 7 MHz na ose X směrem doprava. Zátěž má také opačný efekt, v dokumentu přidání zátěže vedlo k rozvlnění přenosové funkce, kdežto v simulátoru NS-3 k vyhlazení. Přenosová kapacita linky mezi Tx a Rx je zobrazena v tab. 7.4. Bez odbočky dosahovala hodnoty 5,7 Mbit/s. Následně došlo k zapojení

odbočky naprázdno. V simulátoru není možné nastavit nekonečnou hodnotu impedance, proto byla impedance nastavena na hodnotu $10^{15} \Omega$. Přenosová kapacita v tomto případě klesla na hodnotu 3,7 Mbit/s, kolem které se při dalších změnách pohybovala.

Tab. 7.4: Přenosové kapacity ovlivněné zapojením odbočky Z_2 .

Scénář zapojení	Přenosová kapacita [Mbit/s]
Bez odbočky Z_2	5,74
$Z_2 = \infty \Omega$	3,7
$Z_2 = 0 \Omega$	3,52
$Z_2 = 100 \Omega$	3,42

7.3 Shrnutí

Hlavním problémem při srovnání simulací byl nedostatek informací. Dokument sice ukazuje přístup modelování, ale samotné simulace postrádají jakýkoliv popis nastavení parametrů. Hlavní příčinou, že se výstupy rozcházejí je tedy zejména nepřesné nastavení parametrů, počínaje samotným vedením. Další možnou příčinou může být přístup k výpočtu primárních parametrů či použité rušení a jeho úroveň. Dokument také nepopisuje v jakém prostředí jsou simulace realizovány ani možnost nahlédnout do daných kódů a blíž tak porovnat přístupy NS-3 a daného simulátoru. Toto se netýká pouze uvedeného dokumentu, ale prakticky většiny zkoumaných.

8 SIMULACE ROZSÁHLÉ TOPOLOGIE

V rámci této kapitoly bylo navrženo několik simulačních scénářů zabývajících se možností komunikace vybraných bodů v rozsáhlé topologii. Topologie vychází z reálného rozpojení elektroměrů v nejmenované vesnici (příloha B). Cílem je zejména určit, za jakých podmínek jsou jednotlivé uzly topologie schopny komunikovat. To obnáší nalezení vhodných bodů, které by posloužili jako opakovače. Na základě poznatků z předešlých kapitol je cílem získat ze simulací co nejreálnější hodnoty kapacity linky. Veškeré hodnoty přenosových kapacit linky jsou jako v předešlých případech stanoveny na základě teoretických výpočtů simulátoru. Jedná se o přenosovou kapacitu na fyzické vrstvě. Pokud dochází k nějakému dalšímu zohlednění, je metoda popsána v rámci podkapitol.

V rámci simulačních scénářů bylo vybráno několik měřících bodů. Mezi těmito body docházelo ke zkoumání vlivů na přenosovou kapacitu linky. Simulace jsou provedeny pro širokopásmovou technologii v rozsahu 1,6 – 30 MHz. Pro výpočty byla použita modulace 64PSK a byl uvažován bílý šum s hodnotou $1e-9$ mW/Hz (-90 dBm/Hz). Frekvenční pásmo bylo rozděleno do 1000 subpásem. Impedance uzlů jsou nastaveny na hodnotu 250Ω . Pokud jsou některé základní parametry měněny, je tak uvedeno v příslušné podkapitole.

8.1 Použitá kabeláž

Měřící body, na rozdíl od předešlých simulací, jsou spojeny několika různými typy kabelů. Parametry použitých hliníkových podzemních kabelů typu AYKY jsou znázorněny v tab. 8.1. Pro výpočet primárních parametrů jsou použity stejné vzorce jako pro výpočet kabelu NAYY a jsou popsány v kap. 2.2.3.

Tab. 8.1: Technická specifikace kabelu AYKY [36].

Počet žil \times jmenovitý průřez vodiče [mm^2]	4x50	3x120+70
Tvar jádra	SM	SM/+SM
Jmenovitá tloušťka izolace [mm]	1,4	1,6/1,4
Jmenovitá tloušťka pláště [mm]	2,0	2,2
Vnější průměr kabelu [mm]	31	42
Činný odpor jádra při 20 °C [Ω/km]	0,641	0,253/0,443
Proudová zatížitelnost ve vzduchu/zemi [A]	119/144	212/245
Informativní hmotnost kabelu [kg/km]	1250	2050

Dalším typem jsou nadzemní kabely typu AlFe, což jsou ocelovo-hliníkové lana

zavěšené na stožárech. Pevnost lana je dána pevností oceli a hliníku, ale elektrické vlastnosti pouze vrstvou hliníku. Lana se vyrábí v různých poměrech oceli a hliníku, přičemž číslo za obecným označením udává množství hliníku vůči množství železa. Parametry nadzemního vedení typu AlFe jsou znázorněny v tab. 8.2. Pro výpočet primárních parametrů jsou použity vzorce popsané v kap. 2.2.4.

Tab. 8.2: Technická specifikace kabelu AlFe [37].

Označení lana dle: PN-74/E-90083	AFL-6 50
Průřez lana celkem [mm^2]	56,29
Měrný elektrický odpor [$n\Omega/m$]	28,264
Jmenovitý odpor jádra při 20 °C [Ω/km]	0,6063

Dalším typem je kabel AES. Jedná se o čtyřvodičový kabel, který je tvořen čtyřmi stočenými slaněnými hliníkovými vodiči (3 fáze a 1 ochranný). Parametry kabelu jsou znázorněny v tab. 8.3. Pro výpočet primárních parametrů jsou použity vzorce popsané v kap. 2.2.1.

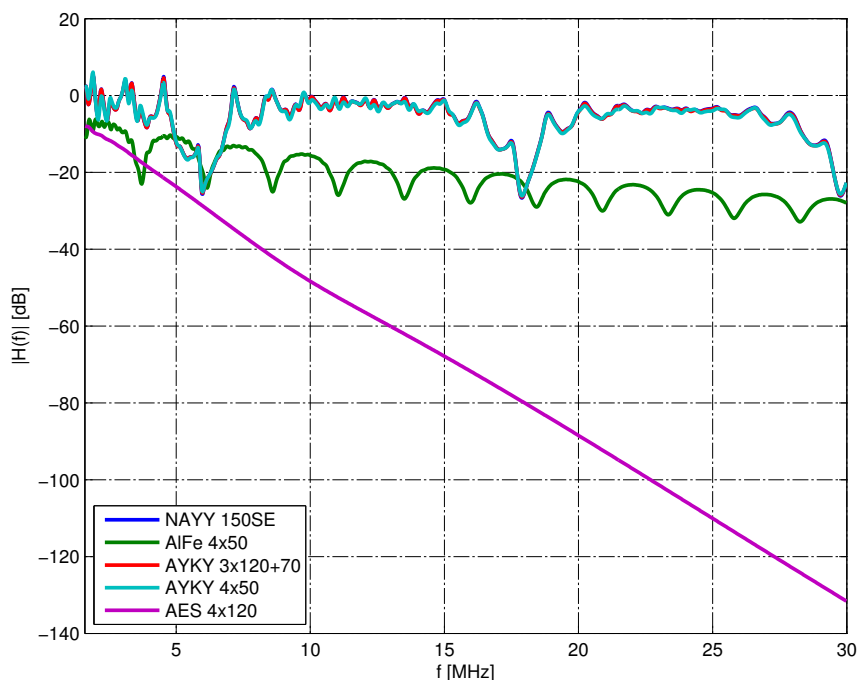
Tab. 8.3: Technická specifikace kabelu AES [38].

