



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## RUŠENÍ V LOKÁLNÍCH DATOVÝCH SÍTÍCH

DISTURBANCE IN LOCAL DATA NETWORKS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Aleš Michálek**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.**

**BRNO 2023**

# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Aleš Michálek

**ID:** 211265

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Rušení v lokálních datových sítích

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit laboratorní úlohy, které umožní studentům pochopit rušivé vlivy, které působí na datové přenosy po metalických vedeních v lokálních sítích. Úkolem studenta bude souhrnně popsat jednotlivé rušivé vlivy, vytvořit pracoviště pro jejich měření včetně návrhu přístrojového vybavení a konstrukce potřebných laboratorních přípravků.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ITU-T Recommendation G.996.1. Test procedures for Digital Subscriber Line (DSL). ITU (6/1999).

[2] ETSI Recommendation TS 101 388 V1.3.1. Access transmissions systems on metallic access cables.(5/2002).

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 19.5.2023

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

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

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce pojednává o problematice přeslechů v datových sítích. Jejím cílem je přiblížit problematiku NEXT, FEXT a přeslechů studentům. Praktickým výstupem je pak návrh laboratorní úlohy pro měření přeslechů. V laboratorní úloze mají studenti možnost manuálně změřit úrovně přeslechů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

NEXT, FEXT, rušení, datové sítě, přeslech, útlum, homogenní vedení

## **ABSTRACT**

This paper deals with the problem of crosstalk in data networks. It aims to introduce the issues of NEXT, FEXT and crosstalk to students. The practical output is then the design of a laboratory task for measuring crosstalk. In the lab task, students have the opportunity to manually measure crosstalk levels.

## **KEYWORDS**

NEXT, FEXT, interference, data networks, crosstalk, attenuation, homogeneous line

MICHÁLEK, Aleš. *Rušení v lokálních datových sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Bc. Aleš Michálek
<b>VUT ID autora:</b>	211265
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2022/23
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Rušení v lokálních datových sítích

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Václavu Zemanovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, poskytnuté materiály, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Rušení v lokálních datových sítích</b>	<b>12</b>
1.1 Historický kontext	12
1.2 Dálkové metalické rozvody	12
1.3 Lokální metalické rozvody	13
1.4 Nesymetrické vedení	13
1.5 Symetrické vedení	13
1.5.1 Konstrukce kabelů	14
1.6 Stínění	16
1.7 Vznik rušení	16
1.8 Charakteristika vedení	17
1.9 Třídy symetrické kabeláže	17
1.10 Homogenní vedení	18
1.10.1 Výpočet primárních parametrů vedení	19
1.10.2 Výpočet charakteristických veličin vedení	20
1.11 Modely vedení	21
1.12 Útlum odrazu	21
1.13 Vložný útlum	22
1.14 Nehomogenity kabelů	23
1.14.1 Nehomogenity primárních parametrů	24
1.14.2 Nesymetrie dílčích kapacit a svodů	24
1.15 Nehomogenity vedení	27
1.16 Modely přeslechů	27
1.16.1 Přímý a nepřímý přeslech	28
1.16.2 NEXT	28
1.16.3 FEXT	30
1.16.4 FEXT a ELFEXT	30
1.16.5 PSNEXT / PSFEXT	31
1.17 Měření symetrických vedení	31
1.18 Měření charakteristické impedance a útlumu odrazu	32
1.19 Parametry vedení	33
1.20 Měření v časové oblasti TDR	34
1.21 Měření pro systémy xDSL	36

