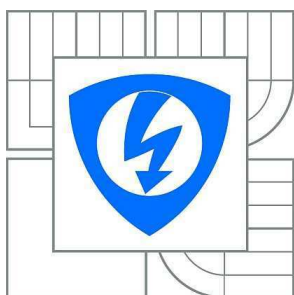


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODEL PŘENOSOVÉHO KANÁLU PRO XDSL SYSTÉMY

MODEL OF TRANSMISSION CHANNEL FOR XDSL SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

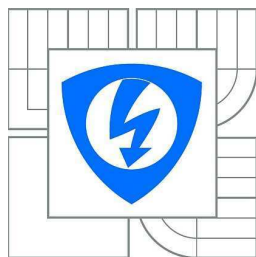
ZDENĚK JEDLIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KRAJSA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Zdeněk Jedlička

ID: 110370

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Model přenosového kanálu pro xDSL systémy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznámte s problematikou modelování přenosového vedení, konkrétně metalického vedení používaného u xDSL systémů. V programu Matlab vytvořte aplikaci umožňující zvolit charakter přenosového vedení a použitý model vedení. Výstupem aplikace bude přenosová charakteristika vedení a koeficienty filtru, který bude tuto charakteristiku aproximovat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Cable reference models for simulating metallic access networks, ETSI STC TM6 meeting, 22 - 26 June 1998, Lulea, Sweden.
- [2] RAUSCHMAYER, D., J., ADSL/VDSL Principles: A Practical and Precise Study of Asymmetric Digital Subscriber Lines and Very High Speed Digital Subscriber Lines. Indianapolis (USA): Macmillan Technical Publishing, 1999. ISBN 1-57870-015-9.
- [3] ZAPLATÍLEK, Karel. MATLAB :tvorba uživatelských aplikací / 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2004. 215 s. ISBN 80-7300-133-0

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 2.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Krajsa

prof. Ing. Kamil Vrba, 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.

ABSTRAKT

Práce seznamuje s xDSL systémy, zobrazuje rozdělení členů skupiny na symetrické a asymetrické a ukazuje možnost modelování přenosového kanálu pro xDSL systémy. Uvádí také způsoby, jak lze získat primární a sekundární parametry kabelů a ukazuje možnost simulace. Tyto parametry jsou použity k výpočtu přenosové funkce, vloženého útlumu a vstupní impedance pomocí programu, který je nedílnou součástí této práce.

ABSTRACT

This bachelor thesis introduces the xDSL systems, shows the distribution of group members to symmetric and asymmetric, and shows the possibility of modeling the transmission channel for xDSL systems. It also gives ways you can get primary and secondary cable parameters and shows the potential of simulation. These parameters are used to calculate the transfer function, embedded input impedance and attenuation using the program, which is an integral part of this work.

KLÍČOVÁ SLOVA

xDSL, simulace, přenosové vedení, xDSL systémy, model vedení

KEYWORDS

xDSL, simulation, transmission line, xDSL systems, leadership model

JEDLIČKA, Z. *Model přenosového kanálu pro xDSL systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 37 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Krajsa.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Model přenosového kanálu pro xDSL systémy“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 1.6.2010

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Krajsovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne 1.6.2010

.....

podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod	11
1 xDSL obecně	12
1.1 Asymetrické xDSL	13
1.2 Symetrické xDSL.....	14
1.3 Připojení uživatele	17
2 Modelování kabelů	19
2.1 Parametry dvojlinky.....	19
2.2 Matice parametrů pro dvojlinku	20
3 Popis používaných kabelových modelů	22
3.1 BT#x modely dvojlinky zaměřené na $\{Z_s, \gamma_p\}$	22
3.2 KPN#x modely dvojlinky zaměřené na $\{Z_s, Y_p\}$	23
3.3 MAR#x model dvojlinky zaměřený na $\{Z_s, \gamma_p\}$	24
3.4 DTAG#1 model dvojlinky zaměřený na $\{\gamma, Z_0\}$	24
3.5 SWC#1 model dvojlinky zaměřený na $\{\gamma, Z_0\}$	25
4 Analýza přenosového kanálu	26
4.1 Parametry ABCD	26
4.2 ABCD parametry pro homogenní kroucenou dvojlinku.....	27
4.2.1 Matice pro volný úsek.....	27
4.2.2 Matice pro nezakončenou odbočku	28

4.3	Analýza smyčky.....	29
4.3.1	Vstupní impedance, přenosová funkce a vložený útlum	30
4.3.2	Základní konfigurace měřené smyčky	32
4.4	Postup při simulaci přenosového kanálu	32
5	Závěr	34
	Literatura	35
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	36
	Seznam příloh	37

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Rozložení pásem u ADSL	12
Obr. 1.2 Schéma připojení k datové síti ADSL nebo VDSL	17
Obr. 4.1 Kaskádní řazení dvou-portových sítí.....	27
Obr. 4.2 Příklad dvou-portové sítě pro kroucenou dvojlinku	28
Obr. 4.3 Nezakončená odbočka	28
Obr. 4.4 Testovací smyčka dle ANSI T1.601 Loop#13	29
Obr. 4.5 Testovací smyčky specifické pro ADSL	31
Obr. 4.6 Vložený útlum, frekvenční charakteristika smyčky ANSI T1.601	
Loop #13 pro $Z_G=100\Omega$ a $Z_L=100\Omega$	33

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Porovnání členů skupiny xDSL	16
Tab. 2.1 Vztahy mezi jednotlivými proměnnými u dvojlinky.....	20
Tab. 2.2 Definice parametrů kabelu z reálných a imaginárních částí.....	20
Tab. 2.3 Rozšířené matice parametrů symetrických kabelů	21

ÚVOD

Hlavním cílem tohoto dokumentu je, aby čtenář získal náhled na možnosti simulování parametrů přenosového kanálu. Pro tento účel byl vytvořen program, který za pomoci prostředí programu Matlab-Simulink je schopný simulovat přenosový kanál pro technologie xDSL, především ADSL. Tento model je založen na aproximaci frekvenční charakteristiky vloženého útlumu pomocí IIR filtrů.

V první části je obecný náhled na danou problematiku, kde jsou popsány základní principy funkce xDSL systémů. Je zde také výpis jednotlivých členů skupiny xDSL, která se dělí na dvě části, a to symetrické a asymetrické.

Ve druhé části je ukázáno, jak je možné z komplexních hodnot jednotlivých empirických modelů získat primární RLCG parametry simulovaného kabelu.

Třetí část se zabývá konkrétním popisem jednotlivých empirických modelů. Jsou zde vyjmenovány jednotlivé druhy modelů simulace metalických kabelů, a to BT#x – British Telecom, KPN#x – Royal PTT Netherland, MAR#x, DTAG#1 – Deutsche Telecom AG a SWC#1 – Swisscom.

V poslední části tohoto dokumentu je názorná ukázka, jak za pomoci zpětných kaskádních matic ABDC lze simulovat celé vedení jako jeden dvou-portový (two-ports) blok složený z volných úseků a nezakončených odboček. Dále je zde popis základních přenosových parametrů a to přenosová funkce, vstupní impedance a vložený útlum.

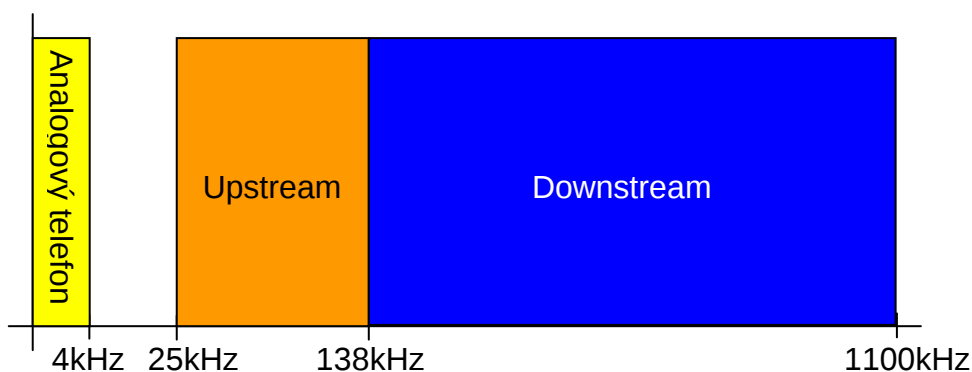
1 XDSL OBECNĚ

Klasické telefonní připojení (dial-up) k veřejné síti Internet již z velké části nahradila nová technologie xDSL.

Z důvodu masového rozšíření Internetu a zvyšující se náročnosti na datové přenosy se již v minulém století objevilo několik způsobů přenosu s rychlostmi vyššími, než poskytuje běžný modem. Mezi ty hlavní patří ISDN, kabelové modemy xDSL a připomeňme také DPL (Digital Power Line – přenos přes rozvody elektrické energie). Ze všech těchto technologií má v současnosti největší potenciál právě xDSL.