Počet žil \times jmenovitý průřez vodiče [mm^2]	4x120
Jmenovitá tloušťka izolace [mm]	1,8
Vnější průměr kabelu [mm]	41
Činný odpor jádra při 20 °C [Ω/km]	0,253
Proudová zatížitelnost ve vzduchu [A]	202
Informativní hmotnost kabelu [kg/km]	1700

Znalost parametrů je důležitá pro výpočet primárních a sekundárních parametrů vedení, které jsou popsány jednotlivých kapitolách.

8.2 Srovnání přenosové kapacity jednotlivých kabelů

Cílem daného scénáře je ukázat, jaký vliv na přenosovou kapacitu má použití různých typů kabelu. V topologii byl vybrán vysílací uzel $n1$ a přijímací uzel $n7$ (viz příloha B), které jsou od sebe vzdáleny 31 m. Mezi těmito body byli postupně nastaveny jednotlivé typy kabelů. Body byly vybrány z důvodu, aby výsledky nebyly příliš ovlivněny odbočkami a vzdáleností. Přenosové kapacity jednotlivých kabelů jsou znázorněny v tab. 8.4 a přenosové funkce na obr. 8.1. Je zřejmé, že venkovní



Obr. 8.1: Přenosová funkce jednotlivých kabelů na úseku mezi uzly n1 a n7.

závěsné kabely typu AlFe a AES mají mnohonásobně nižší přenosovou kapacitu než podzemní typu AYKY a NAYY. Kabely typu AlFe jsou nejstarším typem venkovního vedení, kdy izolaci tvoří pouze vzduch a jsou neméně vhodné pro přenos signálu s frekvencí vyšší jak 50 Hz. Kabely typu AES jsou nástupcem AlFe, a v daném frekvenčním pásmu mají ještě větší útlum. Z vybraných typů kabelů jsou tak pro přenos PLC nejvíce vhodné kabely typu NAYY a AYKY, jejichž přenosová kapacita dosahuje podobných hodnot.

Tab. 8.4: Přenosové kapacity jednotlivých kabelů.

Typ kabelu	Přenosová kapacita [Mbit/s]
NAYY 150 SE	47,94
AlFe 4×50	6,30
AYKY 3×120	47,45
AYKY 4×50	46,83
AES 4×120	1,63

Kabel NAYY 150SE byl porovnán s publikací [2] v rámci kapitoly 6.3. V této kapitole je uveden i obrázek přímo z publikace, který dokazuje podobnost výsledků. Další publikací, která se zabývá stejným kabelem a používá stejné výpočty jako použili autoři frameworku v NS-3 je [20]. V této publikaci autoři zkoumají úzkopásmovou technologii a ke konkrétnímu porovnání v rámci této diplomové práce

nedošlo, avšak přenosové funkce opět vykazují jistou podobnost. Pro kabel AYKY s obdobnými vlastnostmi jsou v simulátoru použity stejné vzorce pro výpočet primárních parametrů a vlastnosti kabelu se jen mírně liší, čemuž odpovídá i přenosová funkce, která se liší jen minimálně.

Nadzemnímu vedení se taktéž věnuje několik publikací [4], [3]. Podle [4] disponuje nadzemní vedení vyššími hodnotami rušení na pozadí. Dále pak, že u podzemního vedení je možné použít větší vysílací výkon a to zejména z toho důvodu, že kabely jsou stíněné a pod zemí, tudíž nedochází k velkým únikům do okolí. U nadzemního vedení se také výrazně více projevuje efekt vícecestného šíření. Podle simulací [12] má nízká impedance odboček a počet odboček zásadní vliv na maximální dosažitelnou komunikační vzdálenost, přičemž je na tom výrazně lépe podzemní vedení. Jak dosah v řádu stovek metrů, tak nižší hodnoty útlumu, což je možné potvrdit i na základě měření publikovaných v [23]. To i odpovídá provedeným simulacím v NS- 3, kdy se u nadzemního vedení s rostoucí vzdáleností přenosové vlastnosti výrazně zhoršují. Konkrétním srovnáním pro kabel AlFe a AES však žádná z hledaných publikací nezabývala, výše zmíněné se zabývají pouze „obecně“ známými kabely a nadzemním vedením.

8.3 Přenosová kapacita mezi body n1 a n32

V rámci tohoto simulačního scénáře bylo cílem změřit přenosovou kapacitu mezi měřícími uzly $n1$ a $n32$, které se od sebe nachází ve vzdálenosti 835 m. V prvním kroku byl proveden pokus o komunikaci mezi těmito body přímo. Výsledná přenosová funkce je zobrazena na obr. 8.2. Z grafu je zřejmé, že trasa vykazuje velké hodnoty útlumu a komunikace na přímo tak není možná. Proto bylo dalším krokem rozdělit celou trasu do několika úseků, na těchto úsecích změřit přenosovou kapacitu a stanovit vhodnou polohu opakováčů tak, aby tyto dva uzly byly schopny komunikovat. Minimální přenosová kapacita, rozhodující o tom, zda je daný úsek vyhovující, byla stanovena na hodnotu 1 Mbit/s na fyzické vrstvě. V některých simulacích je také provedena optimalizace rozmístění opakováčů pro zajištění větší přenosové kapacity.

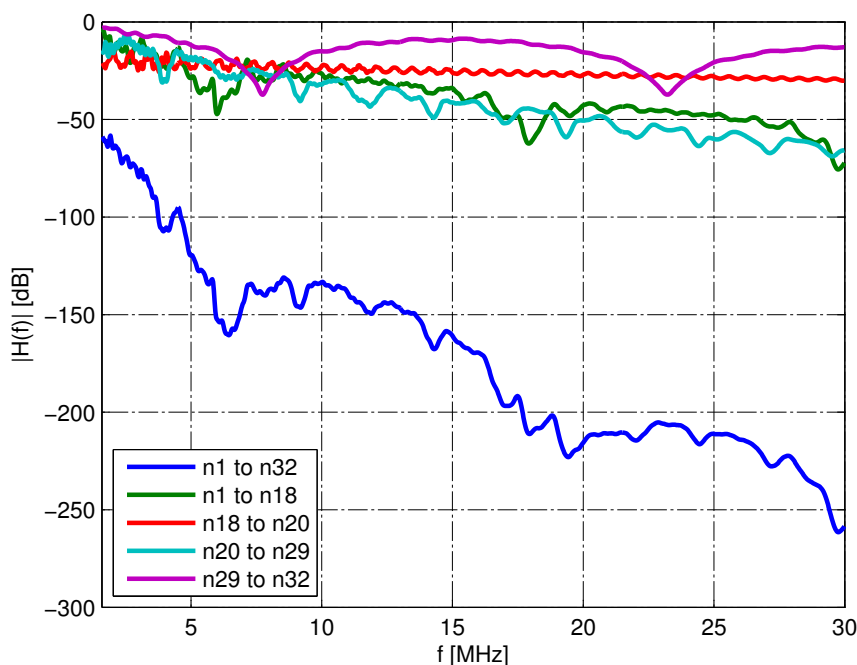
Postup pro nalezení opakováčů:

1. Postupně procházet jednotlivé body topologie, dokud přenosová kapacita mezi $n1$ a nX neklesne pod 1 Mbit/s.
2. Poslední bod, který byl nad hranicí 1 Mbit/s bude opakováč a zároveň se stane novým vysílacím uzlem.
3. Opakování předešlých dvou kroků, ale vysílač není $n1$, nýbrž nX .
4. Optimalizace – nalezení ideálního počtu opakováčů a maximální rychlosti.

