



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ PLC KOMUNIKACE S VYUŽITÍM NETWORK SIMULATOR-3

MODELLING POWER LINE COMMUNICATION USING NETWORK SIMULATOR-3

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ PÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR MLÝNEK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Jiří Pánek

ID: 158210

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

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. Navrhněte a realizujte jejich rozšíření. Provedte analýzu negativních vlivů PLC komunikace a implementujte je do simulací. Realizujte vlastní simulační scénáře (pro rušení, pro rozsáhlé topologie, pro časově-frekvenčně proměnné impedance, pro různé přístupy k výpočtu primárních parametrů atd.). Uvažujte nové standardy a modulace pro úzkopásmovou PLC technologii. V nově realizovaných ukázkových scénářích pro simulaci PLC proveďte simulace přenosových funkcí několika topologií (pro malou topologii s 3 odbočkami a pro rozsáhlou topologii). Dále proveďte simulaci vlivu jednotlivých typů rušení na komunikaci a výsledky diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] F. Aalamifar, A. Schloegl, D. Harris, L. Lampe, "Modelling Power Line Communication Using Network Simulator-3", IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Atlanta, GA, USA, December 2013. [Online] Available: "http://www.ece.ubc.ca/~faribaa/ns3_plc_software.htm".
- [2] Hošek, J. Pokročilé komunikační techniky – laboratorní cvičení. Skripta, 2013.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 2.6.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá datovou komunikací po silnoproudém vedení a její simulací v prostředí Network Simulator-3. První část náleží obecnému popisu PLC, shrnuje její dělení a příslušné standardy. Následující část popisuje grafické rozhraní simulátoru, jeho možnosti a simulace několika topologií. Ve třetí části se nachází popis jednotlivých příkladů simulovaných v NS-3 a návrh na jejich rozšíření. Dále obsahuje rozbor typů rušení v PLC a dílčí rozšíření.

KLÍČOVÁ SLOVA

PLC, Network Simulator-3, simulace, topologie, přenosová funkce, rušení

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with power line communication and its simulation in Network Simulator-3. The first part includes a general description of PLC, summarizes its division and the relevant standards. The next part describes graphical user interface, its options and several simulation topologies. The third part is a description of each simulated examples in NS-3 and proposal for their extension. It also includes analysis of the types of interference in PLC and partial extension.

KEYWORDS

PLC, Network Simulator-3, simulation, topology, transfer fiction, interference

PÁNEK, J. *Modelování PLC komunikace s využitím Network Simulator-3*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Mlýnek, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

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

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 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.

V Brně dne

.....
Podpis autora

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 DATOVÁ KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÉM VEDENÍ.....	9
1.1 Popis PLC.....	9
1.2 Dělení a použití PLC.....	9
1.3 Standardy	10
2 GRAFICKÉ ROZHRANÍ PRO SIMULACE PLC V NS-3.....	11
2.1 Uzly	11
2.2 Linky.....	12
2.3 Nastavení parametrů simulace	13
2.4 Výsledky simulace topologie bez časově proměnné impedance	14
2.5 Výsledky simulace po úpravě předchozí topologie.....	15
2.6 Výkonová spektrální hustota a odstup signálu od šumu	16
3 SIMULACE PLC V NS-3	18
3.1 Příklad plc-netdevice-example.cc	18
3.2 Příklad plc-psd-example.cc.....	18
3.3 Příklad plc-mac-example.cc.....	19
3.4 Příklad plc-phy-example.cc	20
3.5 Návrh na rozšíření příkladů.....	20
4 IMPLEMENTOVANÁ ROZŠÍŘENÍ.....	21
4.1 Rozšíření dostupných kabelů	21
4.2 Rušení a šum na pozadí.....	24
5 SIMULACE VLIVU ZMĚNY PARAMETRŮ TOPOLOGIE	28
5.1 Vliv délky jednotlivých úseků přímé cesty	28
5.2 Vliv změny délky odbočky na velikosti útlumu	29
5.3 Vliv změny impedance odbočky	30
6 VLIV PARAMETRŮ ROZSÁHLÉ TOPOLOGIE.....	32
7 ZÁVĚR.....	35
LITERATURA	36
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Topologie převzatá z [8], ale bez časově proměnné impedance	11
Obr. 2: Nastavení druhu uzlu.....	12
Obr. 3: Nastavení typu linky	13
Obr. 4: Nastavení spektrálního a časového modelu	13
Obr. 5: Přenosová funkce topologie z obrázku 1	14
Obr. 6: Upravená topologie z obrázku 1.....	15
Obr. 7: Přenosová funkce topologie z obr. 6.....	16
Obr. 8: Okno pro volbu grafů.....	17
Obr. 9: Výkonová spektrální hustota prvku Dev1 z obr. 1	17
Obr. 10: Výstup příkladu NetDevice	18
Obr. 11: Výstup příkladu PSD.....	19
Obr. 12: Výstup příkladu MAC	19
Obr. 13: Výstup příkladu PHY	20
Obr. 14: Referenční topologie	22
Obr. 15: Modulové frekvenční charakteristiky pro oba typy výpočtů	23
Obr. 16: Modulové frekvenční charakteristiky výpočtů v porovnání s dostupnými simulátory FTW a Canete.....	24
Obr. 17: Spektrální výkonová hustota barevného šumu při změně parametru b	25
Obr. 18: Spektrální výkonová hustota šumu domovního a průmyslového	26
Obr. 19: Ilustrace impulsního typu rušení	27
Obr. 20: Modulové frekvenční charakteristiky při změně délky přímé cesty	28
Obr. 21: Modulové frekvenční charakteristiky při změně délky odbočky	29
Obr. 22: Modulové frekvenční charakteristiky při změně impedance odbočky	31
Obr. 23: Rozsáhlá topologie	32
Obr. 24: Modulová frekvenční charakteristika rozsáhlé topologie	32
Obr. 25: Frekvenční charakteristika rozsáhlé topologie při změně délky přímé cesty	33
Obr. 26: Frekvenční charakteristika rozsáhlé topologie při změně délky odbočky	33
Obr. 27: Frek. charakteristika rozsáhlé topologie při změně impedance odboček.....	34

ÚVOD

Již řadu let, její počátky spadají do 50. let 20. století, hraje datová komunikace po silnoproudém vedení důležitou roli na poli komunikačních technologií [1]. I přes to se zde dlouho nenacházel volně dostupný nástroj pro simulaci této komunikace. Mezeru vyplnil až příchod několika simulátorů v prostředí Matlab, jmenovitě FTW simulátoru [2] a simulátoru Canete [3], a hlavně příchod PLC simulátoru, využívající knihovny Network Simulator-3.

Tato práce obsahuje popis tohoto PLC simulátoru, jeho grafického rozhraní a několika příkladných simulací. Následně zde lze nalézt rozbor výpočtu primárních parametrů vedení a z toho vycházející implementace dalšího typu kabelu. Na to navazuje popis rušení vyskytující se v PLC komunikaci, které je hlavním nedostatkem této technologie [4], a podrobnější popis obsažených a nově přidaných typů rušení v PLC simulátoru. Práce se v závěru zabývá též vlivem délek jednotlivých kabelových úseků a impedancí odboček na tvar přenosové funkce kanálu.

1 DATOVÁ KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÉM VEDENÍ

1.1 Popis PLC

Tato technologie je založena na možnosti přenosu dat po silových rozvodech, a to jak vysokého, tak nízkého napětí. Její hlavní výhoda spočívá ve využití již existující kabeláže, bez nutnosti realizace dalšího vedení. Zde však zároveň naráží na problém, jelikož mnohá vedení byla navržena zejména pro přenos střídavého napětí o frekvenci 50 Hz a mají jen omezenou možnost přenosu vyšších frekvencí. Výraznou vadou může být také silné rušení a s tím související dodržení limitů elektromagnetické kompatibility [5].

Zařízení PLC jsou připojena k elektrické síti prostřednictvím kapacitních nebo induktivních vazebních členů. Po galvanickém oddělení a odfiltrování napájecí složky zbývá frekvenční pásmo vhodné pro přenos dat, která jsou pomocí vhodné modulace zkombinována s nosným kmitočtem, jehož amplituda je výrazně menší než u silové části spektra [5].

1.2 Dělení a použití PLC

PLC systémy lze rozdělit podle šířky pásma na dvě skupiny, úzkopásmové a širokopásmové. První, úzkopásmové, pracují v oblasti od 3 do 500 kHz a rychlosti se pohybují řádově ve stovkách kbit/s. Širokopásmové PLC využívají frekvence od 1 MHz až po 30 MHz a více. Zde lze dosáhnout rychlostí odpovídajícím řádově až desítkám Mbit/s [1].

Úzkopásmové PLC systémy je možno použít pro dálková měření, signalizaci, regulaci, ovládání, případně synchronizaci, konkrétně pak kupříkladu pro odečítání stavu elektroměrů, plynoměrů, vodoměrů a měřičů tepla v domácnostech, propojení a centralizované ovládání domácích spotřebičů, centrální sběr dat, či zpětné řízení zabezpečovacích systémů. Další možností jsou hovorové služby představující přenos služební a standardní telefonie. Tyto systémy, ač rychlostně limitované, vykazují dobrou schopnost překonávat velmi nepříznivé podmínky panující na energetické síti a lze je tedy s výhodou použít jak pro jednotlivá spojení, tak i v přístupových sítích [6].

Širokopásmové systémy se rozvinuly až s příchodem požadavku na využití silnoproudých sítí i pro přenos vysokorychlostních datových signálů a přístupu k Internetu. Jako přesnější označení se pro tyto systémy zavedlo označení BPL – Broadband Power Lines. Oproti úzkopásmové PLC je zde dosaženo mnohonásobně větší rychlosti za cenu zkrácení dosahu na řádově stovky metrů, v závislosti na míře rušení. Jedná se o technologii schopnou konkurovat současným xDSL trendům. Nabízí se tedy využití pro LAN sítě, video přenosy, přenosy objemných datových toků atd. [6].

1.3 Standardy

Mezi úzkopásmovými PLC byl v roce 1999 zaveden standard ANSI/EIA 709.1 a s ním související protokol LoneTalk, obsahující všech sedm vrstev ISO/OSI. Přenosové rychlosti se pohybují v řádech několika kbit/s a používají se zde modulace FSK nebo rozprostřené S-FSK. Zvýšení rychlosti přinesly standardy PRIME a G3-PLC, pracující s OFDM (ortogonální multiplex s frekvenčním dělením). Jedny z nejnovějších standardů ITU-T G.hnem a IEEE 1901.2 jsou určeny zejména pro Smart Grid aplikace, a to jak domovní tak i venkovní, a dosažitelná rychlost se blíží 500 kbit/s [7].