Zkratka DSL (Digital Subscriber Line – digitální účastnická linka) v sobě ukrývá technologii schopnou dosahovat na obyčejném měděném telefonním vedení vysokých rychlostí a to až 52 Mb/s (pro VDSL). Uváží-li se, že se tato vedení dosud využívala převážně k běžnému telefonování, je tato hodnota velmi pozitivní. Písmeno x před DSL udává, o kterou z technologií digitálního přenosu se jedná. Nabízí se otázka, jak je možné těchto závratných rychlostí dosáhnout, když na stejném vedení u klasického modemu zdaleka nelze dosáhnout ani teoretických 56 kb/s. Odpověď je třeba hledat ve frekvenčním pásmu a ve způsobu jeho využití. Podrobnější informace jsou v [5]

U klasického telefonního analogového přenosu dat, který je realizován prostřednictvím modemu, je k dispozici přenosové pásmo 4 kHz. U xDSL modemu je pro účely přenosu dat vyhrazeno pásmo vyšších frekvencí. Příklad rozložení pásma u ADSL je vidět na obr 1.1.



Obr. 1.1 Rozložení pásma u ADSL

U xDSL připojení je kvalita a maximální dosažitelná rychlost závislá na vzdálenosti přípojky od telefonní ústředny, a samozřejmě také na kvalitě měděného kabelu. Se vzrůstající vzdáleností a horší kvalitou vedení rychlost klesá. Což je dáno frekvenční charakteristikou kabelu.

Digitální přípojka se realizuje různými způsoby, u nichž se liší technické řešení, výsledná maximální kapacita a vzdálenost uživatelského zařízení od ústředny. Tato skupina respektující tyto požadavky se nazývá **xDSL** v tabulce 1.1 je shrnutí všech běžně používaných xDSL systémů. Liší se modulacemi, souvisejícími přenosovými rychlostmi a také maximálními vzdálenostmi účastníka od ústředny – většinou hlavní limitující faktor pro efektivní nasazení technologie provozovatelem. [3]

Rozdíl je také v tom, zda je kapacita poskytována symetricky nebo asymetricky. První se ujala **asymetrická** řešení xDSL (typicky ADSL), kde kapacita směrem k uživateli byla i řádově vyšší než kapacita v opačném směru, protože to odpovídá klasické práci s Internetem. Jelikož nové aplikace jako videokonference, *web hosting*, sdílení aplikací a způsob práce (*P2P - peer-to-peer*) si vyžadují vyrovnanější kapacitu v obou směrech, tak se v poslední době je tlak na řešení xDSL **symetricky**. Podle vlastností jednotlivých řešení se také liší nejvhodnější nasazení pro různá prostředí. [3]

Jednotlivé členy skupiny xDSL jsou stručně představeny v následujících kapitolách.

1.1 Asymetrické xDSL

ADSL (*Asymmetric DSL*) - větší kapacita směrem k uživateli (teoreticky maximálně do 8 Mbit/s) než směrem od uživatele (do 1 Mbit/s). Provozovatel však většinou omezuje přístupovou rychlost na pouhý zlomek maximální kapacity (64, 128, 256 kbit/s). Na stejném vedení lze současně provozovat analogovou telefonní linku nebo ISDN přípojku. Slabší, jednodušší a levnější variantou ADSL je tzv. G.Lite, s maximální přenosovou rychlostí, v dopředném směru do 1,5 Mbit/s. [3]

ADSL2, ADSL2+, ADSL2++ (*Asymmetric DSL2*) - zvětšení kapacity přenášených dat, hlavně směrem k uživateli, která teoreticky u ADSL2++ dosahuje až 40Mbs/s. V praxi se však této rychlosti nedosahuje z důvodu, že jeden pár využívá více digitálních systémů. Nejjednodušší možností, jak zvýšit maximální dostupnou

přenosovou rychlost ADSL přípojky, je rozšířit kmitočtové pásmo. Touto cestou jde varianta ADSL2+ (doporučení ITU-T G.992.5) s horním kmitočtem pásma 2,208 MHz a ADSL2++ (dosud není standardizováno) s horním kmitočtem pásma 3,75 MHz, která vyšší přenosových rychlostí již dokáže konkurovat přípojkám VDSL pro asymetrické aplikace. [7]

RADSL (*Rate-Adaptive DSL*) - obdoba ADSL, navíc se schopností analyzovat stav komunikačního vedení a tomu přizpůsobit přenosovou rychlost. Kvalita přenosu záleží na délce a na kvalitě telefonního vedení od uživatele k ústředně. Přenosová rychlost se mění buď podle stavu vedení při navazování spojení, anebo během přenosu na základě signálu z ústředny. [3]

1.2 Symetrické xDSL

SDSL (*Symmetric DSL*) - symetrická varianta ADSL, může být také provozována zároveň s analogovou či ISDN přípojkou na jednom vedení do vzdálenosti 6 km. Přenosové rychlosti pro SDSL se pohybují do maximálně E1 (2 Mbit/s), kdy si uživatel může pořídit nejprve 144 kbit/s a se zvyšujícími se požadavky na šířku pásma pak zvyšovat rychlost bez dalších nároků na hardware. [3]

HDSL (*High-bit-rate DSL*) - symetrické využití přenosového pásma s rychlostí do 2,048 Mbit/s (E1) po dvou párech nebo po třech párech, a to na vzdálenost 4 km (s opakovací lze dosáhnout vyšší vzdálenosti). Vylepšené HDSL-2 (založené na SDSL) vystačí s jedním párem telefonních vodičů při zachování stejných parametrů přenosu. [3]

VDSL (*Very-high-bit-rate DSL*) - nejrychlejší varianta xDSL nabízející asymetrické (do 52 Mbit/s v dopředném směru) či symetrické rozložení přenosové kapacity (do 36 Mbit/s v každém směru) po jednom páru telefonních vedení na krátkou vzdálenost do 1 km od telefonní ústředny. Využívá vyšších kmitočtů než ADSL (nad 1 MHz. [3])

IDSL (*ISDN DSL*) - symetrické xDSL na bázi ISDN (*Integrated Services Digital Network*). Jde o plně duplexní datový kanál o přenosové rychlosti 144 kbit/s (součet dvou datových kanálů *B* o přenosové rychlosti 64 kbit/s a jednoho řídicího kanálu *D* o kapacitě 16 kbit/s). Používá stejnou metodu modulace přenosu jako ISDN (2B1Q), ale liší se od ní tím, že není založená na vytáčení, takže se nemusí navazovat spojení v ústředně, proto se také řadí mezi širokopásmové přípojky, jejichž základní vlastností je trvalé připojení (*always on*). Pro připojení modemů IDSL se používá jeden pár vodičů s rozhraním ISDN BRI (*Basic Rate Interface*). IDSL neumožňuje přenášet vedle dat i hlas. Pracuje na vzdálenost 6 km a s opakovači ISDN pro U-smyčku i na větší vzdálenost. [3]

Jak ukazuje tabulka 1.1 převzata ze zdroje [2], technologie xDSL představuje celou řadu různých typů xDSL, které se liší svými vlastnostmi a každá se hodí pro jiný typ využití. Je potřeba rozlišovat, zda se jedná o symetrický nebo asymetrický přenos. V případě symetrického přenosu je rychlost downstream shodná s rychlostí upstream.

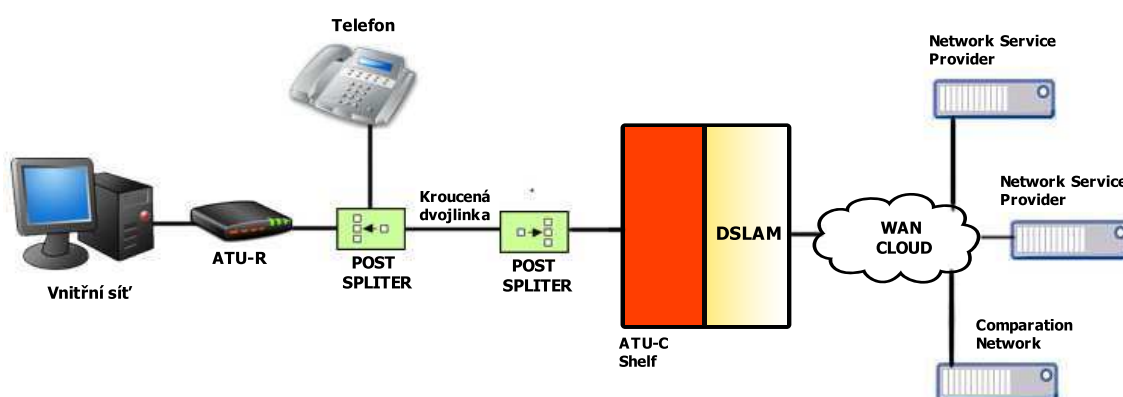
Tab. 1.1 Porovnání členů skupiny xDSL (převzato z [3])