Výše popsaným postupem došlo k rozdělení úseku celkem na čtyři části. Výsledné dílčí úseky jsou $n1-n18$, $n18-n20$, $n20-n29$ a $n29-n32$. Přenosové kapacity jednotlivých úseků jsou znázorněny v tab. 8.5, přenosové funkce pak na obr. 8.2.

Tab. 8.5: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32.

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n18	1,67
n18-n20	1,46
n20-n29	1,69
n29-n32	16,49



Obr. 8.2: Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1 - n32.

Z daných výsledků tedy vyplývá, že aby mohly uzly komunikovat, je na trase zapotřebí celkem tří opakovaců. Poloha opakovaců je v bodech $n18$, $n20$ a $n29$. Nejužší místo, tj. místo s nejnižší přenosovou kapacitou, i přes relativně krátkou délku, je na úseku mezi body $n18$ a $n20$. Na základě poznatků z předešlé kapitoly je nutno brát v úvahu, že se na trase vyskytují různé typy kabelů, které jsou v základním nastavení popsány v příloze B. Pro představu, na úseku mezi body $n1-n17$, které jsou všechny propojeny kabelem NAYY150 SE, dosahuje přenosová kapacita hodnoty 26,9 Mbit/s, přičemž o uzel dále, tedy $n18$, který je s bodem $n17$ propojen závěsným lanem AlFe4x50, dochází k propadu přenosové kapacity na hodnotu

1,68 Mbit/s. Stejným kabelem je propojena část zmiňovaného úseku, konkrétně body $n18$ a $n19$. Avšak vliv nemá pouze typ kabelu, v daném místě je připojena větev s velkým počtem odboček, jejichž vlivy se zabývá kapitola 6.3 a 6.4. Obdobně je na tom i úsek $n20$ - $n29$, kde úsek $n20$ - $n27$ dosahuje přenosové kapacity 15,48 Mbit/s, ale o dva uzly dál je již kapacita, kvůli použitému kabelu, degradována na 1,69 Mbit/s.

Celková teoretická kapacita dané trasy na fyzické vrstvě, při dané konfiguraci (rušení na pozadí $1e-9$ mW/Hz, modulace 64 PSK) a rozpoložení opakováčů, je v tomto případě dána úsekem s nejnižší přenosovou kapacitou, tedy $n18$ - $n20$, a je rovna 1,46 Mbit/s.

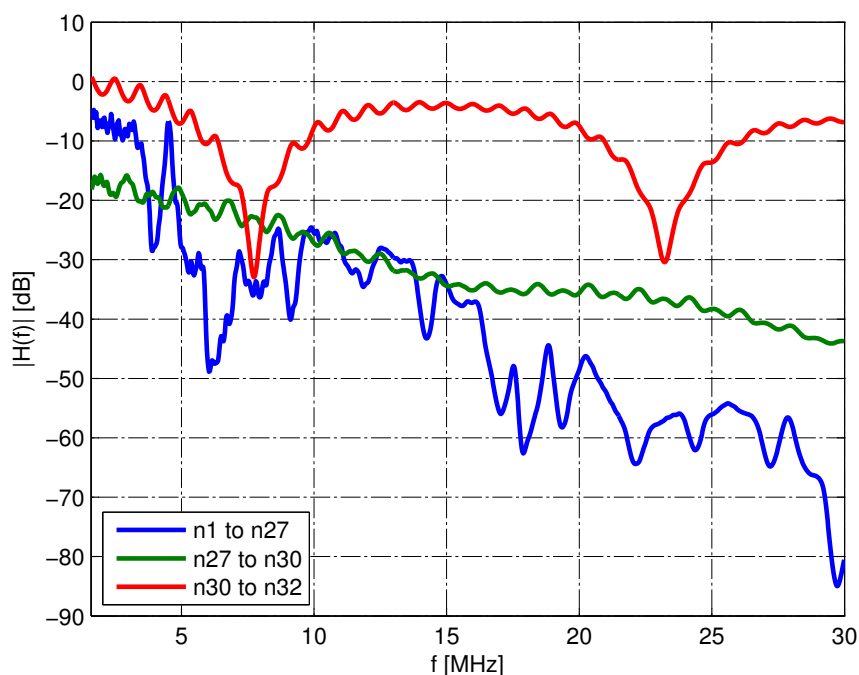
8.3.1 Záměna kabelu na úseku $n17$ - $n20$

Jak již bylo zmíněno výše, přenosová kapacita je silně ovlivněna použitým kabelem. Proto bylo dalším krokem vyzkoušet zaměnit závěsné lano AlFe4x50, na úseku $n17$ - $n20$ za podzemní kabel s mnohem vyšší přenosovou kapacitou NAYY150 SE. Touto teoretickou simulací se záměnou by došlo k zrušení dvou nutných opakováčů v uzlech $n18$ a $n20$. Výsledky přenosových kapacit jsou znázorněny v tab. 8.6 a přenosové funkce na obr. 8.3. Dle výpočtů ze simulátoru by kapacita mezi $n1$ - $n20$ byla 5,62 Mbit/s a body by byly schopny komunikovat až po uzel $n27$, přičemž kapacita na tomto úseku byla 3,11 Mbit/s. Je však otázkou, či by toto v reálných podmínkách, na tak velkou vzdálenost bylo možné. Původní opakováč v uzlu $n29$ by se posunul do uzlu $n30$ a přenosová kapacita mezi body $n27$ a $n30$ byla 1,12 Mbit/s. Zbývající úsek tvořící pouze tři uzly ($n30$ - $n32$) by pak disponoval přenosovou kapacitou 36,34 Mbit/s.

Tab. 8.6: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly $n1$ a $n32$ (záměna kabelu na úseku $n18$ - $n20$).

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
$n1$ - $n27$	3,11
$n27$ - $n30$	1,12
$n30$ - $n32$	36,34

Oproti předchozímu scénáři jsou tak výsledkem pouze dva opakováče a to v bodech $n27$ a $n30$. Nejužším místem je úsek $n27$ - $n30$, který disponuje přenosovou kapacitou 1,12 Mbit/s. To znamená, že při komunikaci mezi body $n1$ a $n32$ by toto úzké místo redukovalo celkovou přenosovou kapacitu na uvedenou hodnotu. Cílem bylo nalézt minimální počet opakováčů na dané trase.



Obr. 8.3: Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (záměna kabelu na úseku n17-n20)

Z výsledků je zřejmé, že přenosové kapacity linky se pohybují v extrémech, kdy v tomto konkrétním případě má poslední úsek $n30-n32$ přenosovou kapacitu 36,34 Mbit/s, kdežto předešlý úsek $n27-n30$ disponuje přenosovou kapacitou 1,12 Mbit/s. Z tohoto hlediska se naskytuje možnost optimalizace dané trasy pro lepší rozmístění opakovačů. V rámci tohoto scénáře došlo pouze k posunutí opakovače z uzlu $n30$ do uzlu $n29$. Výsledné přenosové kapacity jsou znázorněny v tab. 8.14.

Tab. 8.7: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (záměna kabelu na úseku n18-n20) po optimalizaci.