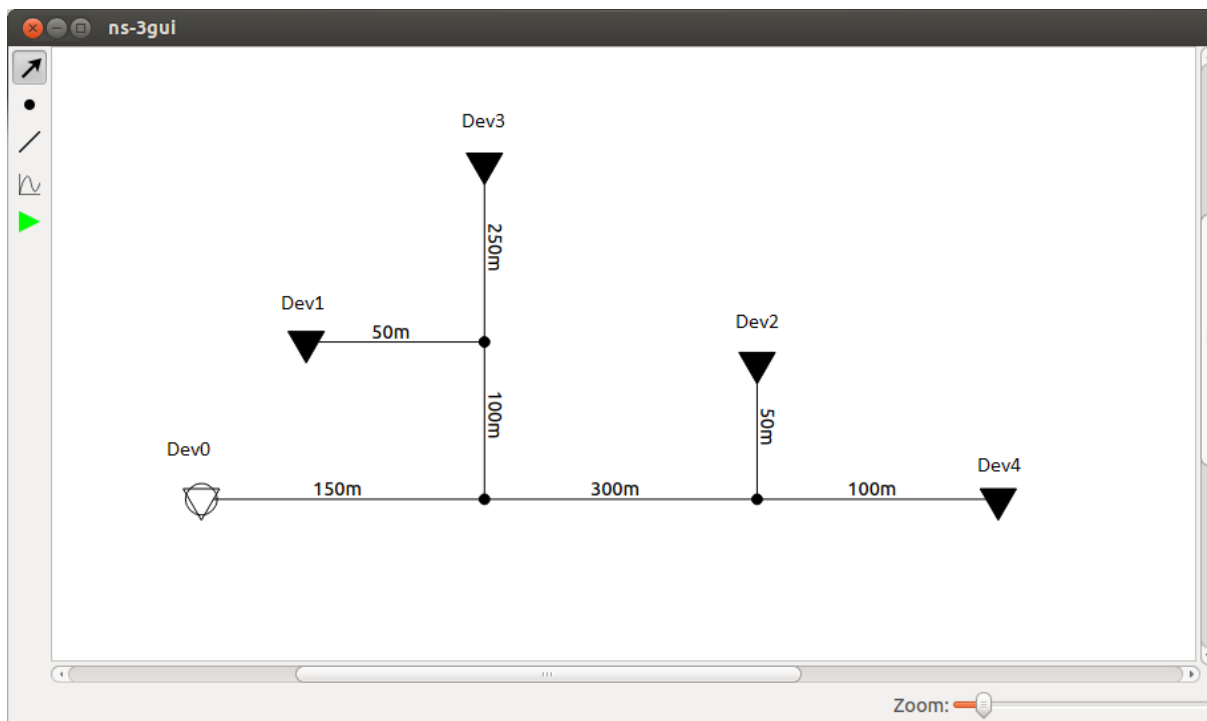
Prvenství mezi širokopásmovými standardy patří TIA-1113, v roce 2008 do něj byla zahrnuta technologie HomePlug 1.0, poskytuje rychlost až 14 Mbit/s a využívá OFDM. Následující standard IEEE 1901-2010 slouží pro vysoko rychlostní komunikaci do 500 Mbit/s v pásmu frekvencí pod 100 MHz a obsahuje dvě fyzické vrstvy. Jedna je založena na technologii HomePlug AV, využívá FFT-OFDM a slouží pro domácí sítě, zatímco druhá čerpá z technologie HD-PLC a používá Wavelet-OFDM, a hodí se k přístupovým aplikacím. Dalším výrazným standardem je pak ITU-T G.hn, který se používá zejména pro domácí sítě, dosahuje rychlosti až 1 Gbit/s a pracuje jak na vodičích elektrické sítě, tak na vodičích telefonních či koaxiálních [7].

2 GRAFICKÉ ROZHRANÍ PRO SIMULACE PLC V NS-3

Poskytované GUI [8] umožňuje uživateli vizualizovat potřebné topologie s využitím základních funkcí NS-3 bez nutnosti programování. V prostředí je možné topologie vytvářet, nastavovat vlastnosti jednotlivých prvků a simulačních parametrů. Výstupem provedených simulací jsou pak přenosové funkce mezi vybranými zařízeními nebo výkonová spektrální hustota na vybraném přijímači. Simulace slouží pro širokopásmové PLC.

2.1 Uzly

Jak je patrné z obrázku 1, jednotlivé uzly mohou nabývat různých podob, což je způsobeno rozdílným nastavením jejich parametrů. V základním stavu mají vlastnost pouhého spojovacího bodu, sloužícího k propojení dvou a více linek. Při použití ve smyslu koncových bodů, lze uzlům přiřadit impedanci a to nejen statickou, ale i frekvenčně či časově proměnnou načtenou ze souboru. Tyto body mohou představovat vysílače, přijímače nebo pouhou zásuvku. Drobným nedostatkem se jeví nezobrazování názvu koncového zařízení, ty jsou např. v obrázku 1 dodatečně dokreslené. Možnost nastavení jako zdroj šumu bohužel není dosud aktivní (viz obrázek 2).



Obr. 1: Topologie převzatá z [8], ale bez časově proměnné impedance

Outlet
Impedance: 20

Net Device
Name: Dev1
 Shunt Impedance: ...
 TX Impedance: 0 ...
 RX Impedance: 100 ...

Noise Source
Name: Noise
Noise PSD: 1e-7 ...
Static

Close

Obr. 2: Nastavení druhu uzlu

2.2 Linky

K propojení dvou uzlů slouží linky, jejichž vlastnosti závisí na druhu zvolené kabeláže. Zatím lze volit mezi NAYY150SE, NAYY50SE a AL3x95XLPE nebo definovat vlastní ABCD matici, kterou je tato dvou bodová síť popsána (viz obrázek 3). Dále lze nastavit délku a pojmenování dané linky.

Name:

Cable Settings

PLC_NAYY150SE_Cable

Length:

Two-Port Settings

A: ...

B: ...

C: ...

D: ...

Accept

Obr. 3: Nastavení typu linky

2.3 Nastavení parametrů simulace

Po vytvoření žádané topologie je třeba nastavit v jakých podmínkách má simulace proběhnout (viz obrázek 4). Nastavení spektrálního modelu obsahuje volbu nejnižší frekvence, od které bude simulace provedena, šířku pásma a počet těchto pásem. Poslední parametr je obzvláště důležitý při volbě frekvenčně proměnné impedance a musí odpovídat polovině vzorků zvolené impedance. U časového modelu je pak stejně důležité nastavení hodnoty počtu vzorků za cyklus při výběru časově proměnné impedance, která se musí opět rovnat polovině vzorků obsažených v daném souboru impedancí.

Spectrum Model

Lower Frequency Limit:

Band Resolution:

Frequency Bands:

Time model

Main Frequency:

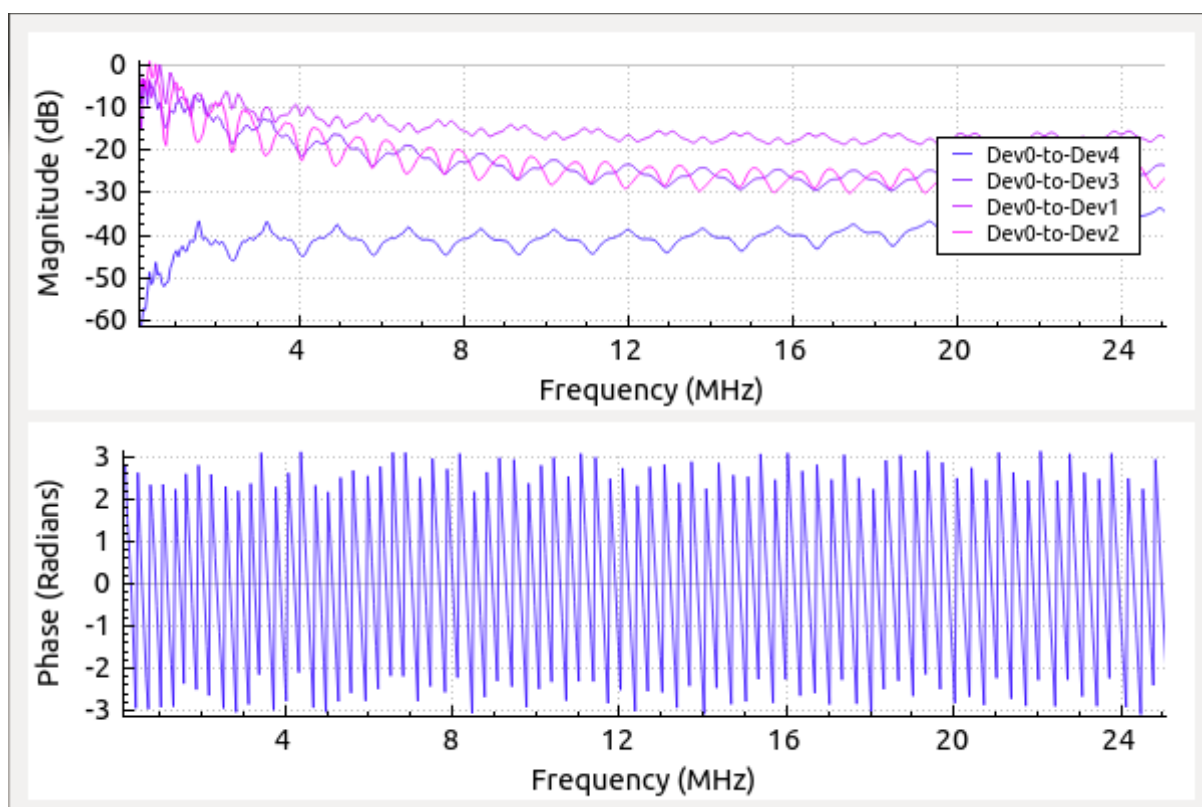
Samples per Cycle:

Cancel OK

Obr. 4: Nastavení spektrálního a časového modelu

2.4 Výsledky simulace topologie bez časově proměnné impedance

V této simulaci je použita topologie z obrázku 1, která obsahuje přijímací prvky Dev2 a Dev3 se statickou impedancí $100\ \Omega$, prvek Dev4 s frekvenčně proměnnou impedancí a Dev1 s impedancí časově proměnnou. Ta však byla, pro demonstraci grafického zobrazení přenosové funkce na obrázku 5, nahrazena statickou impedancí $100\ \Omega$, důvod popsán níže. Vysílací prvek Dev0 má impedanci $20\ \Omega$. Jednotlivým linkám odpovídá nastavení z obrázku 3, stejně jako spektrální a časový model souhlasí s obrázkem 4.

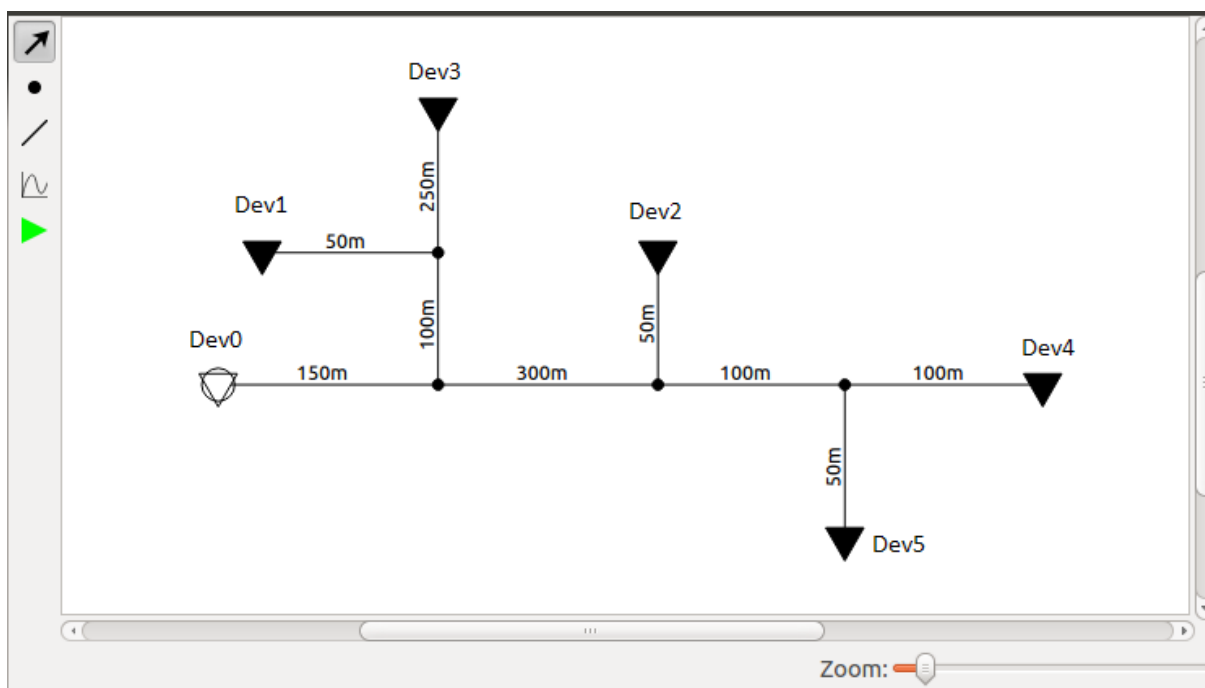


Obr. 5: Přenosová funkce topologie z obrázku 1

Po nastavení korektních hodnot je možné simulaci spustit, načež je v nově otevřeném okně potřeba vybrat pro které uzly se má grafické znázornění přenosové funkce či spektrální výkonové hustoty zobrazit. Pokud ale některý z prvků obsahuje časově proměnnou impedanci, tyto závislosti se nezobrazí. Hodnoty se však při provedení simulace uloží do složky s datovými soubor a je možné s nimi dále pracovat, v tomto případě se jedná o soubor Dev0-to-Dev1.dat, který se nachází ve složce data. Grafickou podobu přenosových funkcí si je možno prohlédnout na obrázku 5.