Typ	Popis	Normy	Modulace	Počet párů	Dosah	Rychlost na vedení	Šířka pásma
ADSL	asymetrická DSL	ANSI T1.413, ITU G.992.1	DMT (<i>Discrete MultiTone</i>) s kvadraturní amplitudovou modulací (<i>QAM, Quadrature Amplitude Modulation,</i>)	jeden	2-5 km	do 1 Mbit/s zpětně; do 8 Mbit/s dopředně	25-138 kHz zpětně; 138-1104 kHz dopředně
G.lite	ADSL bez rozdělovače	ITU G.992.2, ANSI T1.419	DMT	jeden	5,5 km	do 1 Mbit/s zpětně; do 1,5 Mbit/s dopředně	25-138 kHz zpětně; 138-552 kHz dopředně
RADSL	DSL s adaptivní rychlostí	ANSI T1.TR.59	CAP (<i>Carriesless Amplitude/Phase</i>)	jeden		do 1 Mbit/s zpětně; do 8 Mbit/s dopředně	25-138 kHz zpětně; 25-1104 kHz dopředně
IDSL	ISDN DSL	ITU. ETSI	2B1Q (<i>Two Binary, One Quaternary</i>)	jeden (2B+1D)	10,7 km	symetricky 144 kbit/s	0-50 kHz
HDSL	rychlá DSL	ITU G.991.1, ETI TS 101 135, ANSI T1.TR.28	2B1Q	dva	4 km	symetricky 1,544 nebo 2 Mbit/s	0-392 kHz (2B1Q) 10-175 kHz (CAP)
HDSL2	jednopárová rychlá DSL	ANSI T1.418, ITU 991.2	2B1Q nebo CAP	jeden	3,5 km (po dvou párech 4 km)	symetricky 1,544 nebo 2 Mbit/s (po 2 párech 4 Mbit/s)	0-392 kHz (2B1Q) 10-175 kHz (CAP)
SDSL	symetrická DSL	-	2B1Q	jeden	3-6 km	symetricky do 2,32 Mbit/s	0-700 kHz
SHDSL	symetrická rychlá DSL	ITU G.991.2, ETSI TS 101 524	16-úrovňová pulzně - amplitudová modulace s mřížkovým (trellis) kódováním (<i>TC-PAM, Pulse Amplitude Modulation</i>)	jeden/dva	2/4 km	symetricky do 2,3 Mbit/s (jeden pár) do 4,6 Mbit/s (dva páry)	0-385 kHz
VDSL	velmi rychlá DSL	ANSI T1.424, ITU G.VDSL, ETSI TS 101 270	DMT nebo QAM	jeden	300-1350 m	do 26 Mbit/s zpětně; do 52 Mbit/s dopředně 36 Mbit/s symetricky	25 kHz- 30 MHz

1.3 Připojení uživatele

Jelikož jsou rychlosti připojení u xDSL systémů mnohonásobně vyšší než u klasického vytáčeného připojení Dial-Up, například ADSL 512 kbps je přibližně 10x rychlejší než připojení analogovým modemem.

Schéma připojení k datové síti ADSL nebo VDSL je znázorněno na Obr. 1.2. Jednotlivé bloky jsou vysvětleny v následujícím textu. Podrobnější popis je možné nalézt v [4].



Obr. 1.2 Schéma připojení k datové síti ADSL nebo VDSL

Zákaznické rozhraní

Je velké množství možností, jak může být koncový zákazník připojen. Společné rozhraní zahrnuje jak 10BaseT tak i 26.5 Mbps ATM (často nazývané jako ATM-25). Je zde hodně společných vysokorychlostních rozhraní, které lze využít pro komunikaci s PC. Jedno z rozhraní používaných v PC je síťová karta často nazývaná NIC (Network Interface Card). Další možností, jak připojit uživatele, je pomocí USB (Universal Serial Bus), ale toto rozhraní je typické spíše pro domácí použití.

POST Splitter

POST Splitter umožňuje oddělit ADSL nebo VDSL signál od telefonního signálu. POST splitter je potřebný na každém konci vedení (kroucené dvojlinky). Na jedné straně má funkci slučovače a na straně druhé rozbočovače.

POST splitter je jednoduché zařízení se třemi porty, které plní stejnou funkci jako obousměrná horní a dolní propust. Toto zařízení by mělo být zcela nebo alespoň z části (v případě ATU-R) zahrnuto do zařízení ATU-R a ATU-C.

Kroucená dvojlinka

Kroucená dvojlinka je tvořena stáčením dvou vodičů po celé jejich délce. Jejich obvyklá délka většinou nepřesahuje 5,5 km pro ADSL a 1,4 km pro VDSL. Samozřejmě platí, že čím je vzdálenost větší, tím se snižuje maximální přenosová rychlost.

xTU-R

Modem xTU-R je na straně zákazníka (domácnost, kancelář, atd.). xTU-R modem může být externí zařízení, karta vložená v PC, nebo v případě rozsáhlejších sítí může být integrován přímo v routeru. Pro ADSL se tento modem nazývá ATU-R a pro VDSL je název VTU-R

xTU-C

Tento modem je na druhé straně proti xTU-R a to v ústředně, ke které je zákazník připojen. xTU-C je fyziky jedna z mnoha karet, která je vložená v přístupovém poli s mnoha dalšími. Na jedné kartě je integrováno více modemů, které pracují nezávisle na sobě. Pro ADSL se tato část nazývá ATU-C a pro VDSL je název VTU-C. Ještě je možné setkat se s názvem VTU-O, který vypovídá o tom, že se jedná o zařízení pracující s optickými kabely a je určeno pro VDSL.

DSLAM

DSLAM (Digital Subscriber Line Access) slouží k multiplexování uživatelských dat na vysokorychlostní páteřní síť a naopak.

NSP síť

NSP (Network Service Provider) síť je důležitou částí pro dosažení všech služeb, které využívají síť. NSP je obecný název zahrnující Internet service provider, distribuční síť a mnoho dalších typů providerů, které využívají přístup přes xDSL síť.

2 MODELOVÁNÍ KABELŮ

V následujících podkapitolách je pojednáno o způsobu modelování metalických kabelů a je zde popsán způsob získání primárních a sekundárních parametrů simulovaného vedení. Popis jednotlivých modelů je možno nalézt v kapitole 3.

2.1 Parametry dvojlinky

Jsou zde popsány homogenní kabely, kde platí:

- *parametr* – odkazuje na veličinu závislou na frekvenci
- *konstanta* – odkazuje na veličinu nezávislou na frekvenci.

Písmeno x vyjadřuje délku kabelu, přičemž je možné konstatovat, že např. R_{sx} ukazuje na primární parametr (sériová impedance), který je závislý na délce x . Pokud je délka vynechána, jedná se o parametr celého kabelu. Délka se většinou udává v metrech (m), někdy je však udávána i v kilometrech (km). Jako výchozí hodnota délky se zde bude uvažovat jeden metr. [1, str. 4]

Dvojice komplexních parametrů umožňují úplný lineární popis symetrického kabelu. Jedná se o primární parametry RLCG (získané z Z_{sx} , Y_{px}), sekundární parametry (γ_x , Z_0) a další, které lze použít pro vytvoření matice parametrů.

Primární parametry mají tu výhodu, že když se blíží frekvence k nule, $\{Z_{sx}, Y_{px}\}$ zůstávají reálné, zatímco sekundární parametr Z_0 se blíží k velmi vysokým hodnotám, případně k nekonečnu, pokud je Y_{px} nula. Z tohoto důvodu je výhodou, když jsou modely založené na primárních parametrech. Na druhou stranu, všechny kabelové parametry mohou být jednoznačně vyjádřeny i ze sekundárních parametrů. Toto ale neplatí pro parametry jako jsou impedance zkratovaného a rozpojeného kabelu (Z_{ocx} , Z_{scx}), přenosovou charakteristiku (S_{TX}) a odraz (s_R). Je to proto, že logaritmické a inverzní goniometrické funkce nemají reálné kořeny. Vztahy mezi jednotlivými parametry jsou uvedeny v tabulce 2.1. [1 str. 4 - 8]

Tab. 2.1 Vztahy mezi jednotlivými proměnnými u dvojlinky (převzato z [1, str. 5])

Parametry symetrického kabelu		
Analýza	Syntéza	Popis
$Z_{sx} = \gamma_x \cdot Z_0$ $Y_{px} = \gamma_x / Z_0$	$\gamma_x = \sqrt{Z_{sx} \cdot Y_{px}}$ $Z_0 = \sqrt{Z_{sx} / Y_{px}}$	základní parametry kabelu (sériová impedance a paralelní-admitance)
$Z_{ocx} = Z_0 / \tan(\gamma_x)$ $Z_{scx} = Z_0 \cdot \tan(\gamma_x)$	$\gamma_x = \arctan(\sqrt{Z_{scx} / Z_{ocx}})$ $Z_0 = \sqrt{Z_{ocx} \cdot Z_{scx}}$	Vstupní impedance s otevřeným nebo zkratovaným výstupem kabelu o délce x.
$S_{Tx} = \exp(-\gamma_x)$ $S_R = (Z_0 - R_N) / (Z_0 + R_N)$	$\gamma_x = -\ln(STx)$ $Z_0 = R_N \cdot (1 + s_R) / (1 - s_R)$	charakteristika přenosu a odrazu na normalizované referenční impedanci RN

V případě, že je kabel po celé jeho délce dokonale symetrický, tak platí, že $\gamma_x = \gamma \cdot x$ je přímo úměrné délce kabelu x. To stejné platí pro $Z_{sx} = Z_s \cdot x$ a $Y_{px} = Y_p \cdot x$. Primární a sekundární parametry jsou určovány z reálných a imaginárních částí. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2. Výchozí jednotka α_x je v Neperech (Np) a β_x je v radianech (rad). Jednotky jsou Np/m a rad/m, standardně však postačuje napsat α a β . [1, str. 5]

Tab. 2.2 Definice parametrů kabelu z reálných a imaginárních částí

$\alpha_x = \text{real}(\gamma_x)$ $\beta_x = \text{imag}(\gamma_x)$	$R_{sx} = \text{real}(Z_{sx})$ $L_{sx} = \text{imag}(Z_{sx} / \omega)$	$G_{px} = \text{real}(Y_{px})$ $C_{px} = \text{imag}(Y_{px} / \omega)$
---	---	---

2.2 Matice parametrů pro dvojlinku

Dvojice sekundárních parametrů kabelu (γ_x , Z_0) umožňují jednoznačný výpočet symetrické matice pro danou dvojlinku. V případě, že kabel není dokonale symetrický, tak je nezbytný třetí parametr kabelu q. Tento případ není v této práci dále popisován. V případě dokonale homogenního kabelu, kdy je dvojlinka symetrická, platí že $q = 1$, $\alpha = \gamma / \gamma_x$, x je přímo úměrné délce kabelu. V tabulce 2.3 a tabulce 2.4 jsou shrnuty související výrazy pro napětí, proud a vlnovou charakteristiku. Patří k nim vlnová charakteristika pro případy, že charakteristický přenos a odraz (S_{Tx} , s_R) není znám.