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n27	3,11
n27-n29	3,19
n29-n32	16,49

Celkově by došlo ke zvýšení přenosové kapacity na celé trasy z hodnoty 1,12 Mbit/s na 3,19 Mbit/s.

8.3.2 Změna limitní přenosové kapacity úseku na 5 Mbit/s

Postup nalezení opakovací je v rámci tohoto scénáře obdobný, avšak limitní přenosová kapacita jednotlivých úseků je stanovena z hodnoty 1 Mbit/s na hodnotu 5 Mbit/s. Základní konfigurace je nepozměněna, tedy rušení na pozadí má hodnotu $1e-9$ mW/Hz a použitá modulace je 64PSK. Výsledky přenosových funkcí jsou zobrazeny na obr. 8.4, přenosové kapacity pak v tab. 8.8. Při daném limitu 5 Mbit/s nebylo v tomto scénáři možné překonat úsek *n17-n18*. Na tomto úseku bylo totiž použito lano AlFe4x50, jehož přenosová funkce je zobrazena na obr. 8.1. S tímto lanem bylo na daném úseku možné dosáhnout přenosové kapacity pouze 2,72 Mbit/s. Proto bylo tedy lano na celém úseku *n17-n20* zaměněno za podzemní kabel NAYY150 SE, který byl taktéž použit v kapitole 8.3.1.

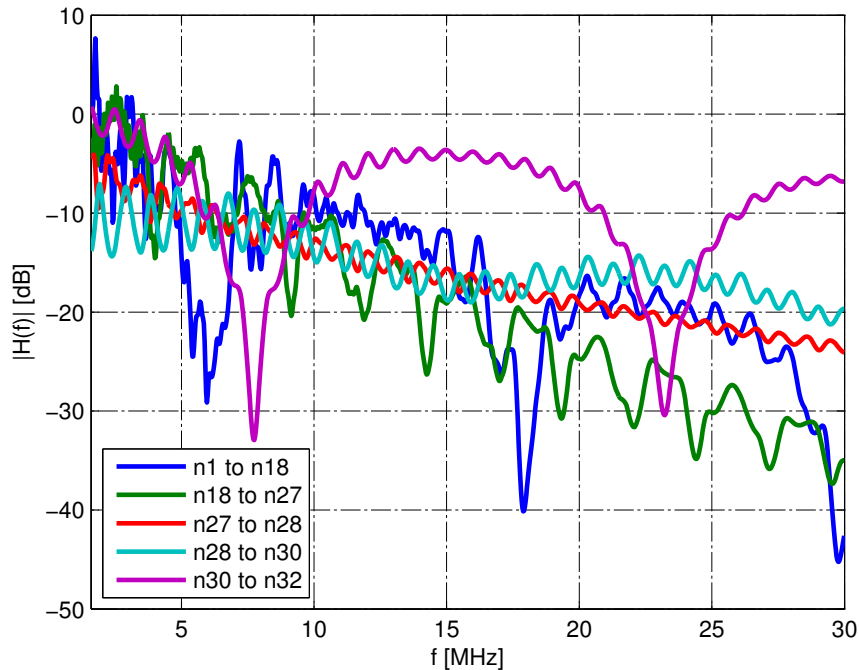
Tab. 8.8: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 5 Mbit/s).

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n18	15,4
n18-n27	14,5
n27-n28	12,2
n28-n30	12,97
n30-n32	36,34

Výsledkem simulace je rozdělení trasy celkem na pět úseků, které jsou sepsány v tab. 8.8, což vede k zavedení opakovací celkem ve čtyřech uzlech. Jedná se o uzly *n18*, *n27*, *n28* a *n30*. Celkově zvednutí limitní přenosové kapacity daných úseků vedlo k celkovému zvýšení přenosové kapacity, avšak musel by být dvojnásobně navýšen i počet opakovací. Úsek s nejnižší přenosovou kapacitou je *n27-n28*, ta je rovna 12,2 Mbit/s.

8.3.3 Změna hodnoty bílého šumu na pozadí z $1e-9$ mW/Hz na $1e-12$ mW/Hz

Typické hodnoty šumu a jeho vliv na přenosovou kapacitu byly zkoumány v kap. 6.2.6. Můžeme konstatovat, že při uvažování různých lokalit se hodnota rušení na pozadí může značně lišit, což má také značný vliv na přenosovou kapacitu. Proto byl tento scénář zahrnut do simulací v rozsáhlé topologii. Opět je použita stejná metodika jako v předešlých scénářích.



Obr. 8.4: Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (limit 5 Mbit/s).

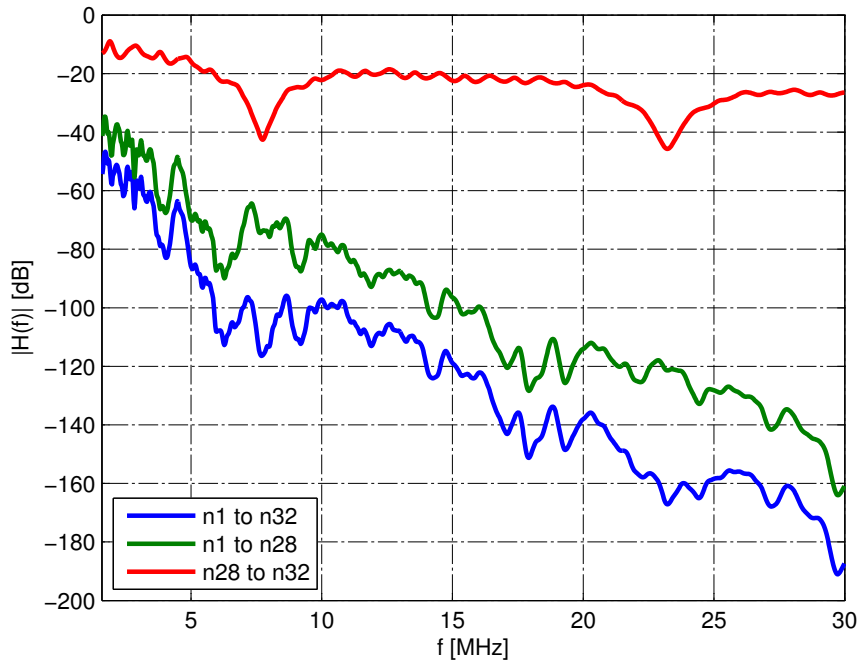
Výsledky pro limitní přenosovou kapacitu 1 Mbit/s

Z výsledků, které jsou zobrazeny v tab. 8.9 a na obr. 8.5 lze vidět, že došlo k rozdělení dané trasy pouze na dva úseky, přičemž jediný opakovač by se nacházel až v bodě $n28$. Přenosová kapacita celého úseky by pak dosahovala hodnoty 1,17 Mbit/s.

Tab. 8.9: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 1 Mbit/s, šum $1e-12$ mW/Hz).

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n28	1,17
n28-n32	100,06

Zde lze vidět extrém způsobený stanoveným limitem úseku 1 Mbit/s. Zatím co úsek $n28-n32$ disponuje přenosovou kapacitou 100,06 Mbit/s, komunikace mezi uzly $n1$ a $n32$ je omezena úzkým místem mezi uzly $n1-n28$, který má přenosovou kapacitu pouze 1,17 Mbit/s. Při zachování stejného počtu opakovačů, tj. jeden, by se na trase dalo dosáhnout přenosové kapacity 15,13 Mbit/s a to rozdělením trasy na úseky podle tab. 8.10.