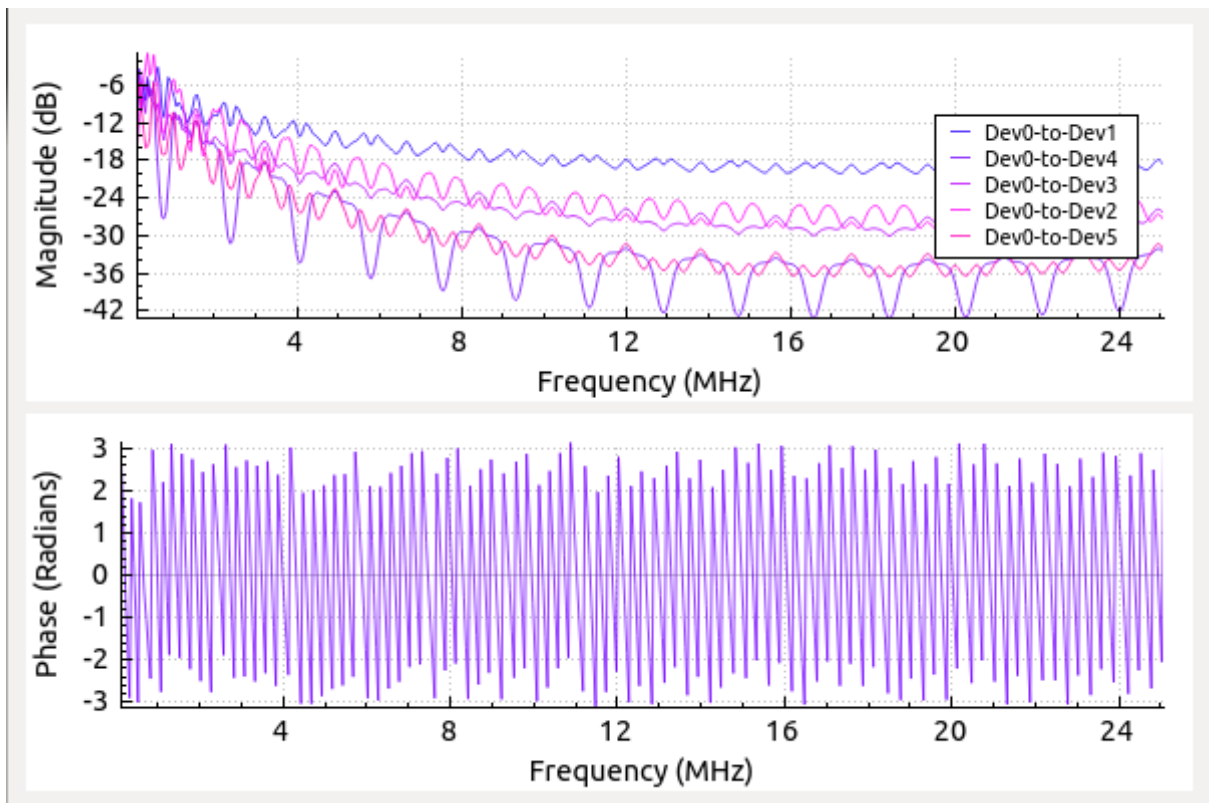
2.5 Výsledky simulace po úpravě předchozí topologie

Pro porovnání, v této simulaci byla předchozí topologie upravena do podoby z obrázku 6, která obsahuje pouze statické impedance. Jejich hodnoty se liší, 50 Ω mají prvky Dev1 a Dev3, zatímco prvky Dev2 a Dev5 obsahují hodnotu 100 Ω a Dev4 pak 200 Ω . Zbytek nastavení se nikterak neliší od předchozí simulace.



Obr. 6: Upravená topologie z obrázku 1

Přenosová funkce této topologie se nachází na obrázku 7. Z něj je patrné, že jednotlivé prvky se vzájemně ovlivňují v závislosti na jejich vzdálenosti a hodnotě impedance.



Obr. 7: Přenosová funkce topologie z obr. 6

2.6 Výkonová spektrální hustota a odstup signálu od šumu

Při volbě zobrazení grafických závislostí po provedení simulace není jedinou možností přenosová funkce mezi vysílačem a jednotlivými přijímači, ale i výpočet výkonové spektrální hustoty na jednotlivých přijímačích (viz obrázek 8). Výběr výpočtu odstavu signálu od šumu a rušení (SINR) je také možný, avšak dojde k zobrazení pouze prázdného grafu.

V tomto případě je zvolena výkonová spektrální hustota prvku Dev1 s časově proměnnou impedancí, která na rozdíl od přenosové funkce je při volbě tohoto typu impedance korektně zobrazena (viz obrázek 9).

Channel Transfer Functions

Rx Nodes: Dev4, Dev3, Dev1, Dev2

Tx Nodes: Dev0

Start

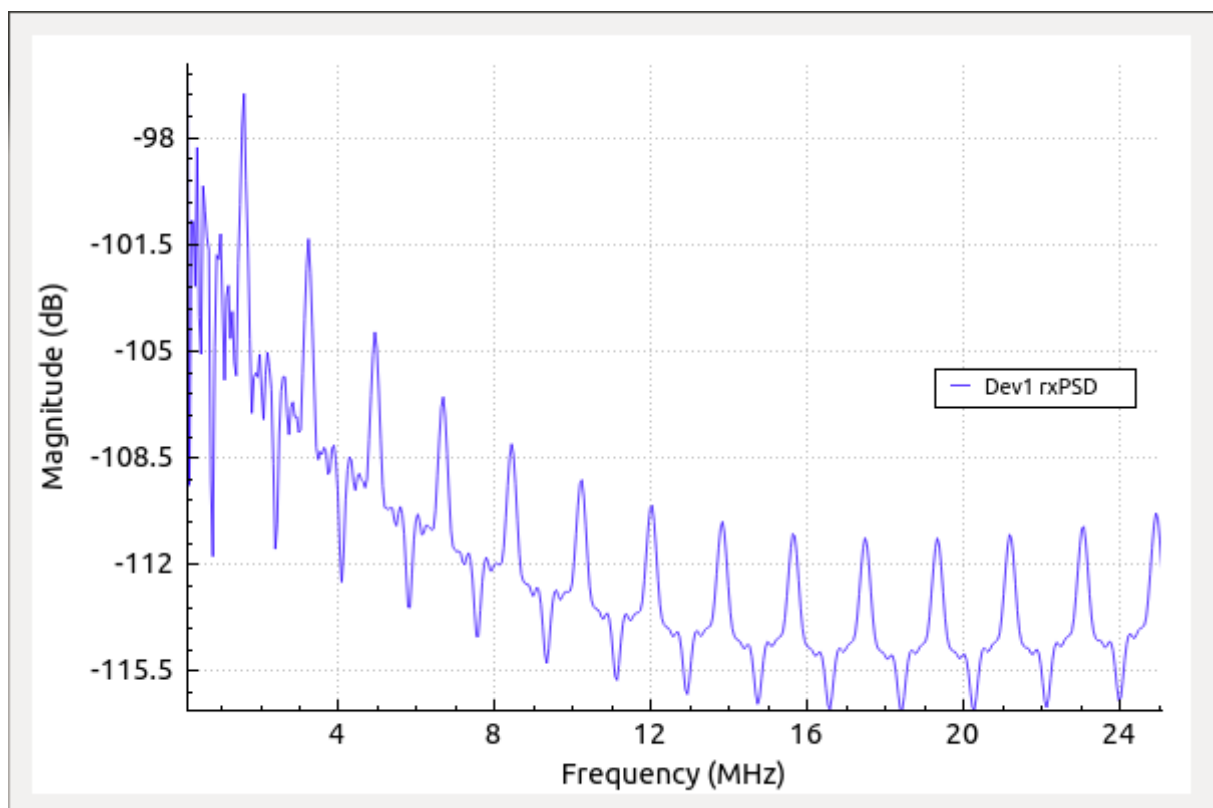
Noise and PSD

Tx Node: Dev0 Rx Node: Dev1

Calculate PSD Calculate SINR

Start

Obr. 8: Okno pro volbu grafů



Obr. 9: Výkonová spektrální hustota prvku Dev1 z obr. 1

3 SIMULACE PLC V NS-3

Simulátor NS-3 je schopen přijímat uživatelské topologie a následně generovat přenosové funkce kanálů nebo výkonovou spektrální hustotu šumu a z toho odvozený odstup signálu od šumu či kapacitu linky. Topologie se skládají z uzlů a linek, sloužící k jejich propojení. Tyto prvky mají frekvenčně proměnné vlastnosti. Z toho důvodu simulační prostředí umožňuje stanovit frekvenční rozsah, pro který je simulace provedena [8].

Uzly mohou sloužit jako vysílač nebo přijímač, ale také jako zdroj šumu či jako pouhé propojení. Jejich možné impedance lze rozdělit do čtyř typů. Pevná impedance požaduje pouze zadané komplexní číslo a je neměnná. Frekvenčně proměnná impedance je dána vektorem komplexních čísel, jehož prvky se shodují s impedancí příkladné frekvence. U časově proměnné impedance pak tato hodnota odpovídá velikosti impedance během jednoho cyklu. Posledním typem jest kombinace předchozích dvou zmíněných impedancí. Linky propojují vždy dva uzly a jsou popisovány jako dvoubodová síť. Jedinou podmínkou při vytváření topologií je absence smyček [8].