Rozptyl (vlnový) a parametry přenosu (s- a t-parametry) jsou normalizovány na libovolnou zvolenou reálnou referenční impedanci R_N . V případě HDSL nebo VDSL jsou preferované hodnoty $R_N = 135\Omega$ a to z důvodu, že podle ETSI jsou modemy konstruovány s touto hodnotou. [1, str. 5]

Tab. 2.3 Rozšířené matice parametrů symetrických kabelů (převzato z [1, str. 6])

Matice parametrů (symetrické, q=1)	
$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{12} & z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 / \tan(\gamma_x) & Z_0 / \sin(\gamma_x) \\ Z_0 / \sin(\gamma_x) & Z_0 / \tan(\gamma_x) \end{bmatrix}$	
$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{12} & s_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{(Z_0 / R_n + R_n / Z_0) \cdot \tan(\gamma_x) + 2} \times \begin{bmatrix} (Z_0 / R_n - R_n / Z_0) \cdot \tan(\gamma_x) & 2 / \cos(\gamma_x) \\ 2 / \cos(\gamma_x) & (Z_0 / R_n - R_n / Z_0) \cdot \tan(\gamma_x) \end{bmatrix}$	
$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_x) & Z_0 \cdot \sin(\gamma_x) \\ \sin(\gamma_x) / Z_0 & \cos(\gamma_x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$	
$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_0 / R_n + R_n / Z_0) / 2 \cdot \sin(\gamma_x) + \cos(\gamma_x) & (Z_0 / R_n + R_n / Z_0) / 2 \cdot \sin(\gamma_x) \\ (Z_0 / R_n + R_n / Z_0) / 2 \cdot \sin(\gamma_x) & -(Z_0 / R_n + R_n / Z_0) / 2 \cdot \sin(\gamma_x) + \cos(\gamma_x) \end{bmatrix}$	
Matice parametrů vlnové závislosti (symetrické, q=1)	
$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{12} & s_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 - (s_R \cdot s_{Tx})^2} \times \begin{bmatrix} s_R \cdot (1 - s_{Tx}^2) & s_{Tx} \cdot (1 - s_R^2) \\ s_{Tx} \cdot (1 - s_R^2) & s_R \cdot (1 - s_{Tx}^2) \end{bmatrix}$	
$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{12} & t_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 - s_R^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 / s_{Tx} - s_R^2 \cdot s_{Tx} & s_{Tx} \cdot s_R - s_R / s_{Tx} \\ s_R / s_{Tx} - s_R \cdot s_{Tx} & s_{Tx} - s_R^2 / s_{Tx} \end{bmatrix}$	

Všechny parametry jsou funkčně stejné, ale jejich aplikace se může lišit. Důležité je také dávat pozor na přesnost hodnot (zaokrouhlování), linky nulové délky, impedance, přenosu, odrazu nebo nulovou frekvenci. V těchto případech může jedna matice ovlivnit výsledek druhé.

S-parametry, normalizované na R_N , lze poměrně jednoduše získat, protože zdroj i zátěž má stejnou charakterickou impedanci R_N . V tomto zvláštním případě se parametr s_{21} rovná poměru napětí U_2/U_1 . [1, str. 8]

3 POPIS POUŽÍVANÝCH KABELOVÝCH MODELŮ

V této kapitole jsou popsány jednotlivé druhy modelů simulace metalických kabelů, a to BT#x – British Telecom, KPN#x – Royal PTT Netherland, MAR#x, DTAG#1 – Deutsche Telecom AG a SWC#1 – Swisscom.

3.1 BT#x modely dvojlinky zaměřené na $\{Z_s, \gamma_p\}$

Model BT#1 (British Telecom) je zaměřen na modelování (Z_s, γ_p). Model je schopen předpovědět vlastnosti kabelu od DC až do desítek MHz a je uveden v rovnicích 3.1 – 3.4.

$$\gamma_p(f) = (g_0 \cdot f^{N_{ge}}) + j \cdot 2\pi f \cdot (C_\infty + C_0 / f^{N_{ce}}) \quad [\Omega / km] \quad (3.1)$$

$$Z_s(f) = \sqrt[4]{R_{oc}^4 + a_c \cdot f^2} + j \cdot 2\pi f \cdot \left(\frac{L_0 + L_\infty \cdot (f / f_m)^{N_b}}{1 + (f / f_m)^{N_b}} \right) \quad [S / km] \quad (3.2)$$

BT#0 (rovnice 3.1 a 3.2) model využívá jedenáct konstant parametrů kabelů a je schopný modelovat od DC až po maximální dosažitelnou frekvenci.

$$Z_s(f) = \left(\frac{1}{\sqrt[4]{R_{oc}^4 + a_c \cdot f^2}} + \frac{1}{\sqrt[4]{R_{os}^4 + a_s \cdot f^2}} \right) + j \cdot 2\pi f \cdot \left(\frac{L_0 + L_\infty \cdot (f / f_m)^{N_b}}{1 + (f / f_m)^{N_b}} \right) [\Omega / km] \quad (3.3)$$

$$\gamma_p(f) = (g_0 \cdot f^{N_{ge}}) + j \cdot 2\pi f \cdot (C_\infty + C_0 / f^{N_{ce}}) \quad [S / km] \quad (3.4)$$

BT#1 (rovnice 3.3 a 3.4) model využívá třináct konstant parametrů kabelů a s jeho využitím lze předpovídat vlastnosti kabelů od DC až po maximální dosažitelnou frekvenci. Pokud ovšem R_{os} jde k nule tak se z modelu BT#1 stává model BT#0. [1, str. 12]

3.2 KPN#x modely dvojlinky zaměřené na $\{Z_s, Y_p\}$

Model KPN#0 a KPN#1 (Royal PTT Holandsko), je zaměřen na modelování (Z_s, γ_p). Tyto modely se výrazně liší od BT#1 a DTAG#1 modelů, protože popisují účinek skin efektu spíše způsobem fyzikálních veličin. Výsledkem jsou čtyři dominantní konstanty chování. Bylo dodáno sedm konstant pro jemné doladění, ale v praxi se používá pouze pět z nich, zbylé dvě jsou nadbytečné. KPN modely jsou uvedeny v rovnicích 3.5 – 3.9 a jsou také schopny předvídat vlastnosti kabelů od DC do desítek MHz.

$$Z_{s0}(\omega) = j \cdot \omega \cdot Z_{0\infty} / c + R_{ss00} \cdot (1/4 + \chi \cdot \cot(4/3 \cdot \chi)) \quad [\Omega / km] \quad (3.5)$$

$$Y_{p0}(\omega) = j \cdot \omega \cdot Z_{0\infty} / c + (\tan(\phi) / Z_{0\infty}) / c \cdot \omega \quad [S / km] \quad (3.6)$$

$$\chi = \chi(\omega) = (1 + j) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{\mu_0}{R_{ss00}}} \quad (3.7)$$

KPN#0 (rovnice 3.5 a 3.6) je zjednodušený model založený na pouhých čtyřech konstantách, pomocí nichž popisuje základní chování kabelů. V těchto výrazech se používají $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] - Permeabilita vakua, c - rychlost světla ve vakuu ($c_0 = 3 \cdot 10^8$ [m/s]). Asymptotická řada indukčnosti a kapacitního zkratu $L_{s\infty} = Z_{0\infty} / c$, $C_{p\infty} = 1/(c \cdot Z_{0\infty})$.

$$Y_{p0}(\omega) = j \cdot \omega \cdot Z_{0\infty} \cdot 1/c \cdot (1 + (K_c - 1)/(1 + (\omega/\omega_{c0})^N)) + \tan(\phi)/(Z_{0\infty} \cdot c) \cdot \omega^M \quad [\Omega / km] \quad (3.8)$$

$$Z_{s0}(\omega) = j \cdot \omega \cdot Z_{0\infty} \cdot 1/c + R_{ss00} \cdot (1 + K_1 \cdot K_2 \cdot (\chi \cdot \cot(4/3 \cdot \chi) - 3/4)) \quad [S / km] \quad (3.9)$$

$$\chi = \chi(\omega) = (1 + j) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{\mu_0}{R_{ss00}} \cdot \frac{1}{K_n \cdot K_f}} \quad \omega_{c0} = 2\pi \cdot f_{c0}$$