Obr. 8.5: Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (limit 1 Mbit/s, šum $1e-12$ mW/Hz).

Tab. 8.10: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 1 Mbit/s, šum $1e-12$ mW/Hz) po optimalizaci.

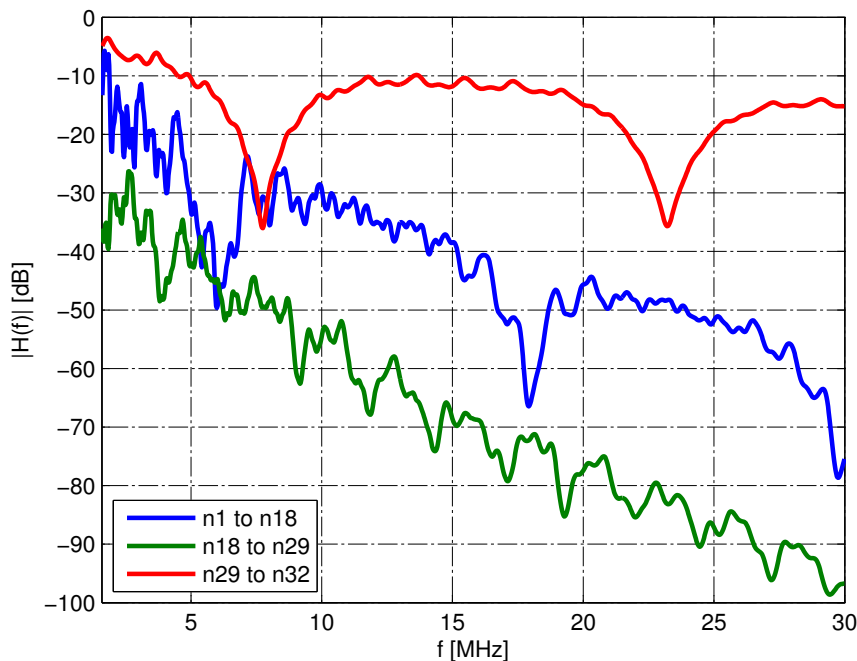
Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n18	35,76
n18-n32	15,13

Výsledky pro limitní přenosovou kapacitu 5 Mbit/s

Z výsledků, které jsou zobrazeny v tab. 8.11 a na obr. 8.6 lze vidět, že došlo k rozdělení dané trasy pouze na tři úseky, přičemž opakovače by se nacházely v bodech *n18* a *n29*. Přenosová kapacita celého úseku by pak dosahovala hodnoty 6,4 Mbit/s.

Tab. 8.11: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n32 (limit 5 Mbit/s, šum 1e-12 mW/Hz).

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n18	35,76
n18-29	6,4
n29-n32	118



Obr. 8.6: Přenosové funkce jednotlivých úseků na trase n1-n32 (limit 5 Mbit/s, šum 1e-12 mW/Hz).

8.3.4 Shrnutí

V rámci této kapitoly bylo provedeno několik scénářů zabývajících se nalezením nezbytného minimálního počtu opakovačů pro komunikaci mezi uzly $n1$ a $n32$. Bylo zde odsimulováno několik konfigurací simulací, přičemž první se zabývala nalezením opakovačů pro limitní přenosovou kapacitu 1 Mbit/se. Bylo zjištěno, že pro zajištění komunikace mezi těmito body je na trase nutno použít alespoň tři opakovače, a to v bodech $n18$, $n20$ a $n29$. Kapacita takto rozdělené trasy by dosahovala hodnoty 1,46 Mbit/s. Při výměně závěsného lana AlFe4x50, na úseku $n17$ - $n20$, za podzemní vedení typu NAYY150 SE by pak byly zapotřebí pouze dva opakovače a to v bodech $n27$ a $n30$. Přenosová kapacita trasy by pak byla 1,12 Mbit/s. V další konfiguraci simulace byl limit navýšen na hodnotu 5 Mbit/s. V tomto případě by na trase bylo zapotřebí celkem čtyř opakovačů, a to v bodech $n18$, $n27$, $n28$ a $n30$. Výsledná

přenosová kapacita trasy by dosahovala hodnoty 12,2 Mbit/s. V dalších dvou konfiguracích došlo k simulování obou předešlých scénářů, ale došlo ke změně PSD šumu z $1e-9$ mW/Hz (-90 dBm/Hz) na hodnotu $1e-12$ mW/Hz (-120 dBm/Hz). Při limitu 1 Mbit/s by bylo zapotřebí pouze jeden opakováč v uzlu $n28$ a přenosová kapacita by byla 1,17 Mbit/s. Při limitu 5 Mbit/Hz by bylo zapotřebí dvou opakováčů, které by se nacházely v uzlech $n18$ a $n29$ a přenosová kapacita by dosahovala hodnoty 6,4 Mbit/s. Srovnání přenosových kapacit úseků, při uvažování stejného typu kabelu NAYY150se, na úseku $n17-n20$, pro různé hodnoty PSD šumu a limit 1 Mbit/s jsou zobrazeny v tab. 8.12. Pro limit 5 Mbit/s pak v tab. 8.13.

Tab. 8.12: Srovnání přenosových kapacit jednotlivých úseků při různé PSD šumu, pro limit 1 Mbit/s.

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]	PSD šumu [mW/Hz]
n1-n27	3,11	$1e-9$
n27-n30	1,12	$1e-9$
n30-n32	36,34	$1e-9$
n1-n28	1,17	$1e-12$
n28-n32	100,06	$1e-12$

Tab. 8.13: Srovnání přenosových kapacit jednotlivých úseků při různé PSD šumu, pro limit 5 Mbit/Hz.

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]	PSD šumu [mW/Hz]
n1-n18	15,4	$1e-9$
n18-n27	14,5	$1e-9$
n27-n28	12,2	$1e-9$
n29-n30	12,97	$1e-9$
n30-n32	36,34	$1e-9$
n1-n18	35,76	$1e-12$
n18-29	6,4	$1e-12$
n29-n32	118	$1e-12$

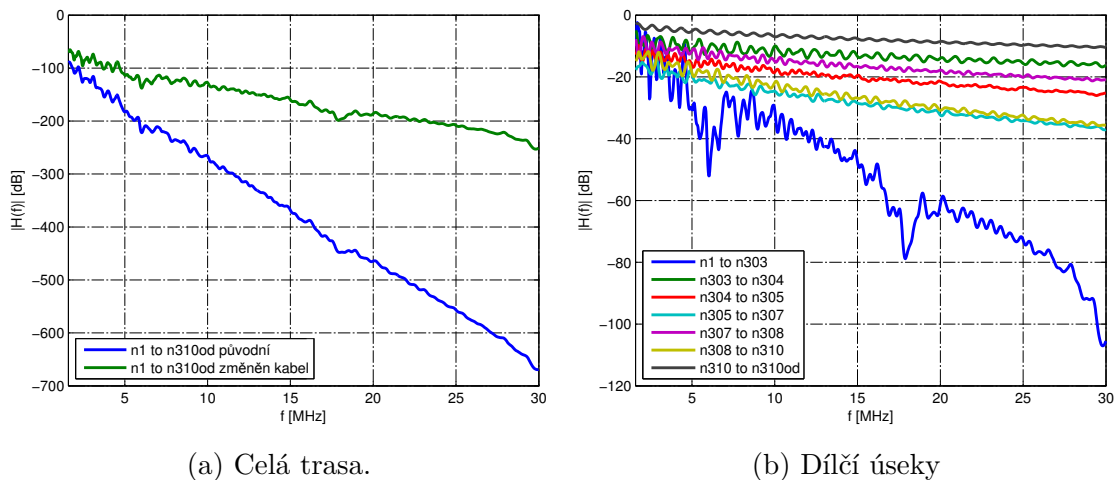
Jak již bylo zmíněno, cílem bylo zajistit komunikaci s co nejmenším počtem opakováčů. Proto se ve výsledcích nacházejí dané extrémy, kdy přenosová kapacita jednoho úseku dosahuje např. 1,17 Mbit/s a dalšího 100,06 Mbit/s. Došlo zde také