<b>2</b>	<b>Laboratorní úloha</b>	<b>40</b>
2.1	Cíle měření . . . . .	40
2.2	Měřicí přípravek . . . . .	40
2.3	Laboratorní pracoviště . . . . .	42
2.4	Metodika měření . . . . .	43
2.5	Možnost rozšíření . . . . .	43
2.6	Kontrolní měření . . . . .	44
2.7	Naměřené hodnoty . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Numerické příklady</b>	<b>51</b>
3.1	Zadání . . . . .	51
3.2	Řešení . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Návod laboratorní úlohy</b>	<b>53</b>
4.1	Úkoly . . . . .	53
4.2	Teoretický úvod . . . . .	53
4.2.1	Vznik rušení . . . . .	53
4.2.2	Nehomogenity primárních parametrů . . . . .	54
4.2.3	Nesymetrie dílčích kapacit a svodů . . . . .	54
4.2.4	Vložný útlum . . . . .	54
4.2.5	NEXT . . . . .	55
4.2.6	FEXT . . . . .	56
4.2.7	FEXT a ELFEXT . . . . .	56
4.2.8	Měření symetrických vedení . . . . .	57
4.3	Vybavení pracoviště . . . . .	57
4.4	Měření . . . . .	57
4.4.1	Měření útlumu . . . . .	57
4.4.2	Měření přeslechu NEXT . . . . .	58
4.4.3	Měření přeslechu FEXT . . . . .	58
4.4.4	Tabulka pro měření . . . . .	58
	<b>Závěr</b>	<b>59</b>
	<b>Literatura</b>	<b>60</b>
	<b>A Schéma a fotografie měřícího přípravku</b>	<b>62</b>
	<b>B Obsah elektronické přílohy</b>	<b>63</b>



# Seznam obrázků

1.1	Konstrukce čtyřky . . . . .	15
1.2	Náhradní schéma homogenního vedení . . . . .	18
1.3	Graf závislosti měrného útlumu na frekvenci . . . . .	23
1.4	Schématické znázornění dílčích kapacit unitř čtyřky. Převzato z [4] . .	25
1.5	Modely přeslechů . . . . .	28
1.6	Blokové schéma měření . . . . .	32
1.7	Náměr TDR vzorku kabelu . . . . .	37
1.8	Naměřený šum při ADSL DTM modulaci, simulace vedení 1500m . .	39
2.1	Vnitřní zapojení konektoru Multicomp . . . . .	42
2.2	Kontrolní měření pro vzorek 1 - Útlum . . . . .	45
2.3	Kontrolní měření pro vzorek 1 - power sum next . . . . .	45
2.4	Kontrolní měření pro vzorek 1 - power sum elfext . . . . .	45
2.5	Kontrolní měření pro vzorek 2 - Útlum . . . . .	46
2.6	Kontrolní měření pro vzorek 2 - power sum next . . . . .	46
2.7	Kontrolní měření pro vzorek 2 - power sum elfext . . . . .	46
2.8	Kontrolní měření pro vzorek 3 - Útlum . . . . .	47
2.9	Kontrolní měření pro vzorek 3 - power sum next . . . . .	47
2.10	Kontrolní měření pro vzorek 3 - power sum elfext . . . . .	47
2.11	Kontrolní měření pro vzorek 4 - Útlum . . . . .	48
2.12	Kontrolní měření pro vzorek 4 - power sum next . . . . .	48
2.13	Kontrolní měření pro vzorek 4 - power sum elfext . . . . .	48
2.14	Naměřené hodnoty útlumu na přípravku . . . . .	49
2.15	Naměřené hodnoty přeslechu NEXT na přípravku . . . . .	50
2.16	Naměřené hodnoty přeslechu FEXT na přípravku . . . . .	50
2.17	Naměřené hodnoty přeslechu ELFEXT na přípravku . . . . .	50
3.1	Náměr TDR vzorku kabelu zabudovaného ve stole v laboratoři . . . .	51
A.1	Zapojení desky plošných spojů . . . . .	62
A.2	Vyrobený přípravek pro měření . . . . .	62