3.1 Příklad plc-netdevice-example.cc

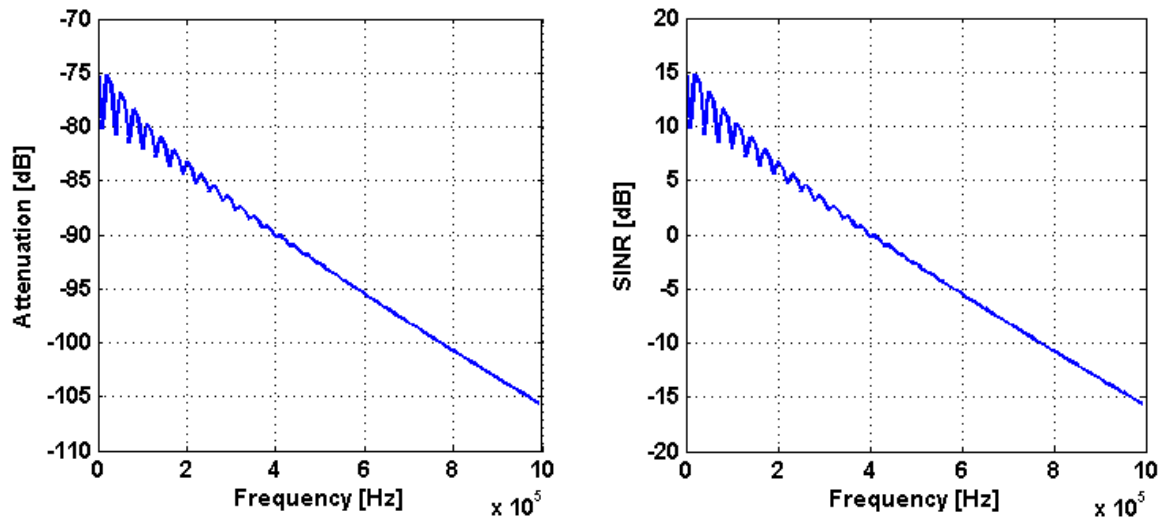
NetDevice poskytuje některé metody pro připojení uzlů ke kanálům a pro komunikaci mezi nimi. Příklad odhaluje možnosti použití třídy NetDevice. Výstupem tohoto příkladu je časový popis přenosu paketu mezi dvěma přímo propojenými zařízeními kabelem NAYY150SE na vzdálenost jednoho kilometru, který započne v první sekundě simulace. Paket o velikosti 1024 bitů je vyslán na cílovou adresu, která se nachází na vedlejším uzlu, zde je přijat a rozpoznán. Poté odešle potvrzení o přijetí na zdrojovou adresu, kde proběhne totožný proces přijetí (viz obrázek 10).

```
<terminated> ns-3.15 Debug [C/C++ Application] /home/user/workspace/ns-3.15/build/scratch/plc-netdevice-example (12/18/14, 3:41 PM)
[1]s PLC_Mac[Node1]: Packet to send: ns3::LlcSnapHeader (type 0x0) Payload (size=1024)
1.01792s Sending data: ns3::PLC_MacHeader (destination address = 00:00:00:00:00:02, source address = 00:00:00:00:00:01, type = 0, sequence number = 54)
1.4044s PLC_Mac[Node2]: Received packet: ns3::PLC_MacHeader (destination address = 00:00:00:00:00:02, source address = 00:00:00:00:00:01, type = 0, sequence number = 54)
1.4044s PLC_Mac[Node2]: Packet is for me
1.4044s PLC_Mac[Node2]: Received data frame, forwarding up...
1.4044s PLC_Mac[Node2]: Sending ACK...
1.42232s Sending ack: ns3::PLC_MacHeader (destination address = 00:00:00:00:00:01, source address = 00:00:00:00:00:02, type = 1, sequence number = 54)
1.43589s PLC_Mac[Node1]: Received packet: ns3::PLC_MacHeader (destination address = 00:00:00:00:00:01, source address = 00:00:00:00:00:02, type = 1, sequence number = 54)
1.43589s PLC_Mac[Node1]: Packet is for me
1.43589s PLC_Mac[Node1]: Received ACK
```

Obr. 10: Výstup příkladu NetDevice

3.2 Příklad plc-psd-example.cc

Opět je zde vytvořeno stejné dvoubodové spojení a příklad umožňuje vypočítat spektrální výkonovou hustotu na přijímači a odstup signálu od šumu a rušení daného kanálu. Na výstup se zobrazují hodnoty těchto výpočtů, které je možné dále zpracovávat, například programem Matlab (viz obrázek 11).



Obr. 11: Výstup příkladu PSD

3.3 Příklad plc-mac-example.cc

V tomto příkladu se vytvoří dvě poloduplexní fyzické vrstvy, přiřadí se jim šum na pozadí a patřičné modulace, a poté se jsou spárovány s vrstvami linkovými, na kterých je příslušným uzlům přidělena MAC adresa. Celý příklad se zaměřuje na povolení přístupové metody CSMA/CA na každém uzlu, při stejné topologii z předchozích příkladů. Díky povolenému logování je na výstupu vypsána každá událost na linkové vrstvě (viz obrázek 12).

```

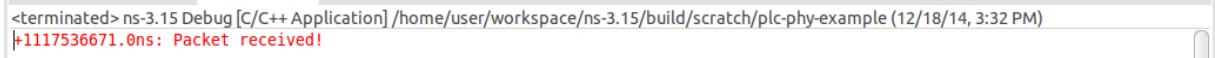
<terminated> ns-3.15 Debug [C/C++ Application] /home/user/workspace/ns-3.15/build/scratch/plc-mac-example (12/18/14, 3:38 PM)
1.01792s PLC_Mac::NotifyTransmissionStart(1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
PLC_Mac[, Node1, ] : , 0x882b378)
1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.01792s PLC_Mac::TriggerTransmission(1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
PLC_Mac[, Node1, ] : , 0x882b378)
1.01792s Sending data: ns3::PLC_MacHeader (destination address = 00:00:00:00:00:02, source address = 00:00:00:00:00:01, type = 0, sequence number = 61)
1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.01792s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.25297s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.25297s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.25297s PLC_Mac::NotifyTransmissionEnd(1.25297s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
PLC_Mac[, Node1, ] : , 0x882b378)
1.25297s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.25297s PLC_Mac::DoGetPhy(0x882b378)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::NotifyReceptionEndOk(1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
PLC_Mac[, Node2, ] : , 0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s 1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
PLC_Mac[Node2]: Received packet: ns3::PLC_MacHeader (destination address = 00:00:00:00:00:02, source address = 00:00:00:00:00:01, type = 0, sequence number = 61)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoProcess(1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
PLC_Mac[, Node2, ] : , 0x8813700, 0x8834990)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)
1.25298s PLC_Mac::DoGetPhy(0x8813700)

```

Obr. 12: Výstup příkladu MAC

3.4 Příklad plc-phy-example.cc

Tento příklad víceméně kopíruje příklad předchozí s použitím odlišného modulačního schématu a bez vytvoření navazující linkové vrstvy. Na výstupním terminálu dostaneme potvrzení úspěšného přenosu paketu (viz obrázek 13).



```
<terminated> ns-3.15 Debug [C/C++ Application] /home/user/workspace/ns-3.15/build/scratch/plc-phy-example (12/18/14, 3:32 PM)
+1117536671.0ns: Packet received!
```

Obr. 13: Výstup příkladu PHY

3.5 Návrh na rozšíření příkladů

Jedním z požadovaných rozšíření je potřeba dalších typů kabelů, které by odpovídali typům používaným v evropských zemích, jakými jsou hojně užívané měděné CYKY kabely různých průřezů.

Další možností se jeví, v závislosti na typu příkladu, obsažení složitějších topologií. Například přidání jednoho prvku k vytvoření trojprvkové sběrnice topologie a následné zobrazení komunikace přes uzel nebo ke znázornění vzájemného ovlivnění přenosových funkcí jednotlivých cest šíření.

Jednou z možností je i přidání rušení, například širokopásmovým šumem na pozadí, nebo impulzní rušení, které způsobují spínané zdroje připojených zařízení do sítě.

4 IMPLEMENTOVANÁ ROZŠÍŘENÍ

4.1 Rozšíření dostupných kabelů

Kabel CYKY3x2,5 byl do simulátoru doplněn úpravou modulu PLC-Cable, jedná se o nejrozšířenější kabel používaný v elektroinstalacích v České republice [9]. Podle [4] byly uvažovány dva druhy výpočtu primárních parametrů. Hodnoty pro výpočet (viz tabulka 1) byly převzaty ze samotné práce nebo ze simulátorů vytvořených v dané práci [2] [3].

Z níže uvedených rovnic je patrné, že primární parametry jsou závislé na rozměrech použitých kabelů a fyzikálních vlastnostech vodičů a dielektrik v nich obsažených. Následující složitější rovnice odpovídají výpočtu A, které berou v úvahu jak interní indukčnost, tvořenou poměrem povrchu elektrického pole a protékajícího proudu, tak i indukčnost externí, vznikající elektrickým polem působícím mimo vodič [10] [11]. Výsledná indukčnost je pak dána jejich součtem.

$$R' = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 f}{\pi \sigma a^2}} \left[\frac{\frac{d}{2a}}{\sqrt{\left(\frac{d}{2a}\right)^2 - 1}} \right] \quad (4.1)$$

$$L'_{ex} = \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) \quad (4.2)$$

$$L'_{in} = \frac{R'}{2\pi f} \quad (4.3)$$

$$L' = L'_{ex} + L'_{in} \quad (4.4)$$

$$C' = \frac{\pi \varepsilon_r \varepsilon_0}{\cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right)} \quad (4.5)$$

$$G' = 2\pi f C' \tan \delta \quad (4.6)$$

Oproti tomu rovnice pro výpočet B využívají hodnoty převzaté z již existujícího FTW PLC simulátoru, jehož autoři se u kapacity a indukčnosti inspirovali pevnými tabulkovými hodnotami, takže mezi frekvenčně závislé parametry spadá jen odpor a svod. Nalezneme zde také korelační faktor, pomocí něž lze zohlednit uvažované ztráty na vedení, které rostou se zvyšující se hodnotou tohoto faktoru [12].

$$R' = R_0 * 10^{-5} * \sqrt{f} \quad (4.7)$$

$$L' = 0,96 * 10^{-6} \quad (4.8)$$

$$C' = 17,5 * 10^{-12} \quad (4.9)$$

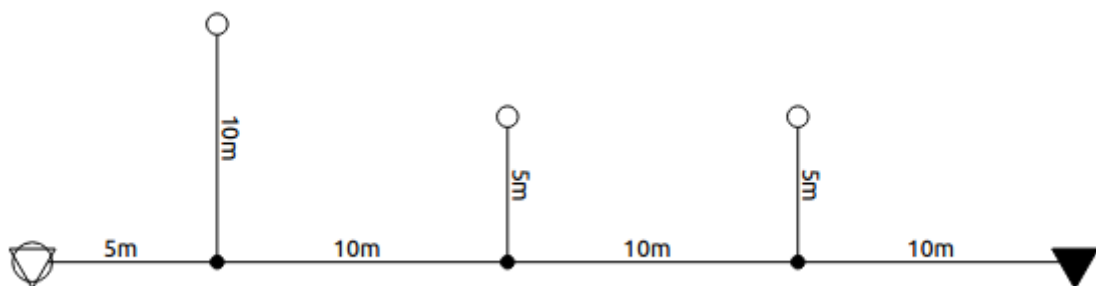
$$G' = l * G_0 * 10^{-4} * 2\pi f \quad (4.10)$$

V následující tabulce jsou shrnuty použité hodnoty pro výpočet primárních parametrů kabelu CYKY3x2,5. Jedná se o konkrétní fyzické rozměry kabelu, případně i tabulkové hodnoty použitých materiálů [10].