k pokusu o optimalizaci sítě z hlediska rozmístění opakovačů tak, aby se přenosová kapacita pokud možno rovnoměrně rozložila mezi jednotlivé úseky. Přenosová kapacita tak není omezena extrémně dlouhými úseky a je možné dosáhnout vyšších přenosových kapacit celkové trasy. Optimalizací se také zabývá následující kapitola, která zkoumá úsek *n1-n310od*.

8.4 Přenosová kapacita mezi uzly n1 a n310od

Podobně jako v předešlé kapitole, při stejné konfiguraci, byla v rámci této kapitoly prozkoumána možnost komunikace mezi uzly $n1$ a $n310od$ viz B. I když se uzly nacházejí blíže než v předešlém případě (konkrétně 600 m), velký rozdíl je, že se na tomto úseku nachází značné množství odboček různých délek, s různým počtem uzlů a malou impedancí, což značně ovlivňuje přenosovou funkci, čili i přenosovou kapacitu linky.

Při prvním pokusu byl na úseku $n300-n301$ nastaven kabel typu AES 4x120. Ten však, jak je uvedeno v kapitole 8.2, disponuje velkými hodnotami útlumu. I když byl bod $n300$ ve funkci opakováče, dle simulace by nebylo možné překonat vzdálenost 90 m k bodu $n301$ s limitní přenosovou kapacitou 1 Mbit/s. Výsledná přenosová kapacita byla totiž 0,43 Mbit/s. Z toho vyplývá, že v tomto scénáři, za daných podmínek, by mezi sebou body $n1$ a $n310od$ nemohly komunikovat. Proto byl původní kabel na daném úseku vyměněn za podzemní kabel typu AYKY 3x120+70. To samé bylo provedeno s úsekem $n301-n302$. Porovnání, jak přenosová funkce vypadala před změnou a po ní lze vidět na obr. 8.7a. Je vidět, že záměnou kabelu došlo k obrovskému snížení útlumu, což umožnilo komunikaci mezi uzly.



Obr. 8.7: Přenosové funkce na trase mezi uzly n1 a n310od.

Na základě postupu uvedeném v předešlé kapitole došlo k rozdělení trasy na sedm dílčích úseků. Konkrétně se jedná o úseky $n1-n303$, $n303-n304$, $n304-n305$, $n305-n307$, $n307-n308$, $n308-n310$ a $n310-n310od$. Přenosové kapacity jednotlivých úseků jsou zobrazeny v tab. 8.14 a přenosové funkce pak na obr. 8.7b.

Aby byla komunikace mezi uzly možná, bylo by v síti zapotřebí celkem šest opakovaců. Konkrétní umístění opakovaců by bylo v bodech *n303*, *n304*, *n305*, *n307*, *n308* a *n310*. I přesto, že se vysílací a přijímací uzly nachází blíže sebe, než v předšlém případě, dané odbočky mají na přenosovou kapacitu velký vliv, proto je zapotřebí opakovaců téměř na každé odbočce.

Výsledná přenosová kapacita je opět určena nejužším úsekem na dané trase. Jedná se o úsek *n305-n307*, který disponuje přenosovou kapacitou 1,34 Mbit/s. I přesto, že dílčí úseky můžou mít relativně větší přenosové kapacity, jsou ovlivněny úzkými úseky.

Tab. 8.14: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly *n1* a *n310od*.

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n303	1,81
n303-n304	17,05
n304-n305	5,07
n305-n307	1,34
n307-n308	9,7
n308-n310	2,29
n310-n310od	37,56

8.4.1 Nalezení optimálního umístění a počtu opakovaců

V rámci této kapitoly došlo k pokusu o nalezení ideálního rozmístění opakovaců pro navýšení přenosové kapacity mezi uzly *n1* a *n310od*. Výsledky simulací jsou zobrazeny v tab. 8.15. Celkem došlo k rozdělení trasy až na jedenáct úseků, a tedy by bylo zapotřebí opakovaců na desíti různých místech. Největším problémem je úsek mezi uzly *n303* až *n310od*. Celý tento úsek je totiž realizován pomocí nadzemního vedení typu AlFe4x50, které, jak již bylo zmíněno, nemá tak dobré přenosové vlastnosti a disponuje větším útlumem. Tento úsek je vysoce ovlivňován jednotlivými odbočkami s nízkými impedancemi a optimálně by musel být opakováč umístěn u každé odbočky. Tedy v uzlech *n303-n309* a dále pak v uzlech *n9* a *n303*. I přesto by však přenosová kapacita dosahovala pouze hodnoty 5,07 Mbit/s, která je na úseku *n304-n305*. Avšak uzly před tímto úsekem by měly značně větší kapacitu linky. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.15. Nutno podotknout, že toto je ovlivněno i relativně velkou úrovní šumu 1e-9 mW/Hz (-90 dBm/Hz).

Nutno také podotknout, že zvýšení počtu opakovaců nemusí vézt ke zvýšení přenosové kapacity, ba dokonce naopak. Reálně totiž opakováč zanáší do celého procesu

zpoždění vlivem zpracování a opakování signálu, které se obecně v reálném prostředí uvažuje mezi 30-50 %.

Tab. 8.15: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n310od po optimalizaci rozmístění opakovačů (šum $1e-9$ mW/Hz).

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n9	27,7
n9-n301	34,93
n301-n303	49,3
n303-n304	17,48
n304-n305	5,07
n305-n306	23,14
n306-n307	8,7
n307-n308	9,7
n308-n309	12,17
n309-n310	23,19
n310-n310od	37,54

8.4.2 Optimální rozmístění opakovačů v případě úrovně šumu na pozadí $1e-12$ mW/Hz

Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, problémem při komunikaci mezi uzly byla, mimo jiné, vysoká hodnota PSD šumu. Proto byla úroveň šumu v rámci této kapitoly změněna na hodnotu $1e-12$ mW/Hz (-120 dBm/Hz). Výsledkem je značné zredukování počtu opakovačů a zvýšení přenosové kapacity linky. Výsledky jsou znázorněny v tab. 8.16.

Tab. 8.16: Přenosové kapacity jednotlivých úseků trasy mezi uzly n1 a n310od po optimalizaci rozmístění opakovačů (šum $1e-12$ mW/Hz).

Jednotlivé úseky trasy	Přenosová kapacita úseků [Mbit/s]
n1-n303	156,15
n303-n305	59,62
n305-n307	82,04
n307-n309	67,03
n309-n310od	152,55

Při této úrovni šumu došlo k rozdělení trasy pouze na pět úseků, přičemž by bylo zapotřebí celkem čtyř opakovačů v uzlech $n303$, $n305$, $n307$ a $n309$. Nejhorším úsekem je oblast mezi uzly **n305-n307**, která dosahuje přenosové kapacity 59,62 Mbit/s.