KPN#1 (rovnice 3.8 a 3.9) model je mnohem realističtější než model KPN#0. Je založen na jedenácti konstantách pro rozsah od DC do maximální frekvence. V mnoha případech stačí když $K_n = 1$ a $M = 1$. [1, str. 12, 13]

3.3 MAR#x model dvojlinky zaměřený na { Z_s, γ_p }

Modely MAR#1 a MAR#2 jsou podobné s modelem KPN#0, ale respektují Hilbertovu podmínku mezi reálnou a imaginární částí Z_s a Y_p. Tato podmínka je nezbytně nutná pro modely kabelů, které mají skutečnou impulsní odezvu. Některé z modelů předpovídají impulsní odezvu, která má také imaginární část a ta má smysl a výhodu v simulacích v časové oblasti. [1 str. 13]

$$Z_s(f) = j \cdot \omega \cdot L_\infty + R_0 \cdot (0,25 + 0,75 \cdot \sqrt{1 + a \cdot s \cdot (s + b) / (s + c)}) \quad [\Omega / km] \quad (3.10)$$

$$\gamma_p(f) = \omega \cdot C_f \cdot (j + \tan \delta) = j\omega C_{1MHz} \times (j \cdot f_{1MHz})^{-2\delta/\pi} \quad [S / km] \quad (3.11)$$

poznámka: $s = \frac{\mu_0 \cdot j \cdot f}{0,75^2 \cdot R_0}, C_f = \frac{C_{1MHz}}{f_{1MHz}^{2\delta/\pi}}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} [H / km]$

MAR#1 (rovnice 3.10 a 3.11) model využívá všechny proměnné uvedené ve vzorcích (3.10) a (3.11), zatímco model MAR#2 používá tyto konstanty: b = 2 a c = 2,765. [2, str. 3,4]

3.4 DTAG#1 model dvojlinky zaměřený na {γ, Z₀}

DTAG#1 (rovnice 3.12 až 3.15), (Deutsche Telekom AG), je zaměřena spíše na modelování {γ, Z₀} než na modelování {Z_s, γ_p}. Tento model je schopen modelovat celý frekvenční rozsah od DC až 30 MHz. Ale to má za následek velký rozdíl mezi měřeními a modelováním. Například pro kabel 0.35 mm o délce 100 m je rozdíl 0,16 dB při 400 kHz. Při simulaci 3 km dlouhého kabelu je chyba 4.8 dB.

Při aproximaci modelu by neměl být rozdíl větší než 0.006 dB (100m), je-li frekvenční rozsah mezi 0 a 30 MHz, tak se rozděluje do tří řad. Tato aproximace byla omezena na α(f), jenž byla vyloučena potvrzováním pro Z₀ pod 75kHz.

$$\gamma(f) = (K_{a1} + K_{a2} \cdot (f/10^6)^{K_{a3}}) \cdot \frac{\ln(10)}{20} + j \cdot (K_{b1} \cdot (f/10^6) + K_{b2} \cdot \sqrt{f/10^6}) [1/km] \quad (3.12)$$

$$Z_0(f) = (K_{z1} + K_{z2} \cdot (f/10^6)^{K_{z3}}) \cdot \exp[(-j \cdot K_{x1}) / (K_{x2} + f/10^6)^{K_{x3}}] \quad [\Omega] \quad (3.13)$$

$$Z_s(f) = Z_0 \cdot \gamma \quad [\Omega / km] \quad (3.14)$$

$$Y_p(f) = \text{clip}[\text{real}(\gamma / Z_0)] + j \cdot \text{imag}(\gamma / Z_0) \quad [S / km] \quad (3.15)$$

DTAG#1 model popisuje kabel přes celý frekvenční rozsah pomocí jedenácti konstant. *Clip* - je funkce, jejíž výsledek může být pouze kladné číslo: $\text{clip}(+x) = x$ a $\text{clip}(-x) = 0$. Je nutné, aby výpočet matice parametrů probíhal z (Z_s, Y_p) a nikoli z (γ, Z_0) , protože kvocient (γ/Z_0) má tendenci mít při nízkých frekvencích nereálné hodnoty záporné. [1, str. 13, 14]

3.5 SWC#1 model dvojlinky zaměřený na $\{\gamma, Z_0\}$

Model SWC#1 - Swisscom (rovnice 3.16 a 3.17), je zaměřen spíše na modelování (γ, Z_0) než na modelování (Z_s, γ_p) . Tento model je platný pro široký frekvenční rozsah, ale při nízkých frekvencích je nereálný (např. pod 10 kHz). Toto je však typické pro modely zaměřené na (γ, Z_0) . Toto omezení je relativní při simulaci ve frekvenční oblasti, ale stává se handicapem v časové oblasti. Model SWC#1 používá třináct konstant parametrů kabelů. [1, str. 14]

$$Z_0(f) = Z_{00} \cdot (1 + f_1 / f)^{N_{e1}} \cdot \exp[j \cdot (-\pi / 4 + c_1 \cdot \tan(f / f_2))] \quad [\Omega / km] \quad (3.16)$$

$$\gamma(f) = c_2 \cdot \frac{\ln(10)}{20} \cdot \left(\frac{1 + f / f_4}{1 + f_3 / f} \right)^{N_{e2}} + \frac{j\pi}{180} \cdot c_3 \cdot \left(\frac{f}{f_5} \right)^{N_{e3}} \cdot \left(1 + \frac{f}{f_5} \right)^{N_{e4}} \quad [S / km] \quad (3.17)$$

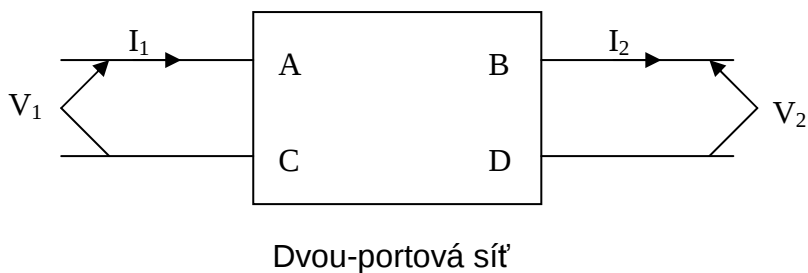
Dobré simulační modely se vyznačují vynikajícím popisem přenosových vlastností v provozní situaci, ovšem za cenu horšího popisu dalších aspektů. Důležité je, aby byl dobrý přenosový parametr γ (převážně ve vysokých frekvencích) a charakterická impedance Z_0 (převážně při nízkých frekvencích) je obvykle mnohem lepší, než model, který je optimalizován, aby základní parametry byly podány s co nejmenší chybou. [1, str. 19]

4 ANALÝZA PŘENOSOVÉHO KANÁLU

V této kapitole je znázorněn způsob analýzy přenosových parametrů kroucené dvojlinky. Pro tento účel se používá nejčastěji zpětná kaskádní matice ABCD jejíž parametry budou popsány dále. Z této matice je dále možné počítat vstupní impedanci, přenosovou funkci a vložený útlum na vedení. Pojednání v této kapitole je podrobněji rozebráno v [4].

4.1 Parametry ABCD

ABCD parametry jsou charakteristické pro two-port síť. Tato síť je charakteristická tím, že má jeden port vstupní a jeden výstupní. Z tohoto se vychází při výpočtech všech přenosových funkcí. Tyto funkce lze matematicky vyjádřit za pomoci tří veličin a to: vstupní napětí, výstupní napětí a protékajícím proudem. Na Obr. 4.1 je možné vidět dvouport s vyznačenými veličinami. V_1 a I_1 jsou vstupní veličiny, V_2 a I_2 jsou výstupní veličiny.

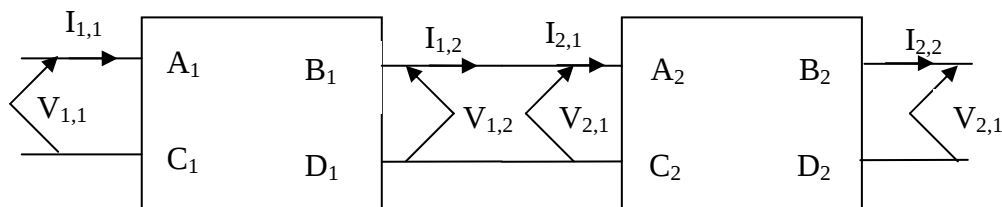


Obr. 4.1 Obecná dvou-portová (two-port) síť

V rovnicích 4.1 je charakterizována síť z předcházejícího obrázku bez zakončování impedance. Parametry A,B,C a D jsou specifické pro přenosovou funkci sítě.

$$\begin{aligned} V_1 &= AV_2 + BI_2 \\ I_1 &= CV_2 + DI_2 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Na Obr. 4.1 je znázorněn způsob kombinací sítí s různými charakteristickými ABCD parametry.