Tab. 1: Použité hodnoty pro výpočet primárních parametrů

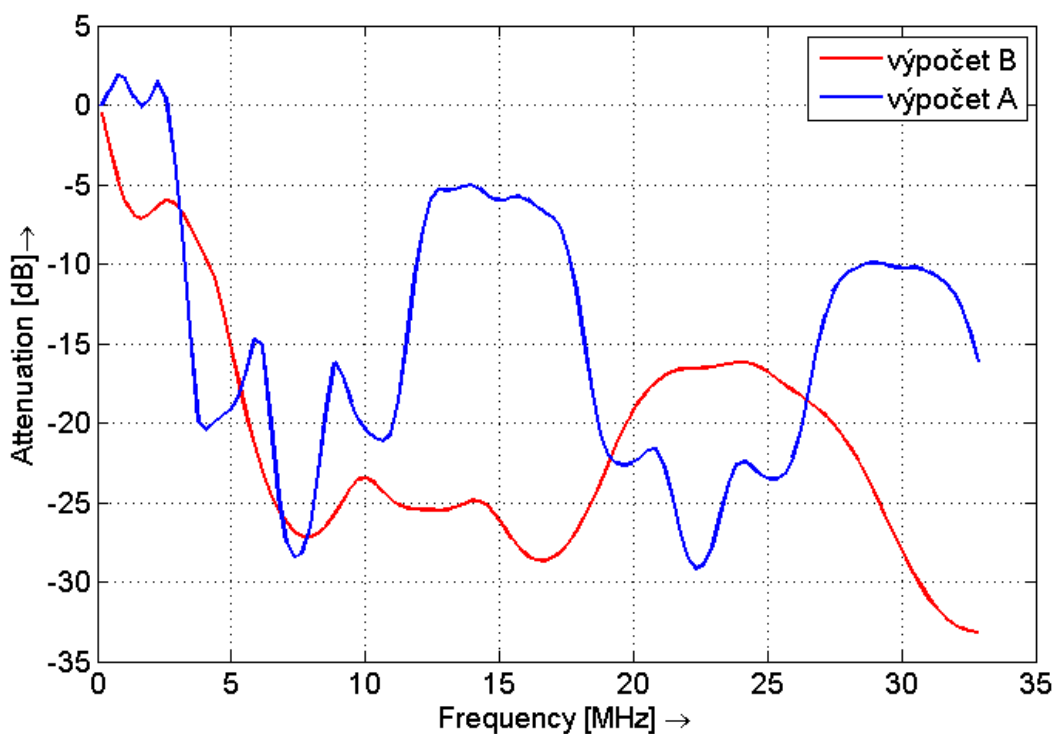
Název veličiny	Symbol	Hodnota
Relativní permeabilita	μ_r	0,99999
Permeabilita vakua	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Konduktivita materiálu	σ	$58 \cdot 10^6$ S/m
Poloměr vodiče	a	0,892 mm
Vzdálenost mezi středy	d	3,584 mm
Relativní permitivita	ϵ_r	4
Permitivita vakua	ϵ_0	$8,8541 \cdot 10^{-12}$ F/m
Odpor kabelu	R_0	9,34 Ω
Svod kabelu	G_0	34,7 S
Korelační faktor	l	5

Jako referenční topologie byla vybrána jednoduchá topologie se třemi odbočkami (viz obrázek **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Vysílač i přijímač pracují s impedancí 100 Ω , zatímco všechny tři odbočky mají impedanci tisíci ohmovou [4]. Tomuto typu zapojení pak odpovídají výsledné modulové charakteristiky (viz obrázek 15 a 16).



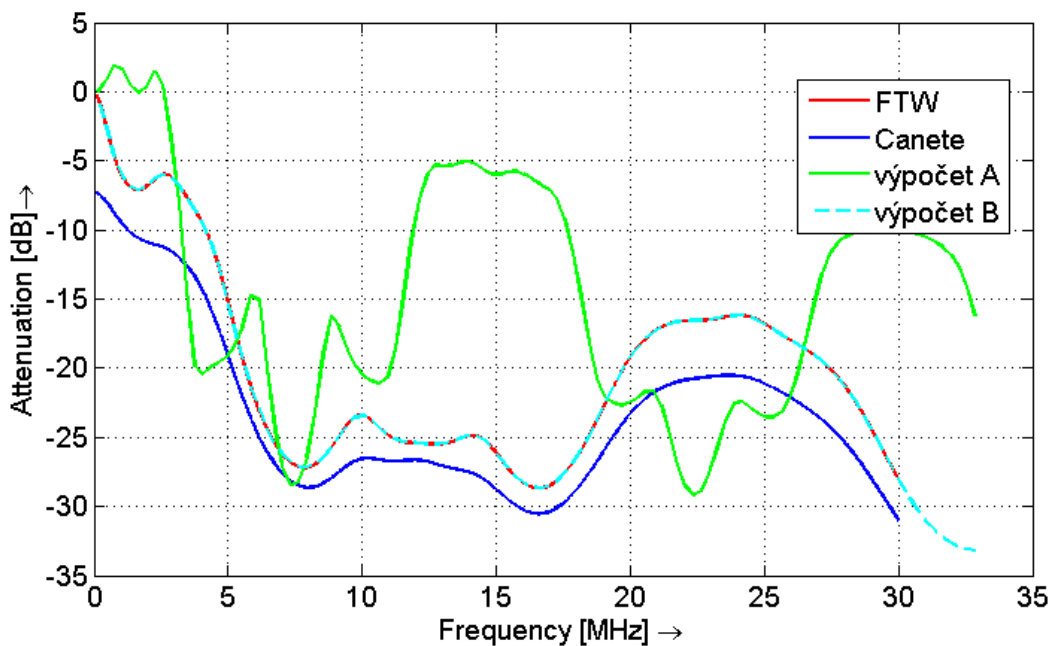
Obr. 14: Referenční topologie

Referenční topologie byla sestavena v NS-3 za využití poznatků z dostupného příkladu, viz kap. 3.2, následně odsimulována s oběma typy výpočtů primárních parametrů kabelu CYKY3x2,5 a z výstupních hodnot byla zobrazena jejich modulová kmitočtová charakteristika v prostředí Matlab (viz obrázek 15).



Obr. 15: Modulové frekvenční charakteristiky pro oba typy výpočtů

V porovnání s dostupnými simulátory FTW a Canete (viz obrázek 16), můžeme spatřit, že pomocí výpočtu B lze dosáhnout velmi podobného průběhu jako v simulátoru Canete, respektive naprosto totožného průběhu v případě simulátoru FTW a to z důvodu použitých hodnot přímo převzatých z tohoto simulátoru. Naopak průběh výpočtu A je značně odlišný, což lze jednoznačně přisoudit rozdílným rovnicím použitým u tohoto typu výpočtu.



Obr. 16: Modulové frekvenční charakteristiky výpočtů v porovnání s dostupnými simulátory FTW a Canete

4.2 Rušení a šum na pozadí

Rušení v PLC lze rozdělit na úzkopásmové rušení, šum na pozadí, impulzní synchronní a impulzní asynchronní rušení [13]. Úzkopásmové rušení se vyznačuje poměrně úzkými špičkami v okolí konkrétních frekvencí a je produktem spínaných zdrojů, monitorů, zářivek a frekvenčních měničů, na vyšších kmitočtech pak bývá způsobeno radiovémi signály na krátkých a středních vlnách [1].

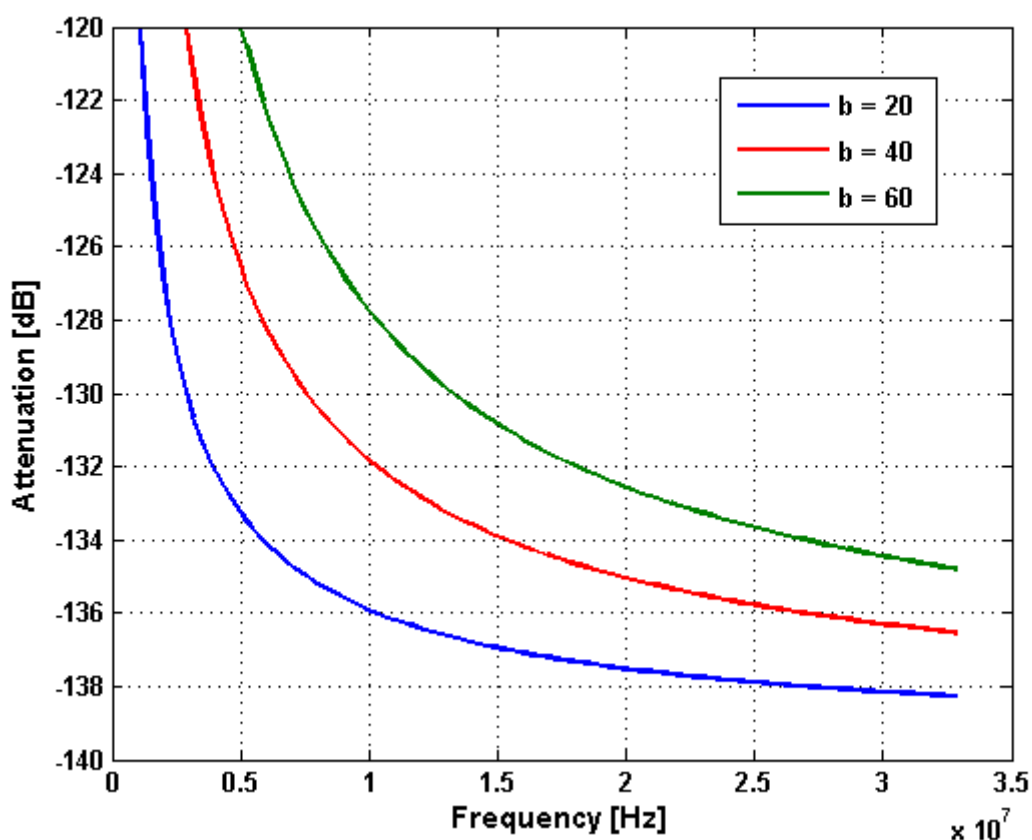
Rušení, které lze nalézt, byť s různou intenzitou, v síti pokaždé, se nazývá šum na pozadí a je způsoben množstvím různých slabých zdrojů rušení. Spektrální hustota takového šumu je značná zhruba do 20 kHz a klesá s rostoucím kmitočtem. Toto rušení způsobují zejména motory, elektrické spotřebiče, televizní přijímače a světla [1].

Impulzní rušení lze rozdělit na synchronní a asynchronní. První jmenované se v Evropě vyskytují s opakující se frekvencí impulsů 50 Hz, jejichž doba trvání dosahuje obvykle několik μs . PSD opět s rostoucí frekvencí klesá a rušení je obvykle způsobeno stmívači a konvertory. Naproti tomu impulsy asynchronního rušení mohou trvat až několik ms a opakují se s frekvencí od 50 do 200 kHz. Toto rušení způsobují většinou spínané prvky [1].

Co se šumu na pozadí týče, v NS-3 byla dosud implementována možnost přidání bílého šumu určité úrovně nebo šumu barevného, závislého na třech vstupních parametrech popisujících jeho spektrální výkonovou hustotu,

$$N(f) = a + b|f|^c \quad [\text{dBm/Hz}], \quad (4.11)$$

kde f se rovná frekvenci v MHz [8]. Tento výpočet barevného šumu obsahuje jednu podmínku, která zajišťuje, že výsledky vyšší než 10^{-12} nejsou brány v potaz a jsou automaticky rovny právě této hodnotě, viz obrázek 17, kde se mění parametr b , zatímco parametr a je roven -140 a parametr c rovná se -0,72.