8.5 Shrnutí

V rámci této kapitoly byla prozkoumána možnost komunikace mezi uzly $n1-n32$ a $n1-n310od$, přičemž byl kladen důraz zejména na přenosovou kapacitu linky. Jelikož ve frameworku simulátoru NS-3 není implementován opakovač, byly simulace prováděny metodou rozdělení celkové trasy na úseky a na těchto úsecích byla pomocí simulátoru vypočtena přenosová kapacita linky. Výsledná přenosová kapacita mezi danými uzly pak byla dána úsekem s nejnižší kapacitou. Jednotlivé trasy se liší zejména v počtu odboček, přičemž trasa $n1-n32$ je silně ovlivněna připojenou větví s mnoha odbočkami v uzlu $n19$. Trasa $n1-n310od$ je pak ovlivněna jednotlivými odbočkami v dané větví. Na trase $n1-310od$ byl pak proveden i jistý pokus o optimalizaci komunikace mezi uzly tak, aby se přenosové kapacity jednotlivých úseků nelišily extrémně, ale aby se přenosová kapacita rozložila rovnoměrně. To se i povedlo při hodnotě šumu $1e-12$ mW/Hz, kdy bylo dosaženo celkové přenosové kapacity 59,62 Mbit/s, avšak bez uvažování zpoždění vznikajících v jednotlivých opakovačích, které se běžně uvažuje mezi 30-50 %.

9 ZÁVĚR

Diplomová práce analyzuje datovou komunikaci po silnoproudém vedení se zaměřením na zkoumání vlivů různých parametrů na přenosovou funkci a přenosovou kapacitu PLC kanálu. Cílem bylo zejména analyzovat dostupný PLC framework pro NS-3 a zjistit možnosti přístupů k výpočtům přenosové kapacity kanálu. S využitím dostupných funkcí frameworku pak realizovat scénáře simulací různých topologií. Dalším stěžejním bodem celé práce bylo prozkoumat možnost komunikace určitých uzlů v rámci rozsáhlé topologie. V rámci těchto simulací bylo cílem najít pozici a počet opakovaců pro zajištění komunikace mezi těmito uzly, při určitých limitech přenosové kapacity.

V kapitole 4 je nastíněn přístup výpočtu teoretické kapacity, který používá i samotný simulátor. Dále jsou zde uvedeny některé vlivy na přenosovou kapacitu jako režie dat či typ použité modulace.

V kapitole 6 a 7 jsou realizovány samotné simulace pro širokopásmovou PLC technologii. Scénáře simulací vychází z referenčních dokumentů a to z důvodu relevance výsledků a ověření přístupu samotného simulátoru. Na jednoduchých topologiích v kapitole 6 byly zkoumány vlivy jako měnící se vzdálenost mezi vysílacím a přijímacím PLC modemem pro různé kabely, vliv impedance, délky odbočky a počtu odboček na přenosovou funkci a teoretickou přenosovou kapacitu. Byl zde zkoumán i typ použité modulace a zohlednění režijních dat na kapacitu linky. Dále pak vliv různých typů rušení. Reálné topologie jsou mnohem komplexnější, avšak vliv zkoumaných parametrů by nebyl tak zřetelný. Proto jsou do simulací zahrnuty tyto jednoduché topologie. V tomto případě jednotlivé simulace vypovídají přesně o tom, co se při změnách jednotlivých parametrů děje. Z výsledků bylo zjištěno, že délka odbočky má vliv na zhuštění minim a maxim v přenosové funkci, impedance má vliv na hloubku minim a pozice odbočky má vliv na zvlnění. Se zvyšující se vzdáleností a frekvencí dochází ke zvyšování útlumu přenosové funkce a tím i ke snižování kapacity. Konkrétní výstupy jsou popsány v jednotlivých kapitolách.

V rámci kapitoly 8 bylo provedeno několik simulačních scénářů zkoumajících možnost komunikace mezi stanovenými uzly. Cílem bylo najít umístění opakovaců pro zajištění komunikace mezi danými uzly a to při různých limitních hodnotách přenosové kapacity a různých úrovních šumu na pozadí. Jelikož framework v NS-3 neobsahuje opakováč, byly simulace provedeny metodou rozdělení celé trasy na jednotlivé úseky a měření přenosových kapacit těchto úseků. Celková přenosová kapacita pak byla dána úsekem s nejnižší hodnotou přenosové kapacity. Došlo zde také k pokusu o optimalizaci umístění jednotlivých opakovaců z důvodu rovnoměrného rozložení přenosové kapacity mezi jednotlivé úseky. Nutno zmínit, že zde nebylo uvažováno zpoždění vznikající v opakováči, které se reálně pohybuje mezi 30-50 %.

Pokud to bylo možné, jsou výsledky vztaženy a porovnány s jinými publikacemi, které daný problém řeší buď formou simulací, nebo reálných měřeními.

Simulátor je ojedinělý zejména otevřeným kódem. Je možné zjistit přístupy k různým výpočtům, které lze následně doplňovat či měnit. Lze také využít modulů knihovny NS-3 a provádět tak komplexnější simulace i s různými technologiemi a protokoly. Simulátor byl taktéž srovnán v rámci jiných prací a celkově se jeví jako nástroj s velkým potenciálem.

LITERATURA

- [1] AALAMIFAR, F., SCHLOEGL, A., HRRIS, D., LAMPE, L. *Modelling Power Line Communications Using Network Simulator-3*. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Atlanta, GA, USA, December 2013. [online]. 2013. Dostupné z URL: <http://www.ece.ubc.ca/~faribaa/ns3_plc_software.htm>.
- [2] ANATORY, J., THEETHAYI, N., THOTTAPPILLIL, R., KISSAKA, M., MVUNGI, N. H. *The Influence of Load Impedance, Line Length, and Branches on Underground Cable Power-Line Communications (PLC) Systems*. Proceedings of the IEEE, vol. 23, no.1, pp. 180-187, 2008.
- [3] AMIRSHAHI, P., KAVEHRAD, M. *Medium voltage overhead power-line broadband communications; transmission capacity and electromagnetic interference*. Proceedings of the IEEE Symp. Power Line Communications and Its Applications, 2005.
- [4] ATHANASIOS G. LAZAROPOULOS, PANAYIOTIS G. COTTIS *Broadband Transmission via Underground Medium-Voltage Power Lines—Part II: Capacity*. Proceedings of the IEEE, vol. 25, no.4, 2008.
- [5] BIGLIERI, E. *Power line channel characteristics and their effect on communication system design*. IEEE Communications Magazine, vol. 42, issue 4, pp. 78-86, Apr. 2004.
- [6] BIGLIERI, E. *Coding and modulation for a horrible channel*. IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 5, pp. 92-98, May 2003.
- [7] COVER, T. M. a Joy A. THOMAS. *Elements of information theory*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006.
- [8] ČÍŽ, R. *Principy modulací a přenosu sdělovacích signálů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [9] DAI, H., POOR, H. V. *Advanced signal processing for power line communications*. Communications Magazine, vol. 41, No. 5, pp. 100-107, May 2003.
- [10] ER LIE, YANGPO GAO, SAMDANI, G. *Broadband characterization of indoor powerline channel and its capacity consideration*. Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference, pp. 16-20, May 2005.