# Seznam tabulek

1.1	Vztahy pro meze NEXT v kanále . . . . .	29
1.2	Vztahy pro meze ELFEXT v kanále . . . . .	31
1.3	Mezní hodnoty pro útlum vedení a útlum přeslechu NEXT kabelů do 100 MHz . . . . .	34
1.4	Mezní hodnoty pro útlum vedení a útlum přeslechu NEXT kabelů do 600 MHz . . . . .	34
1.5	Příklady dosahu a slepých úseků v závislosti na délce pulzu [6] . . . .	35
1.6	Příklady NVP pro vybrané typy kabelů [6] . . . . .	36
1.7	Dosah systému ADSL [km] ve směru k účastníkovi . . . . .	37

# Úvod

Diplomová práce na téma Rušení v lokálních datových sítích má za cíl přiblížit problematiku rušení, které nastává v datových sítích tažených metalickými kabely. Konkrétně kroucenými páry vodičů. Pro lepší pochopení problematiky je v práci navržen laboratorní přípravek, kterým je možné provést manuální měření přeslechů. Manuální měření je realizováno pomocí generátoru signálu a osciloskopu. Je tedy možné pozorovat jednotlivé přeslechy. Oproti automatizovanému měření realizovanému pomocí komerčních měřících přístrojů je měření delší, avšak lepší pro pochopení.

Kroucený pár vodičů je v dnešní době nejrozšířenější datový spoj, který se využívá pro propojení mnoha různých síťových zařízení. Více párů pak tvoří datový kabel, který se svou velikostí a parametry liší dle použití. Od mnohopárových kabelů pro připojení ulice k telefonnímu rozvaděči po datové kabely k propojení dvou počítačů.

V teoretické části je rozebrána problematika přeslechů mezi jednotlivými páry vodičů v kabelovém svazku a jejich různými druhy. V Praktické části je pak návrh přípravku pro laboratorní úlohu, který umožní měření přeslechů popsanych v teoretické části.

Tato práce slouží jako podklad pro novou verzi laboratorní úlohy zaměřené na pochopení a změření problematiky rušení v metalických sítích.

# 1 Rušení v lokálních datových sítích

## 1.1 Historický kontext

Mezi první hromadně nasazení komunikační služby můžeme řadit analogové telefonní linky, které jsou masivně rozšířené a jsou dovedeny téměř do všech domácností.

Kabel, který je přiveden do domácnosti se skládá z krouceného páru metalických vodičů. Tento kroucený pár byl v době největšího rozmachu pevných telefonů více než dostatečný pro přenos hlasu.

S postupem doby a rozmachem internetu nastala však otázka jak tyto metalické páry využít pro přenos datového provozu. Z ekonomického hlediska je totiž nejdražší práce okolo výměny vedení. Tedy zemní práce, pokládka kabeláže, roztažování do domácností a další. Cena samotného média je v porovnání s těmito náklady ve výrazném nepoměru. Obzvláště porovnáme-li cenu a možnosti optických vláken a analogových linek.

Levnější tedy je vytvořit zařízení a přenosové techniky tak, aby využívaly stávající infrastrukturu.

## 1.2 Dálkové metalické rozvody

V dnešní době se nahrazují páteřní rozvody datových sítí optickými kabely a tak problematika metalických sítí zůstává pouze v poslední části přenosové trasy. Z ústředny vede optický kabel do DLSAMú (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) a z nich pak metalické vodiče do domácností. DSLAM je rozvodný uzel pro metalické datové rozvody. Obvykle má podobu plastového boxu na ulicích. Jejich hustota je pak závislá na množství připojených uživatelů. V DSLAMech je pak optický signál konvertován na metalický a taktéž je zde provedeno propojení na konkrétní, dané páry do konkrétní přípojky [1].

Kvalita datového spojení je tak přeslechy ovlivňována pouze v posledním úseku. Hlavním parametrem, který ovlivňuje kvalitu poskytované služby je pak vzdálenost uživatele od DLSAM jednotky. Do vzdálenosti 200 metrů je technologicky možné namodulovat i rychlost 300 Mbit/s avšak na vzdálenost 300 metrů pak 250 Mbit/s a nad vzdálenost 600 metrů pak rychlost 100 Mbit/s. Celková dostupná vzdálenost pro jakékoliv komerčně využívané datové služby je pak okolo 5 kilometrů [2] [3].