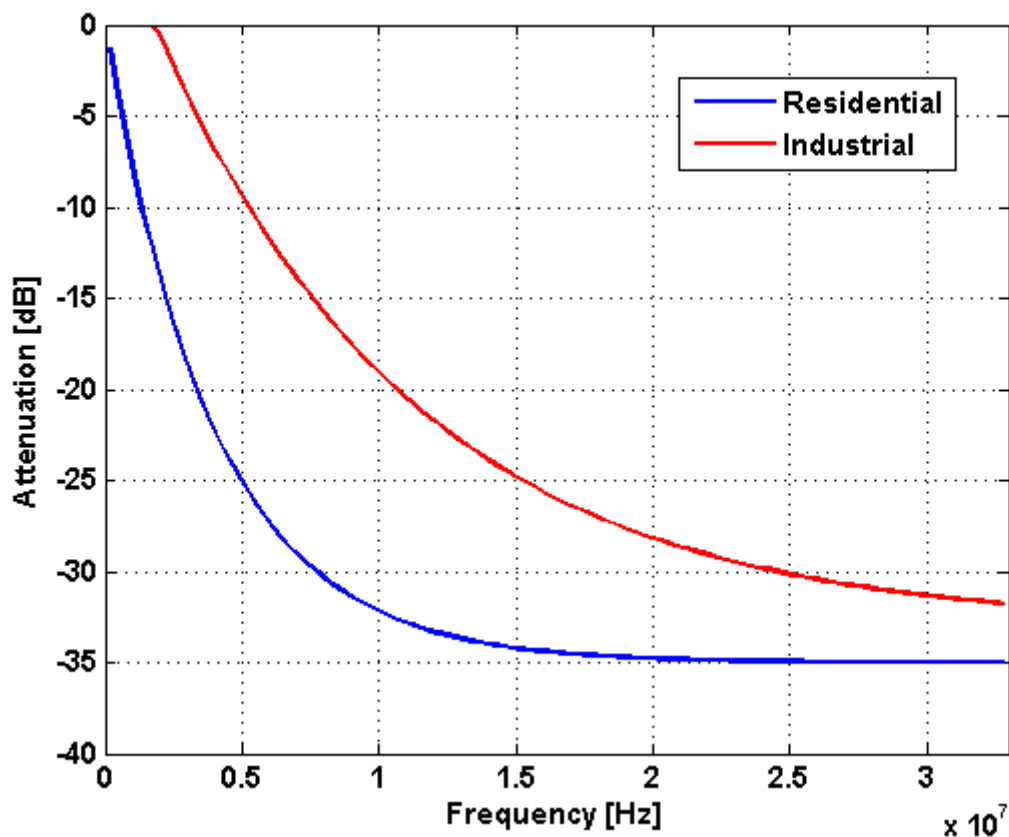


Obr. 17: Spektrální výkonová hustota barevného šumu při změně parametru b

Nově přidaným typem barevného šumu na pozadí je šum domovní (residential) a průmyslový (industrial) vycházející z následujících rovnic, převzatých z [14]:

$$N_{BNres}(f) = -35 + 35 * e^{-\frac{f[\text{MHz}]}{3,6}} \quad [\text{dB}\mu\text{V/Hz}] \quad (4.12)$$

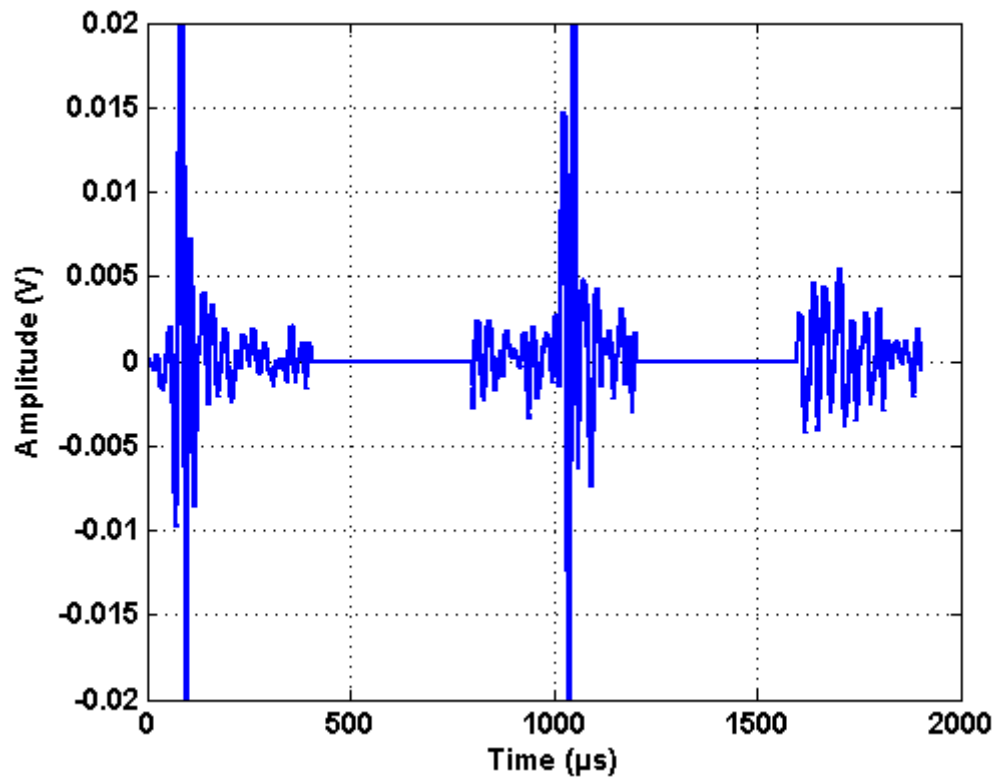
$$N_{BNind}(f) = -33 + 40 * e^{-\frac{f[\text{MHz}]}{8,6}} \quad [\text{dB}\mu\text{V/Hz}] \quad (4.13)$$



Obr. 18: Spektrální výkonová hustota šumu domovního a průmyslového

Dalším již obsaženým typem je zdroj impulsního rušení [8]. Zdroj tohoto rušení je tvořen dvěma náhodnými procesy, které poskytují hodnoty pro doby trvání během kterých je tento zdroj aktivní a pro úseky mezi impulsy, kdy je zdroj neaktivní. Ovšem nejsou zde simulovány žádné transientní impulsy, které by měli značný vliv na tvar šumové výkonové spektrální hustoty. Místo toho jsou šířené šumové PSD zapínány a vypínány na interferenčním modelu přijímače. Obrázek 19 pouze ilustruje princip impulsního rušení, kde jsou patrné aktivní a neaktivní úseky.

Model pro impulsní rušení v tomto simulátoru obsahuje 4 vstupní parametry. První parametr `src_node` je ukazatelem na konkrétní uzel v simulované síti, na kterém je umístěno požadované rušení. Parametrem `noisePsd` ukazuje na zvolenou spektrální výkonovou hustotu šumu. Zbývajícími dvěma parametry jsou `pulslen_gen` a `pulsegap_gen`, které obsahují náhodnou proměnnou (`RandomVariable`). První z nich určuje dobu trvání impulsu a druhý parametr pak značí dobu mezi impulsy (viz obrázek 19).



Obr. 19: Ilustrace impulsního typu rušení

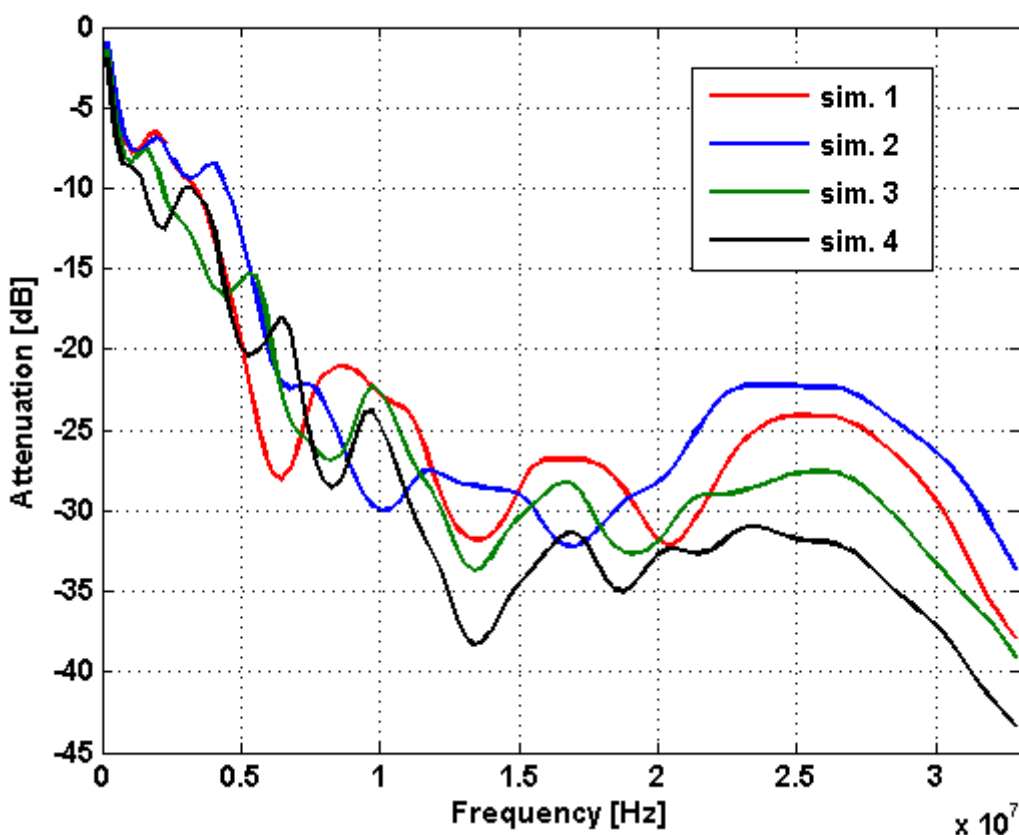
5 SIMULACE VLIVU ZMĚNY PARAMETRŮ TOPOLOGIE

5.1 Vliv délky jednotlivých úseků přímé cesty

Byly provedeny celkem čtyři simulace topologie z obrázku 14, ale s odlišnými hodnotami délek úseků (vzdálenost mezi sousedními uzly na přímé cestě) mezi vysílačem a přijímačem. Jak je patrné z obrázku č. 20, tyto změny úseků mají jen nepatrný vliv na tvar modulových frekvenčních charakteristik. Rozdíl útlumů je způsoben zejména větší délkou přímé cesty, která je například u simulace č. 4 o 30 metrů delší než u simulace č. 2, což na frekvenci 25 MHz tvoří rozdíl téměř 10 dB.

Tab. 2: Hodnoty délek úseků u provedených simulací

	Délky jednotlivých úseků [m]			
	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek
Simulace č. 1	10	15	20	15
Simulace č. 2	5	20	10	20
Simulace č. 3	25	20	15	10
Simulace č. 4	40	5	15	25



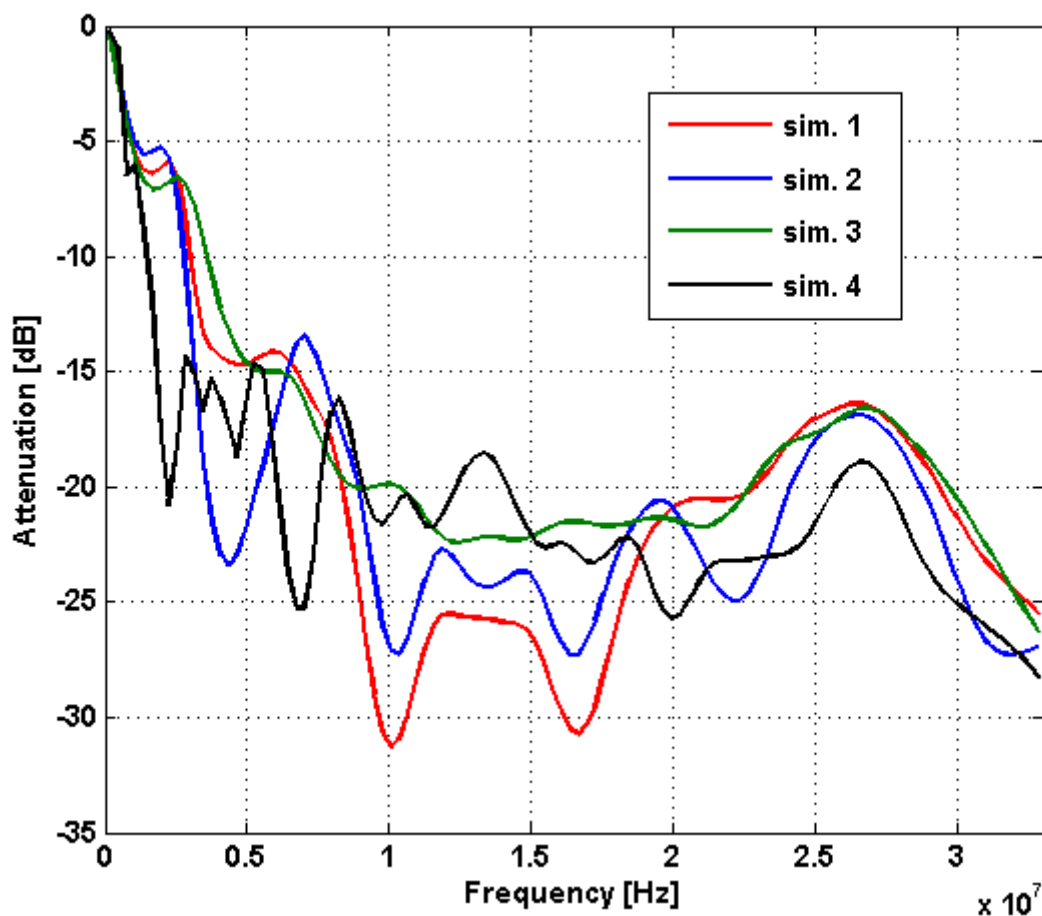
Obr. 20: Modulové frekvenční charakteristiky při změně délky přímé cesty

5.2 Vliv změny délky odbočky na velikosti útlumu

Opět jako v předchozí kapitole byly odsimulovány 4 varianty topologie, tentokrát se změnou délek dílčích odboček. Zde už jsou na průbězích frekvenčních modulových charakteristik patrné větší rozdíly a to zejména v oblasti od 2 do 17 MHz, avšak při celkovém pohledu nedojde k překročení hodnoty útlumu 35 dB ani v jednom ze čtyř případů a tak lze z tohoto úhlu posoudit vliv délky odbočky jako ještě nižší než u změny délky přímé cesty (obrázek č. 21).