Obr. 4.1 Kaskádní řazení dvou-portových sítí

Výsledné ABCD parametry získáme maticovým násobením jednotlivých systémů. Pro Obr. 4.1 získáme výsledné parametry takto:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 A_2 + B_1 C_2 & A_1 B_2 + B_1 D_2 \\ C_1 A_2 + D_1 C_2 & C_1 B_2 + D_1 D_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

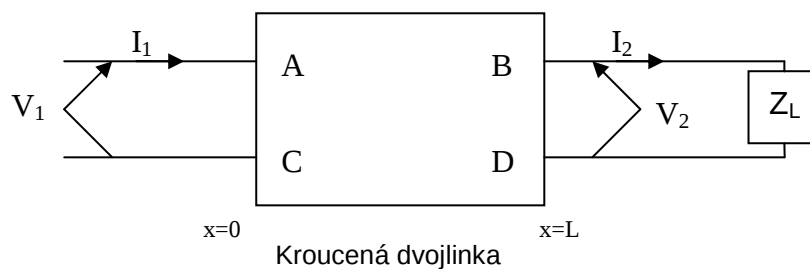
V případě, že potřebujeme najít parametry složitější sítě, poté podle vzoru Obr. 4.1 řadíme systémy kaskádně za sebe a výsledné parametry získáme maticovým násobením všech zařazených sítí. Je to nejjednodušší způsob pro výpočet charakteristických vlastností sítě.

4.2 ABCD parametry pro homogenní kroucenou dvojlinku

Pro homogenní kroucenou dvojlinku je nalezení ABCD parametrů o něco málo složitější než pro samotné rozprostřené parametry.

4.2.1 Matice pro volný úsek

V případě, že daný úsek vedení je zakončený charakteristickou impedancí Z_L a jeho délka nabývá reálných hodnot od $x = 0$ až po $x = L$, jak je uvedeno na Obr. 4.2,



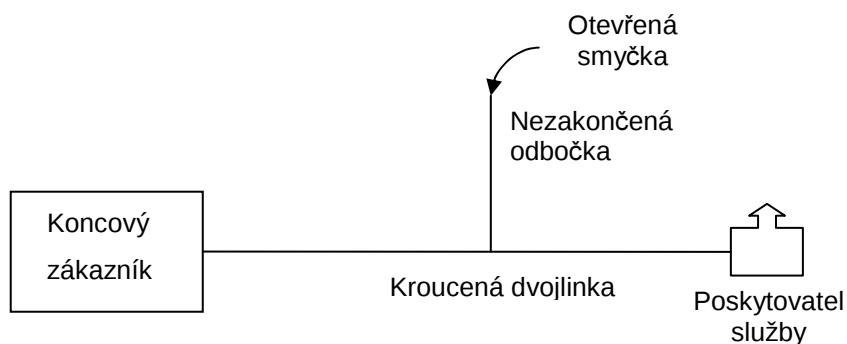
Obr. 4.2 Příklad dvou-portové sítě pro kroucenou dvojlinku

je možné zapisovat zpětnou kaskádní matici ve tvaru uvedeném v rovnici 4.3, kde L je rovna délce kroucené dvojlinky, γ je měrná míra přenosu a Z_0 je obrazová impedance. Přesnější popis je možné získat v [4].

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \cdot L) & Z_0 \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \\ \frac{\sinh(\gamma \cdot L)}{Z_0} & \cosh(\gamma \cdot L) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.2.2 Matice pro nezakončenou odbočku

V případě, že je v některém bodě po celé délce hlavního vedení připojena na kroucenou dvojlinku nezakončená (otevřená) smyčka, nazývá se tato část nezakončená odbočka, v literatuře často uváděna pod názvem *bridged tap*. Tento stav je znázorněn na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Nezakončená odbočka

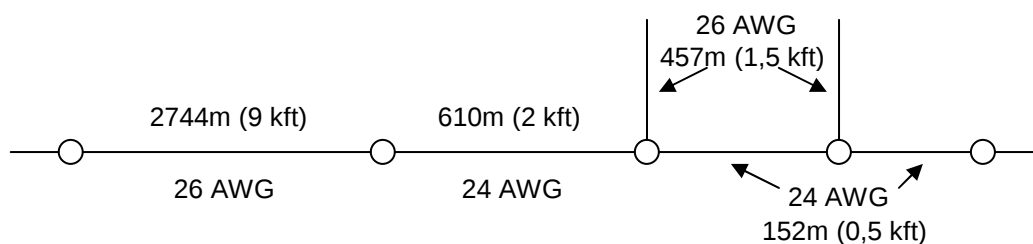
ABCD matice pro nezakončenou odbočku je popsána v rovnici (4.4), kde L_{tap} je rovná délce nezakončené odbočky, γ je měrná míra přenosu a $Z_{0,tap}$ je obrazová impedance. Přesnější popis je možné získat v [4].

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{in_{tab}}} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{0,tap} \cdot \coth(\gamma \cdot L_{tab})} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

4.3 Analýza smyčky

Tato analýza slouží k nalezení ABCD parametrů pomocí maticového násobení dílčích matic úseků jednotlivých sekcí celé smyčky.

Jako příklad lze uvést jednu z mnoha základních testovacích smyček ANSI T1.601 Loop #13, která je znázorněna na Obr. 4.4. Více testovacích smyček je zobrazeno v kapitole 4.3.1.



Obr. 4.4 Testovací smyčka dle ANSI T1.601 Loop#13

Tato testovací smyčka se skládá celkem ze čtyř úseků a dvou nezakončených odboček. Pro získání výsledných parametrů této smyčky je zapotřebí nejdříve vypočítat ABCD parametry pro jednotlivé úseky a nezakončené odbočky, které se následně vynásobí. Z důvodu, že je zapotřebí získat parametry v závislosti na frekvenci, přepočítává se celý úsek přes celý měřený interval. Z výsledné 3D matice je možné získat charakteristické vlastnosti kroucené dvojlinky, jako je *vstupní impedance*, *přenosová funkce* a *vložený útlum*. Podrobnější popis, jak je možné tyto vlastnosti získat, je uvedeno v kapitole 4.3.1.

4.3.1 Vstupní impedance, přenosová funkce a vložený útlum

Pro tuto analýzu smyčky jsou nezbytné ABCD parametry testované smyčky. Je také potřebné znát hodnoty impedance zdroje (generátoru) a zakončovací impedanci, často nazývané zdrojová impedance, popřípadě source impedance (impedance generátoru) a termination impedance (impedance zátěže).

Impedance generátoru se značí Z_g a impedance zátěže Z_L . Ve skutečnosti je Z_g součástí vysílače a Z_L je součástí přijímače. Vstupní impedance je funkcí impedance smyčky a zátěže. Přenosová funkce je poměr mezi vstupním a výstupním napětím smyčky. Vložený útlum je funkcí smyčky a impedance zdroje a zátěže.

Vstupní impedance smyčky je jednoduchý zlomek, který je možné získat z ABCD parametrů a impedance zátěže, jak je ukázáno v rovnici 4.5. Výsledná hodnota je v ohmech (Ω).

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (4.5)$$

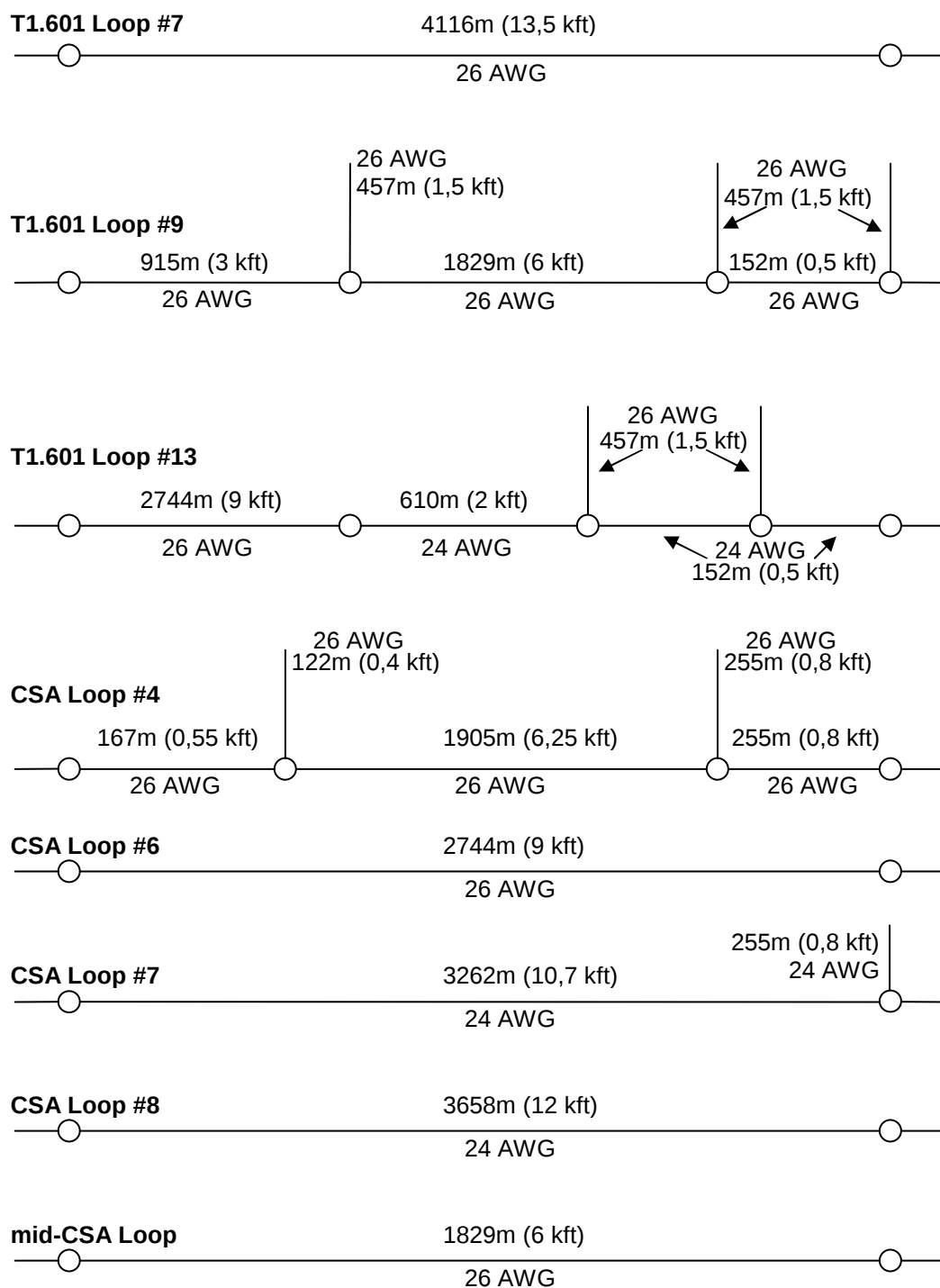
Přenosovou funkci smyčky je možné z ABCD parametrů získat podle rovnice 4.6. Jde o poměr mezi vstupním a výstupním napětím V_2/V_1 . Takto zapsaná přenosová funkce je bezrozměrná (-).