- [11] ESMAILIAN T., KSCHISCHANG F., GULAK P. *In-building power lines as high-speed communication channels: Channel characterization and a testchannel ensemble* International Journal of Communication Systems, vol. 16, pp. 381–400, 2003.
- [12] FRANEK, L. *Vícevodičový model komunikace po venkovním elektrickém vedení: dizertační práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2016. 193 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
- [13] GALLI, S., SCAGLIONE, A., WANG, Z. *For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid*. Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 998-1027, 2011.
- [14] HELD, G. *Understanding Broadband over Power Line*. Auerbach Publications, New York, 2001.
- [15] HORÁK, M. *Modelování PLC komunikace s využitím Network Simulator-3*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Mlýnek, Ph.D..
- [16] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LENHERT, R. *Broadband powerline communications: network design*. Chichester: Wiley, c2004th. ISBN 0-470-85741-2.
- [17] JAE-JO LEE, SEUNG-JI CHOI, HUY-MYOUNG OH, WON-TAE LEE, KWAN-HO KIM, DAE-YOUNG LEE. *Measurements of the Communications Environment in Medium Voltage Power Distribution Lines for Wide-band Power Line Communications*. Proc. of 2004 Int'l Symposium on Power-line Communications and its Applications, pp.69 – 74, 2004.
- [18] KOLÁŘ, J. *Simulátor přenosových funkcí silnoproudého vedení v NS3: diplomová práce* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 64 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.
- [19] KUHN M., WITTNEBEN A. *PLC enhanced wireless access networks: a link level capacity consideration*. Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002. IEEE 55th , vol.1, no., pp.125,129 vol.1, 2002
- [20] LUTZ LAMPE, A. J. HAN VINCK *On cooperative coding for narrow band PLC networks*. Int. J. Electron. Commun. (AEÜ) 65 (2011) 681– 687.

- [21] MLÝNEK, P. *Analýza a modelování datové komunikace po silnoproudém vedení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 125s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
- [22] MLÝNEK, P. , KOUTNÝ J. , MIŠUREC, J. *Modelování silnoproudých vedení I—metody*. Access server [online]. 2010. [cit. 2013-11-02]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010070001>>.
- [23] MLÝNEK, P., FUJDIÁK, R., ŠILHAVÝ, P. *Role PLC v Smart Metering rollouts - porovnání a metodika hodnocení pilotních PLC realizací*. Sborník konference ČK CIRED 2015, 2015: s. 1-19.
- [24] PAPALEONIDOPOULOS I., KARAGIANNOPOULOS C., THEODOROU N., ANAGNOSTOPOULOS C., ANAGNOSTOPOULOS I. *Modelling of indoor low voltage power-line cables in the high frequency range*. International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC).
- [25] PETERKA, J. *Počítačové sítě, verze 4.0, Lekce 4: Základy datových komunikací*. [online]. MFF UK, Praha, 2015/2016. Dostupné z URL: <<http://www.earchiv.cz/1226/nahled.php3?l=4&me=1>>.
- [26] RAMEZANI, H. *OFDM water filling algorithm*. Dostupné z URL: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12733-ofdm-water-filling-algorithm>>.
- [27] SVOBODA, J. *Využívání silnoproudých vedení a sítí pro přenos zpráv*. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012.
- [28] SVOBODA, J. *Využívání silnoproudých vedení a sítí pro přenos zpráv*. [online]. 2013. Dostupné z URL: <http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/165b.pdf>.
- [29] TONELLO A. M., ZHENG, T. *Bottom-up transfer function generator for broadband PLC statistical channel modeling*. ISPLC, IEEE International Symposium, MAY. 2009.
- [30] VANČATA, P. *Standardizace širokopásmových systémů přenosu po energetickém vedení*. Access server [online]. 2005. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2005112801>>.
- [31] VERSOLATTO, F., TONELLO, A., TORNELLI, C., GIUESTINA, D. *Statistical analysis of broadband underground medium voltage channels for PLC applications*. SmartGridComm, IEEE International conference, 3-6 Nov. 2014.

- [32] VODRÁŽKA, J. *Chybovost při přenosu digitálního signálu*. České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechniky.
- [33] WAADT, A., KOCKS, CH., BRUCK, G., JUNG, P., SACHSENHAUSER, B. *Achievable Data Rates of Broadband PowerLine Communications in an Underground Medium-Voltage Network*. Journal of Green Engineering, vol. 3, 245-259, 2013
- [34] CENELEC EN 50065-1: *Signalizace v instalacích nízkého napětí v kmitočtovém rozsahu 3 kHz až 148,5 kHz*. [s.l.]: [s.n.], 2002. - s.
- [35] *HomePlug AV White Paper HomePlug Powerline Alliance*. [online]. 2005. Dostupné z URL: <<http://www.homeplug.org/>>.
- [36] *Instalační vodiče a kabely. Prakab Pražská kabelovna, a.s.* [online]. Dostupné z URL: <https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/prezentace/elektroenergetika/3_rocnik/AYKY.pdf>.
- [37] *Ocelovo-hliníkové vodiče (AlFe lana) pro venkovní elektrické vedení*. [online]. Dostupné z URL: <<http://www.acword.cz/portal/hromosvodovy-zemnicia-hutni-material/produkty/alfe-lana/alfe-lana-1644.htm>>.
- [38] *Silové kabely pro pevné uložení*. [online]. Dostupné z URL: <http://www.vodicekabely.cz/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=284&cf_id=50>.
- [39] *Kabel CYKY-J 3x2,5*. [online]. Dostupné z URL: <<http://www.ielektra.cz/kabel-cyky-j-3x2-5>>.
- [40] *Performance comparison of Digital Modulation techniques*. [online]. Dostupné z URL: <<http://www.gaussianwaves.com/2010/04/performance-comparison-of-digital-modulation-techniques-2/>>.
- [41] *Communication - OFDM*. [online]. Dostupné z URL: <http://www.sharetechnote.com/html/Communication_OFDM.html>.
- [42] *OFDM water filling algorithm*. [online]. Dostupné z URL: <<https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12733-ofdm-water-filling-algorithm?requestedDomain=www.mathworks.com>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AWGN	aditivní Gaussův bílý šum – Additive White Gaussian Noise
ASK	modulace s klíčováním amplitudy – Amplitude shift keying
CDMA	kódový multiplex – Code Division Multiple Access
DS	přímé rozprostřední – Direct Sequence
FH	frekvenční skákání – Frequency Hopping
FSK	modulace s klíčováním frekvence – Frequency Shift Keying
FUP	fair use policy
HDO	hromadné dálkové ovládání
NN	nízké napětí
OFDM	ortogonální frekvenční multiplex – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLC	komunikace po silovém vedení – Power Line Communication
PSD	výkonová spektrální hustota – Power Spectral Density
PSK	modulace s klíčováním fáze – Phase Shift Keying
QAM	kvadrurní amplitodová modulace – Quadrature Amplitude modulation
SNR	odstup signálu od šumu – Signal to Noise Ratio
UDP	user datagram protocol
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
WAN	rozsáhlá síť – Wide Area Network

SEZNAM PŘÍLOH

A	Obsah přiloženého CD	82
B	Rozsáhlá topologie	83

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- **DP_jonas_turan.pdf** – elektronická verze diplomové práce,
- **NS-3** – finální scénáře,
- **Matlab** – zdrojové kódy pro generování grafů v kapitolách 4.1, 4.2, 5.3 a 5.4,
- **Vystupni_data** – výstupní data pro jednotlivé simulace v kapitole 6, 7 a 8.