Tab. 3: Hodnoty použitých délek odboček

	Délky odboček [m]		
	1. odbočka	2. odbočka	3. odbočka
Simulace č. 1	20	5	5
Simulace č. 2	20	15	5
Simulace č. 3	5	10	1
Simulace č. 4	50	100	30



Obr. 21: Modulové frekvenční charakteristiky při změně délky odbočky

5.3 Vliv změny impedance odbočky

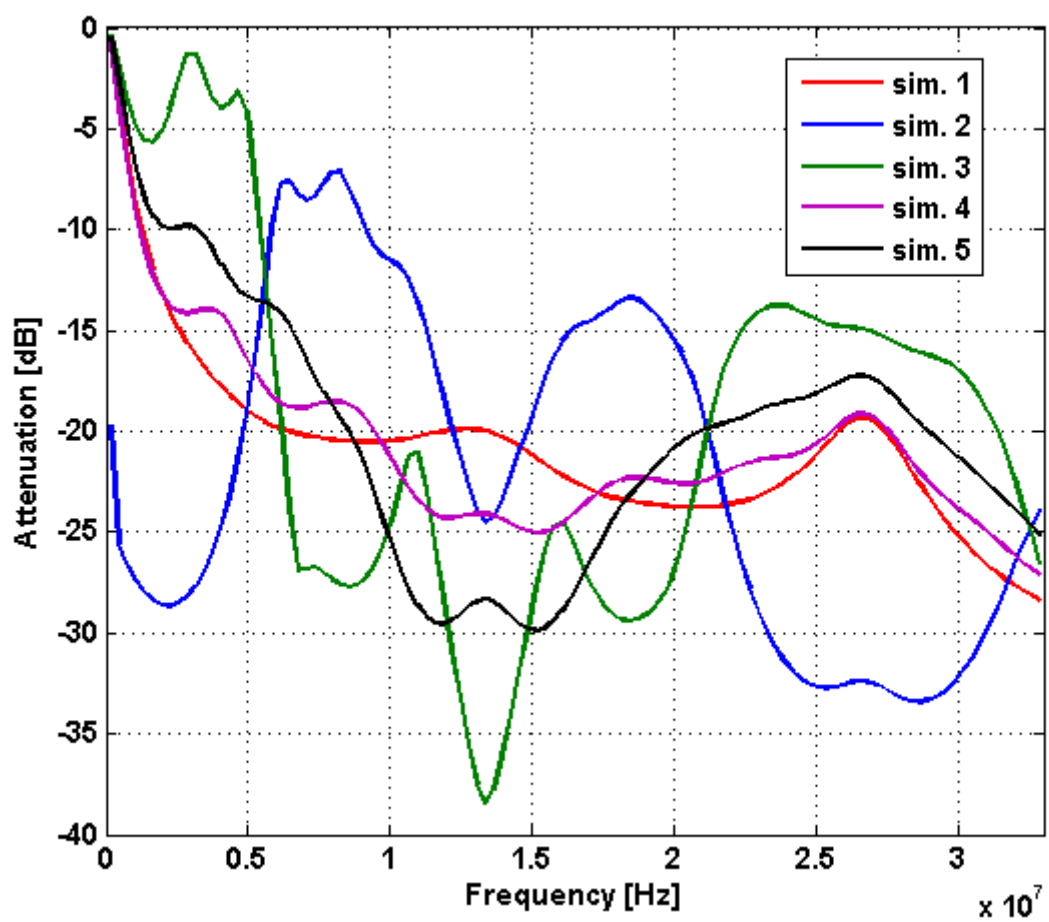
Při zjišťování vlivu impedance odbočky na velikosti útlumu bylo provedeno celkem pět simulací. Jako nejhorší možnost se jeví volba velmi nízké, nebo naopak velmi vysoké hodnoty impedance, viz simulace č. 2 a 3 na obrázku 22. Zejména u maximální impedance se hodnota útlumu téměř dotýkala hranice 40 dB. Naopak jako velmi vhodná se jeví volba hodnoty blízké charakteristické impedanci [4], aplikovaná u simulace č. 1, nebo varianta u simulace č. 4, kde se hodnoty impedancí odboček nejbližší k vysílači či přijímači blíží hodnotám impedancí těchto koncových bodů.

Podobně jako v kapitole 5.1 se i zde objevuje nápadné minimum v oblasti 17 MHz a v některých případech i lokální maximum v okolí 27 MHz, patrné zejména u kapitoly 5.2.

Tab. 4: Hodnoty impedancí jednotlivých odboček

	Impedance odboček [Ω]		
	1. odbočka	2. odbočka	3. odbočka
Simulace č. 1	230	230	230
Simulace č. 2	5	5	5
Simulace č. 3	1e8	1e8	1e8
Simulace č. 4	150	1000	150
Simulace č. 5	100	1000	1000

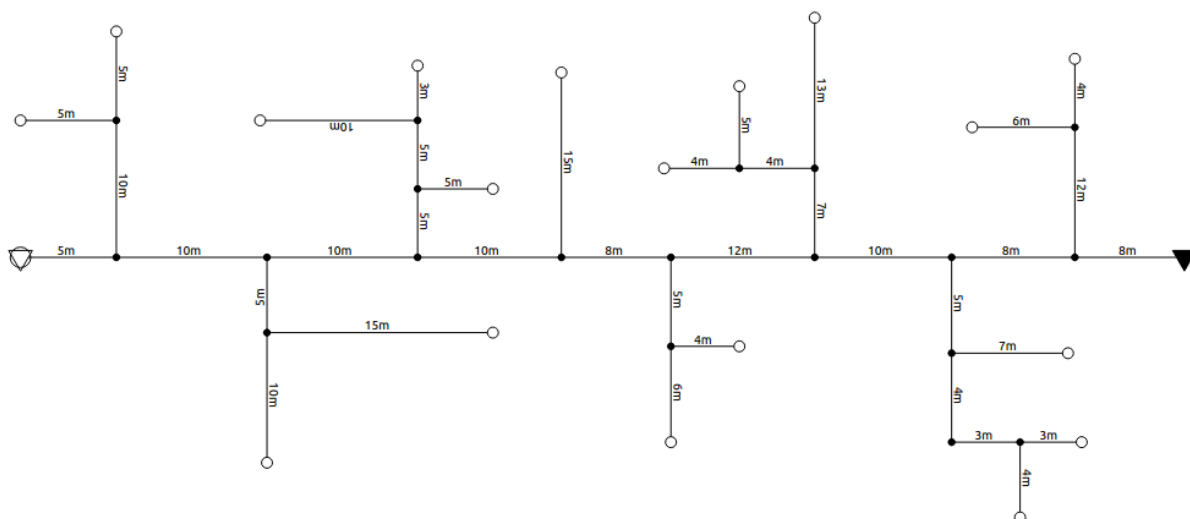
Dílčí modulové frekvenční charakteristiky napříč kapitolou odpovídají použitému kabelu CYKY 3x2,5 ve variantě s výpočtem B. Hodnoty délek a impedancí pro celou pátku kapitolu jsou převzaty z [4], vyjma hodnot impedancí u simulace č. 5. Díky tomu se nabízí možnost porovnání výsledných průběhů mezi simulátory.



Obr. 22: Modulové frekvenční charakteristiky při změně impedance odbočky

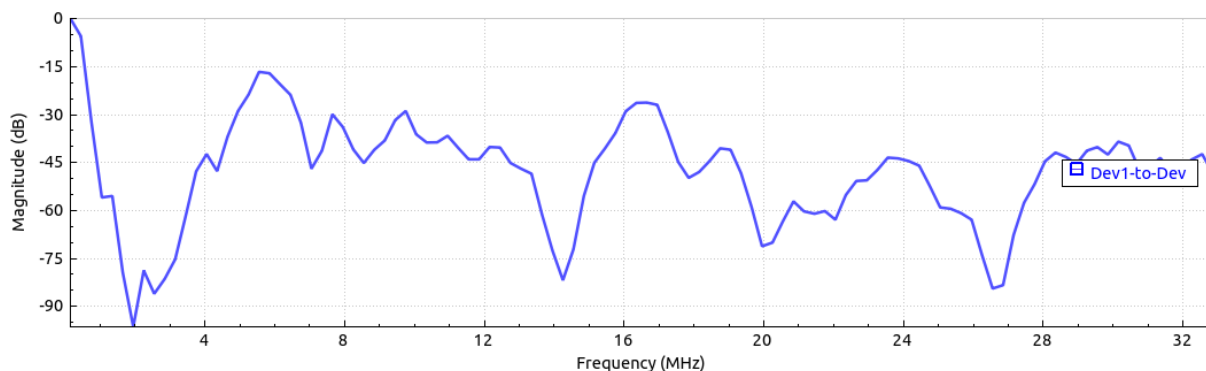
6 VLIV PARAMETRŮ ROZSÁHLÉ TOPOLOGIE

V této části došlo ke značnému rozšíření topologie z předchozí kapitoly z důvodu zjištění míry vlivu jednotlivých parametrů v závislosti na velikosti topologie. Opět byl použit kabel typu CYKY 3x2,5 s výpočtem B pro jeho primární parametry (kapitola 4.1). Impedance všech odboček byla nastavena na tisíc ohmů. Celkový náhled topologie se nachází na obrázku 23.