$$T = \frac{Z_L}{AZ_L + B} \quad (4.6)$$

Vložený útlum smyčky je poměr mezi výkonem doručeným do zátěže a výkonem, který by byl dodán do zátěže bez použití smyčky. Dá se říci, že se jedná o ztráty způsobené vložením smyčky mezi zdroj a zátěž. Vložený útlum se udává především v dB. Jak je možné tento vložený útlum vypočítat uvádí rovnice 4.7. Jedná se o dekadický logaritmus a výsledné hodnoty jsou v dB.

$$IL = 20 \log \left(\left| \frac{A \cdot Z_L + B + Z_g \cdot (C \cdot Z_L + D)}{(Z_g + Z_L)} \right| \right) \quad (4.7)$$

Nejčastěji používané testovací smyčky pro ADSL jsou zobrazeny na Obr. 4.5. Podrobnější informace o těchto testovacích smyčkách lze společně s grafy dohledat v [4].



Obr. 4.5 Testovací smyčky specifické pro ADSL

4.3.2 Základní konfigurace měřené smyčky

Pro získání potřebných parametrů sítě je také zapotřebí správně nastavit testovanou smyčku. Je nutné vybrat základní testovací smyčku například podle vzoru, jak je uveden na Obr. 4.5, poté vhodně zvolit impedanci generátoru a zátěže. Tato impedance se většinou pro testovací účely volí 100 Ω . Reálná hodnota v praxi je ovšem 135 Ω , protože takto jsou konstruovány modemy podle ETSI normy. V posledním kroku je potřebné zvolit vhodný frekvenční rozsah a krok, kterým bude proměřen daný interval. Obvykle stačí, aby tento interval byl přibližně do 1,2 MHz, protože ADSL pracuje do této frekvence.

4.4 Postup při simulaci přenosového kanálu

V této části je názorná ukázka, jak využít předcházející informace, které také byly použity v programu pro simulaci přenosového kanálu pro xDSL.

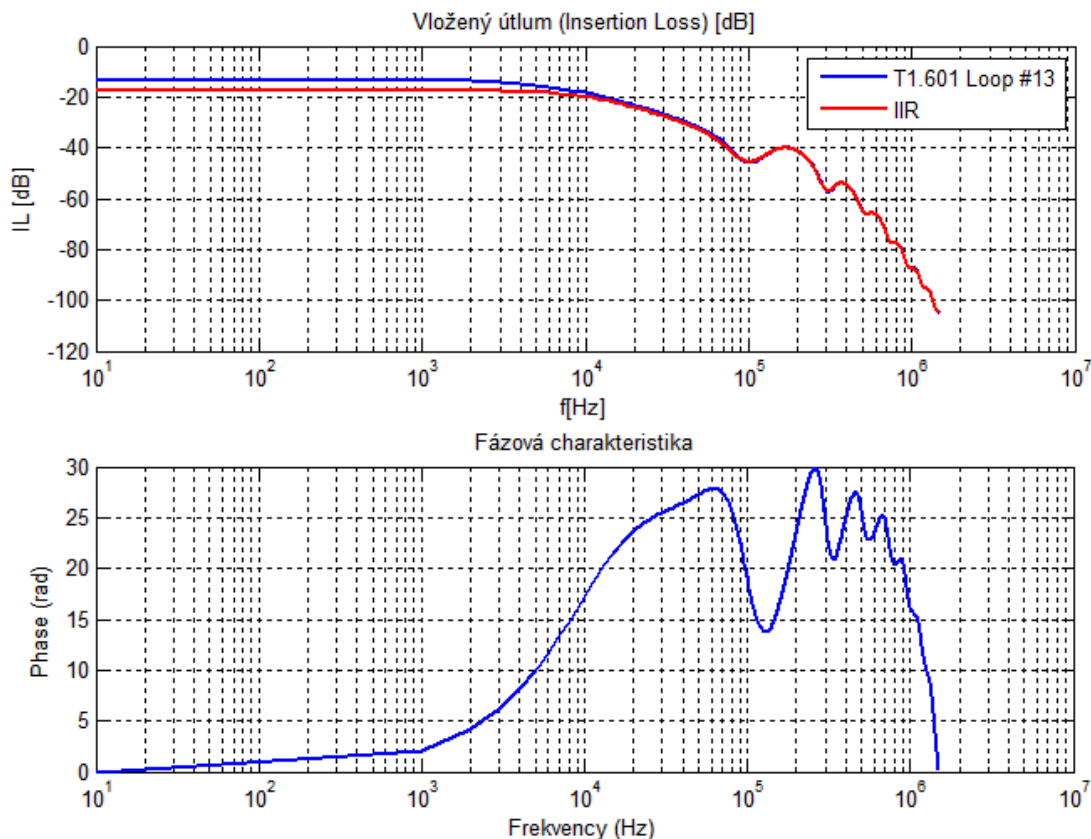
K výpočtu primárních parametrů se nejčastěji používá třinácti parametrový model BT#2, který specifikuje společnost British Telecom, od čehož se odvíjí i název BT#x, který je popsán v kapitole 3.1. Je ovšem možné použít kterýkoliv jiný model. Nejčastěji používané modely jsou popsány v kapitole 3.

Tyto modely jsou zaměřeny na výpočet kmitočtově závislých primárních parametrů, pomocí kterých lze vypočítat měrnou míru přenosu $\gamma(f)$ a obrazovou impedanci Z_0 , jak ukazují rovnice (4.8) a (4.9). Tyto hodnoty jsou dále použity ve zpětných kaskádních maticích, jak uvádí vztahy (4.3) pro volný úsek a (4.4) pro nezakončenou odbočku. Tyto matice se následně násobí dle vzoru, jak uvádí rovnice (4.2). Z této výsledné matice se za pomoci vztahů (4.5), (4.6) a (4.7) vypočítá vstupní impedance, přenosová funkce a vložený útlum.

$$\gamma(f) = \sqrt{(R(f) + j\omega L(f)) \cdot (G(f) + j\omega C(f))} \quad (4.8)$$

$$Z_0(f) = \frac{R(f) + j\omega L(f)}{G(f) + j\omega C(f)} \quad (4.6)$$

Získaná frekvenční charakteristika vloženého útlumu byla simulována pomocí IIR filtru. Na Obr. 4.6 je zobrazena přenosová charakteristika IIR filtru a smyčky T1.601 Loop #13 pro $Z_G=100\Omega$ a $Z_L=100\Omega$. Tato smyčka je definována na Obr. 4.5.



Obr. 4.6 Vložený útlum, frekvenční charakteristika smyčky ANSI T1.601 Loop #13 pro $Z_G=100\Omega$ a $Z_L=100\Omega$.

Pro výpočty jsou použité vstupní parametry uvedené v příloze A. Tyto hodnoty jsou pevně definovaná vstupní data aplikace, která jsou zpracovávána při výpočtu jednotlivých empirických modelů. Algoritmy zpracovávající tato data jsou v podobě kompletní spustitelná aplikace v programu Matlab, Matlab-Simulink jsou v příloze B. Pro vývoj této aplikace byly použity zdroje [1], [4], [6], [8].

5 ZÁVĚR

Cílem tohoto dokumentu bylo seznámit čtenáře s vlastnostmi xDSL systémů a možností jejich simulace. Součástí tohoto dokumentu je program, který simuluje přenosový kanál pro xDSL systémy dle specifikovaných smyček, či podle uživatelem definovaného kanálu.

V první kapitole je zobrazen obecný náhled na problematiku a možnosti datových přenosů s využitím účastnické linky. Tento způsob je hojně rozšířený a je znám pod zkratkou xDSL. Z této skupiny je nejznámější zástupce ADSL.

V druhé kapitole je ukázáno, jak za pomoci empirických modelů je možno získat primární a sekundární parametry simulovaného kabelu.