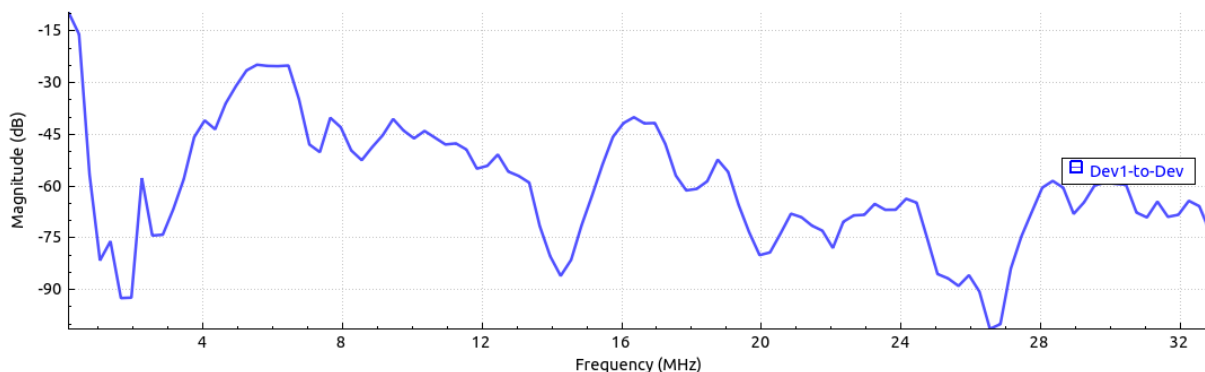
Obr. 23: Rozsáhlá topologie

Tato topologie byla odsimulována a výsledkem byl průběh modulové frekvenční charakteristiky, nacházející se na obrázku 24. V porovnání s průběhy z předchozí kapitoly jsou zde patrné ostřejší změny průběhu při zachované šířce frekvenčního pásma, způsobené zejména četnějšími odrazy od jednotlivých odboček. Také útlum dosahuje na mnohých místech značně vyšších hodnot, na počátku pásma se dokonce propadá pod 90 dB.



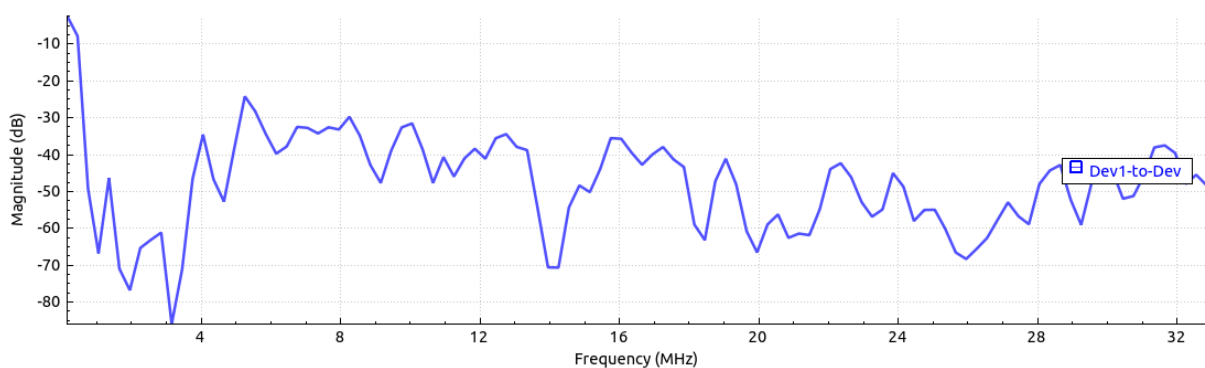
Obr. 24: Modulová frekvenční charakteristika rozsáhlé topologie

Na následujícím obrázku č. 25 se nachází průběh frekvenční charakteristiky po prodloužení přímé cesty o 80 metrů. Konkrétně byl navýšen třetí, čtvrtý a sedmý úsek, a to na hodnoty 30, 50 a 30 metrů. Celkový tvar se v porovnání s předchozím obrázkem (č. 24) mnoho nezměnil až na mírnou změnu útlumů v oblasti lokálních maxim a minim.



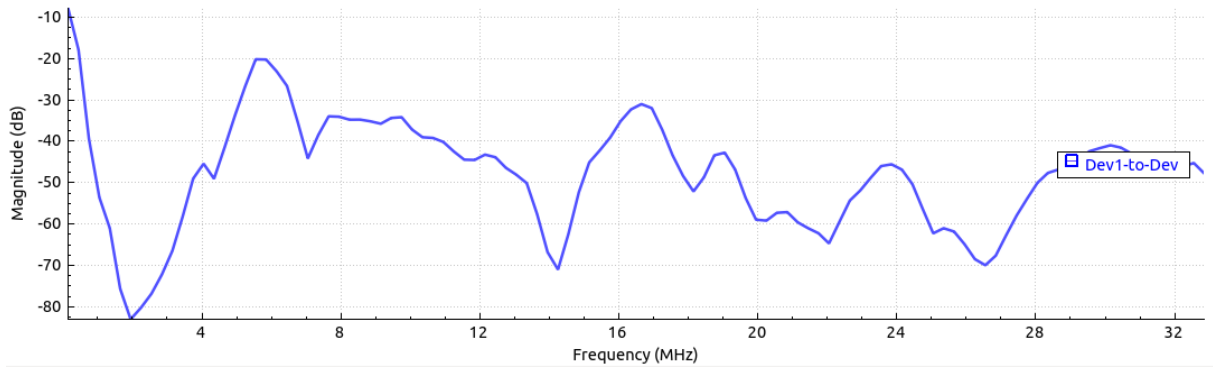
Obr. 25: Frekvenční charakteristika rozsáhlé topologie při změně délky přímé cesty

Poté byly hodnoty navraceny zpět na původní a došlo ke změně v délce některých odboček. Změny byly provedeny na hlavních odbočkách, Tím jsou myšleny ty, které se přímo dotýkají přímé cesty. První byla navýšena na 40 metrů, čtvrtá na 60 metrů a osmá odbočka na 30 metrů. Průběh, nacházející se na obrázku 26, obsahuje ještě více ostrých přechodů a vrubů než průběhy předchozí, ale celkově není změna opět nikterak výrazná.



Obr. 26: Frekvenční charakteristika rozsáhlé topologie při změně délky odbočky

Poslední provedenou změnou bylo snížení impedance jedné koncové odbočky v každé hlavní odbočce na hodnotu sto ohmů. Průběh pak pozbyl menších vrubů a špiček, a zbyly pouze ty nejvýraznější, viz obrázek 27. Při celkovém pohledu je patrné, že průběh ve větší míře kopíruje prvotní průběh ze začátku kapitoly.



Obr. 27: Frek. charakteristika rozsáhlé topologie při změně impedance odboček

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce rozebírá možnosti PLC simulátoru v NS-3. Jak lze vyčíst z druhé kapitoly, v grafickém rozhraní je stále několik míst která by si zasloužila rozšíření či vylepšení. Mezi stávající slabá místa patří nemožnost volby uzlu jako zdroje šumu, nezobrazování jmen uzlů a grafu přenosové funkce u časově proměnné impedance. Dále také ovládání není bezchybné, například absence jakýchkoliv tlačítek v oknech a s tím související nutnost používání klávesových zkratk pro ukládání a otevírání již existujících topologií.

Ve třetí kapitole byly odzkoušeny a analyzovány všechny dostupné příklady a předložen návrh na jejich rozšíření. Mezi ně patří rozšíření kabelového arzenálu, kterým se zabývá první část čtvrté kapitoly. Zde bylo použito dvojího typu výpočtu primárních parametrů kabelu, načež byly oba druhy přidány jak do samotného PLC simulátoru tak i do jeho GUI, ačkoliv ve zbytku práce byl již používán pouze jeden typ a to výpočet B. Ve druhé části lze pak nalézt popis stávajících rušení a rozšíření o domovní a průmyslový šum na pozadí.

Dále je v práci popsán vliv délek jednotlivých úseků a impedancí odboček na velikost útlumu daného kanálu. Ve zkratce lze říci, že v přímé cestě záleží hlavně na celkové délce, se kterou pochopitelně roste útlum. U kratších odboček se jeví průběh frekvenčních charakteristik jako klidnější s menšími vruby. Nejvýraznější změny lze zaznamenat při změnách impedancí dílčích odboček a zde je pochopitelně nejvhodnější se držet charakteristické impedance, ačkoliv výsledky s impedancemi u krajních odboček blízkými hodnotám impedancí na přijímači a vysílači jsou také dostačující.

Z poslední kapitoly lze vyvodit, že s rostoucím rozsahem měřené topologie klesá význam dílčích hodnot délek vedení a impedancí odboček. Nejvýrazněji působí asi změna délky odbočky, ale spíše jen v lokální části spektra, nežli v celkovém dojmu. Závěrem je dle provedených měření možno říci, že poskytnutý PLC simulátor v prostředí NS-3 dosahuje velmi podobných výsledků jako ostatní dostupné PLC simulátory, a díky obsaženému grafickému rozhraní je, alespoň pro méně sofistikovaná měření, uživatelsky přívětivější.

LITERATURA

- [1] **MLÝNEK, P.** *Analýza a modelování datové komunikace po silnoproudém vedení.* [Disertační práce] Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012.
- [2] **MAROCCO, G. a STATOVCI, D.** *FTW.* [<https://portal.ftw.at/public/plc-simulator/>] Wien : Forschungszentrum Telekommunikation Wien, 2012.
- [3] **CORTÉS, J. A.** *Working group on PLC.* [<http://www.plc.uma.es/channels.htm>] Malága : Engineering department, 2012.
- [4] **JEDLIČKA, T.** *Simulátor přenosových funkcí silnoproudého vedení.* [Diplomová práce] Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a telkomunikačních technologií, 2014.
- [5] **SLÁČIK, J.** *Modem pro komunikaci po napájecím vedení.* [Bakalářská práce] Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [6] **SVOBODA, J.** *Využívání silnoproudých vedení a sítí pro přenos zpráv.* Praha : České vysoké učení technické, 2012. 978-80-01-05168-9.
- [7] **BERGER, L., T., a další.** *MIMO Power Line Communications.* London, UK : CRC Press, Únor 2014. 978-1-4665-5753-6.
- [8] **ALAMIFAR, F., a další.** *Modelling Power Line Communication Using Network Simulator-3.* Atlanta, GA, USA : IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Prosinec 2013. http://www.ece.ubc.ca/~faribaa/ns3_plc_software.htm.
- [9] **FENCL, F.** *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení.* Praha : ČVUT FEL, 2013. 978-80-01-04351-6.
- [10] **MLÝNEK, P., KOUTNÝ, J. a MIŠUREC, J.** *Modelování silnoproudých vedení II - simulace ukázkové sítě.* [<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010070002>] Brno : VUT v Brně, 2010. 1214-9675.
- [11] **VIŤAZ, I.** *Meranie primárnych parametrov vedení.* Liptovský Mikuláš, SK : Žilinská univerzita: Elektrotechnická fakulta.
- [12] **MAROCCO, G., STATOVCI, D. a TRAUTMANN, S.** *PLC Broadband Channel Simulator for Indoor Communications.* místo neznámé : ISPLC IEEE, 2013. DOI: 10.1109/ISPLC.2013.6525871.

- [13] **VANČATA, P.** *Standardizace širokopásmových systémů přenosu po energetickém vedení.* [<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2005112801>] Praha : ČVUT FEL, 2005.
- [14] **HRASNICA, H.** *Broadband Powerline Communications Networks: Network Design.* Dresden : Dresden University of Technology, Germany, 2004. 0-470-85741-2.
- [15] **HOŠEK, J.** *Pokročilé komunikační techniky - laboratorní cvičení.* [Skripta] Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2013. 978-80-214-4900-8.
- [16] **ALAMIFAR, F. a LAMPE, L.** *PLC Software - User Guide.* British Columbia, Canada : University of British Columbia, Červen 2013.
- [17] **MLÝNEK, P., KOUTNÝ, J. a MIŠUREC, J.** *Modelování silnoprůdých vedení I - metody.* [<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010070001>] Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2010. 1214-9675.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ANSI	American National Standards Institute
CA	Collision avoidance
CSMA	Carrier sense multiple access
DSL	Digital subscriber line
GUI	Graphical user interface
EIA	Electronic Industries Alliance
FFT	Fast Fourier transform
FSK	Frequency-shift keying
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
ITU-T	International Telecommunication Union
LAN	Local area network
NS-3	Network Simulator-3
OSI	Open Systems Interconnection
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
PLC	Power-line communication
PSD	Power spectral density
S-FSK	Spread frequency-shift keying