Třetí kapitola se zabývá konkrétními empirickými modely, které slouží k simulaci telekomunikačních metalických kabelů.

Čtvrtá kapitola názorně ukazuje, jak s využitím empirických modelů, je možné vypočítat parametry přenosové smyčky, která je používána pro vytvoření modelu přenosového kanálu.

Hlavním přínosem této práce je aplikace, která umožňuje simulaci přenosového kanálu pro xDSL systémy. Její využití je možné zejména v procesu navrhování datových přenosů pomocí xDSL systémů, zejména ADSL aplikace.

Tato navržená aplikace, která je přílohou práce, by měla umožnit uživateli definovat vlastní smyčku nebo pouze vybrat z již nadefinovaných možností uvedených základních smyček, které jsou zmíněny v této práci. Tato aplikace potom zobrazí vložený útlum, frekvenční charakteristiku, přenosovou funkci a vstupní impedanci zvolené smyčky, což ulehčuje samotný návrh konkrétních simulací.

LITERATURA

- [1] *Cable reference models for simulating metallic access networks*, ETSI STC TM6 meeting, 22 – 26 June 1998, Lulea, Sweden
- [2] NORDSTRÖM, Tomas, TRAUTMANN, Steffan. *Proposal for Parametric ADSL Cable Models*. [s.l.] : [s.n.], 2002. 8 s., Výsledky měření
- [3] PUŽMANOVÁ, Rita. *Rodina xDSL ve zkratce* [online]. 2003-2009, 07. 06. 2004 [cit. 2009-11-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.dsl.cz/clanky-dsl/clanek-5/rodina-xdsl-ve-zkratce>>
- [4] RAUSCHMAYER, D. J. *ADSL/VDSL Principles: A Practical and Precise Study of Asymmetric Digital Subscriber Lines and Very High Speed Digital Subscriber Lines*. Indianapolis (USA): Macmillan Technical Publishing, 1999. ISBN 1-57870-015-9.
- [5] SVITÁK, Pavel. *Rychlý Internet přes obyčejné dráty? Poznejte xDSL!* [online]. 2003 , 24.01.2003 [cit. 2009-11-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.internetprovsechny.cz/clanek.php?cid=33>>
- [6] ŠILHAVÝ, Pavel. *Elektrorevue* [online]. 7 - 16.1.2002 [cit. 2010-05-13]. Model telekomunikační přístupové sítě v programu Matlab-Simulink pro xDSL aplikace. Dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02007/index.html>>.
- [7] VODRÁŽKA , J. *Nové varianty přípojek ADSL* [online]. 2004 , 03. 12. 2004 [cit. 2009-11-06]. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004120301>>. ISSN 1214-9675
- [8] ZAPLATÍLEK, Karel. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací / 1. vyd.* Praha : BEN - technická literatura, 2004. 215 s. ISBN 80-7300-133-0

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DSL	Digital Subscriber Line – digitální účastnická linka
ADSL	Asymmetric DSL – Asymetrický DSL
RADSL	Rate-Adaptive DSL – DSL s proměnnou rychlostí
SDSL	Symmetric DSL – Symetrické DSL
HDSL	High-bit-rate DSL -
VDSL	Very-high-bit-rate DSL
IDSL	ISDN DSL
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
ETSI	The European Telecommunications Standards Institute
ANSI	American National Standards Institute
AWG	American wire gauge
DSLAM	Digital Subscriber Line Access
NSP	Network Service Provider
NIC	Network Interface Card
USB	Universal Serial Bus
Np	nepper – jednotka útlumu, pro přepočet na decibel dB se násobí konstantou 8,6859
rad	radian – úhlová rychlost

SEZNAM PŘÍLOH

A Parametry ADSL kabelů použité v program

B Příloha na CD

A PARAMETRY ADSL KABELŮ POUŽITÉ V PROGRAMU

Tyto hodnoty jsou převzaty z [1].

Tabulka platná pro kabely modelu BT#1

	Roc	ac	Ros	as	Lo	Linf
BT_dw1	65,32	0,002715283	0	0	0,000884242	0,000800587
BT_dw3	335,18	0,00535389	1281,3	30286,34	0,00114166	0,000708221
BT_dw5	335,321	0,010996373	1116,45012	13175,463	0,00113771	0,000792766
BT_dw6	270,70256	0,00248956	774,23224	3349,76	0,00110646	0,000760267
BT_dw8	41,16	0,001217977	0	0	0,001	0,000910505
BT_dw10	180,93	0,0497223	0	0	0,000728868	0,000543435
BT_dw12	55,460555	0,004992463	0	0	0,000621044	0,000461954
BT_dwug	179	0,03589	0	0	0,000695	0,000585

fm	Nb	g0	Nge	Co	Cinf	Nce
263371	1,30698	8,5500E-07	0,746	4,65668E-08	2,80166E-08	0,117439
15211	1,12676	1,3718E-07	0,807645	3,44311E-08	2,44465E-08	0,06589
20842,6	1,52968	3,2574E-08	0,919	3,16079E-08	2,92979E-08	0,1115489
15668	1,3579	3,6000E-07	0,777	3,94114E-08	2,78941E-08	0,106593
174877	1,1952665	5,3000E-08	0,88	3,17786E-08	2,26812E-08	0,11086674
718888	0,7557709	8,9041E-08	0,85606301	6,38243E-08	5,09283E-08	0,11584622
193049	0,9397093	2,0000E-08	0,88	5,80225E-09	5,11281E-08	0,10064577
1000000	1,2	5,0000E-10	1,033	1,00E-09	5,50E-08	0,1

Tabulka platná pro kabely ANSI

	Roc	ac	Ros	as	Lo	Linf
ANSI_TP1	286,17578	0,1476962	0	0	0,000675369	0,000488952
ANSI_TP2	174,55888	0,053073481	0	0	0,000617295	0,000478971
ANSI_TP3	180,93	0,0497223	0	0	0,00072887	0,00054343
ANSI_FP	41,16	0,001218	0	0	0,001	0,000910505

fm	Nb	g0	Nge	Co	Cinf	Nce
806338,6	0,9293073	0,000000043	0,7	0	0,000000049	0
553760	1,1529766	2,34875E-13	1,38	0	0,00000005	0
718888	0,7557709	0,000000089	0,856	6,38E-08	0,000000051	0,11584622
174877	1,195	0,000000053	0,88	3,178E-08	2,268E-08	0,1109

Tabulka platná pro kabely FT

	Roc	ac	Ros	as	Lo	Linf
FT_dw1	37,795	0,079	0	0	0,001	0,00084
FT_dw2	60,874	0,01	0	0	0,00072	0,00053
FT_dw3	118,719	0,026	0	0	0,00061	0,00041
FT_04	271,224	0,203	0	0	0,00074	0,000501
FT_06	122,577	0,044	0	0	0,00072	0,00048
FT_08	65,804	0,012	0	0	0,00074	0,00051

fm	Nb	g0	Nge	Co	Cinf	Nce
674800	0,716	9,097E-09	0,946	1,644E-07	2,327E-08	0,564
327800	0,665	1,101E-08	1,014	0,00001288	4,642E-08	0,924
392600	0,805	9,4E-09	0,944	0,000006272	6,58E-08	0,769
607100	0,886	1,845E-14	1,57	6,365E-07	4,93E-08	0,599
331600	0,786	3,033E-10	1,095	0,000001581	4,852E-08	0,683
180800	0,756	0,000000292	0,606	8,998E-07	4,479E-08	0,626

Tabulka platná pro kabely NOK

	Roc	ac	Ros	as	Lo	Linf
NOK_40	271,9983	0,07960468	0	0	0,000710749	0,000590016
NOK_50	173,99847	0,0322326	0	0	0,000707451	0,000581555

fm	Nb	g0	Nge	Co	Cinf	Nce
1030052	1,229532	1,10087E-09	0,999424	0	3,86E-08	0
693804	1,095304	5,00763E-10	1,04681	0	3,89E-08	0

Tabulka platná pro kabely modelu KPN#1

	Z0inf	c/c0	Rss00	2pi*tan	Kf	Kl	Kn	Kc	N	fc0	M
KPN_L1	136,651	0,79766	0,168145	0,13115	0,72	1,2	1	1,08258	0,7	4521710	1
KPN_L2	136,047	0,798958	0,168145	0,169998	0,7	1,1	1	1,08201	1	1862950	1
KPN_L3	137,527	0,850608	0,065682	0,114526	1	1	1	1,06967	1	559844	1
KPN_L4	137,005	0,787661	0,168145	0,153522	0,9	1	1	1,07478	1	557458	1
KPN_H1	135,458	0,640381	0,177728	0,018425	0,85	1	1	1,11367	1,5	5020	1
KPN_KK	142,451	0,712318	0,177728	0,071111	0,8	1,1	1	1,09373	0,5	8088	1
KPN_R1	87,7872	0,637656	0,2777	0,0963554	1,1	0,77	1	1,05036	1	3391970	1
KPN_R2	97,4969	0,639405	0,177728	0,0189898	0,5	1,14	1	1	1	100000	1
KPN_X1	110,538	0,629284	0,177728	0,0753736	1	0,97	1	1,1781	1	52284	1

B PŘÍLOHA NA CD

Tato příloha obsahuje popis programu a jeho možnosti nastavení, dále také zdrojové kódy aplikace společně s elektronickou verzí této práce.