## 1.3 Lokální metalické rozvody

Lokální datové sítě můžeme definovat jako sítě v jedné budově / kanceláři / bytě. Záleží na členění a fyzickém uspořádání. U kancelářských budov a podobně velkých objektů jsou metalickými rozvody realizovány rozvody horizontální. Tedy od datového rozvaděče k účastnické zásuvce. Vertikální datové rozvody, tedy rozvody mezi patry jsou realizovány optickými vlákny.

Použití metalických rozvodů pro horizontální rozvody má ekonomické důvody. Instalace metalických rozvodů je mnohonásobně levnější a variabilnější oproti instalaci optických rozvodů. Není nutné mít zakoupené speciální přístroje pro svařování a zafukování optických vláken. Taktéž uživatelská zařízení nejsou vybavena pro příjem optického signálu.

Metalické rozvody jsou dostatečné pro připojení uživatelských počítačů, tiskáren a jiných zařízení. Aktuálně je standardem rychlost přípojek 1 Gbit/s. Pokud bychom vyžadovali připojení rychlejší je ho možné realizovat pomocí kvalitnějších kabelů (kategorie 6A, 7 a výše).

## 1.4 Nesymetrické vedení

Při přenosu dat pomocí kabelů můžeme využívat vedení nesymetrické - kde data se přenášejí po jednom vodiči a užitečný signál je dán rozdílem potenciálu proti zemi. Příkladem tohoto vedení je koaxiální kabel. Hlavní výhodou koaxiálních kabelů je možnost přenosu širších frekvenčních pásem. U souběžného vedení více koaxiálních kabelů nedochází ke vzájemnému ovlivňování.

Elektromagnetické pole vzniklé při datovém přenosu zůstává uvnitř koaxiální trubky. U vysokých kmitočtů prochází proud na povrchu vnitřního vodiče a uvnitř trubky. Pokud jsou kmitočty nižší ( $10^4$  Hz) je nutné přidat další stínící prvek. Nesymetrické vedení však má mnoho nevýhod.

Hlavní nevýhodou je velikost a poloměr ohybu. Taktéž jsou náročnější na výrobu [4]. Koaxiální kabely se využívali primárně jako předchůdci optických kabelů. Tedy pro páteřní spojení s vysokou kapacitou na velkou vzdálenost [4].

## 1.5 Symetrické vedení

Opakem nesymetrických vedení jsou vedení symetrická. Pro přenos dat jsou využity vodiče 2. Užitečný datový signál je pak dán rozdílem potenciálu mezi těmito vodiči. Pokud by symetrické vedení bylo taženo dvěma rovnými vodiči vedle sebe docházelo by k ovlivňování přenášených signálů díky elektromagnetické indukci. Pokud však tyto vodiče zkroutíme dohromady tak se elektrické vlastnosti zlepšují.

Díky tomu že jsou vodiče zkroucené dohromady dojde při případné indukci z vnějšího zdroje k naindukování na oba vodiče ve stejné míře. Díky tomu, že je užitečný signál dán rozdílem potenciálu je tento rozdíl nezměněn.

Pro vedení se využívají vodiče s malým průřezem a díky tomu je vedení levné a má dobré mechanické vlastnosti. Především odolnost a ohebnost.

S vývojem a potřebou vyšších datových rychlostí procházely vývojem i kabely. Postupem času se využívaly tyto standardy [5]:

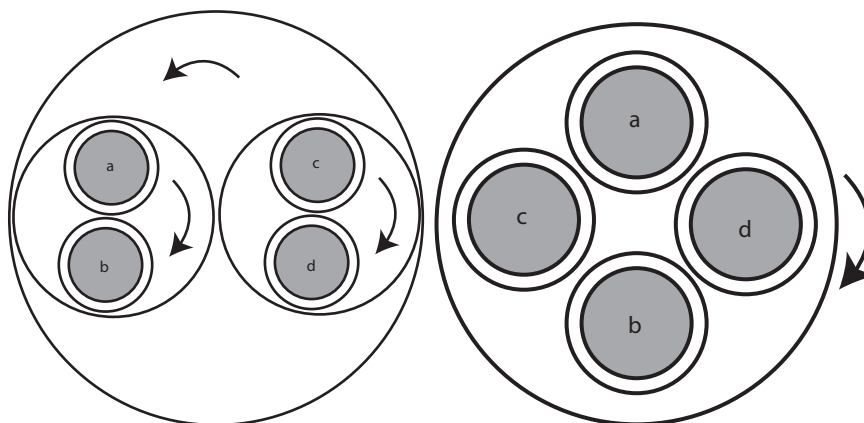
- CAT 3 - použití pro telefonní hovory a datové přenosy do 16 Mbit/s. Šířka přenosového pásma je pak 16 MHz. Dnes se využívá pouze pro analogové telefonní linky, které jsou na ústupu.
- CAT 4 - kategorie s šířkou pásma 20 MHz a s maximálním datovým tokem 16 Mbit/s. Tato kategorie kabelů se příliš neujala a nepoužívá se.
- CAT 5 - Kabely se využívají pro ethernetové spoje v LAN sítích. Maximální délka kabelu je pak 100m a šířka pásma 100 MHz. Datová rychlost 100 Mbit/s. Nahrazeno kategorií 5e.
- CAT 5e - Enhanced CAT 5 - vylepšená kategorie 5. Parametry kabelu jsou stejné jako CAT 5, ale mají přísnější limity pro certifikaci. Tedy i vyšší nároky na kvalitu výroby. Může být i ve stíněné variantě.
- CAT 6 - Standard s šířkou pásma 250 MHz. Kabel je schopný dosahovat rychlostí až 10 Gbit/s do vzdálenosti 55m. Postupně nahrazuje v nových instalacích kabely kategorie 5e. Používá se i ve stíněné variantě.
- CAT 6A, Zvýšený standart kabeláže s certifikací pro šířku pásma 500 MHz. Kabel zvládá přenos 10 Gbit/s na délku 100m. Primárně se používá pouze stíněná varianta, ale existuje i nestíněná.
- CAT 7 - Pouze stíněný kabel s šířkou pásma až 600 MHz. Není uznáván mezinárodními organizacemi. Parametry má podobné jako 6A. Pouze stíněná varianta.
- CAT 7A - stejné jako CAT 7 s šířkou pásma až 1 GHz
- CAT 8.1 - kabeláž s šířkou pásma 2 GHz a datovou propustností až 40 Gbit/s, Existuje ve variantě F/UTP a nebo U/FTP.
- CAT 8.2 - stejné jako kategorie 8.1 avšak podmínkou je dvojitě stínění - F/FTP a nebo S/FTP.

### 1.5.1 Konstrukce kabelů

Nejlepším a zároveň nejrozšířenějším materiálem pro výrobu vodičů je čistá měď. Jádra vodičů pak dosahují u dřívějších telefonních kabelů průměrů 0,4 až 0,8 mm. U dálkových telefonních kabelů pak 0,9 až 1,4 mm [4]. Z ekonomických důvodů je snaha používat co nejmenší průměry vodičů. V některých zemích docházelo k využití

hliníku. Ten však má menší vodivost a tak musely být průměry vyšší. Taktéž dochází k problémům s pevností. Využívaná je taktéž slitina Al, Fe, Mg, a Si, ale stále nedosahují kvalit mědi [4].

Dva vodiče - žíly stočené s danou délkou zkrutu dohromady tvoří jeden pár. Základní jednotkou pro vedení telefonů je pak čtyřka. Existují pak dvě varianty jak žíly stáčet do čtyřek. A to varianta křížová, kdy všechny čtyři vodiče jsou stáčený spolu dohromady. Druhou variantou je DM čtyřka (Dieselhorst - Martin). DM čtyřka je vyráběna tak, že je nejprve kroucen jeden pár samostatně, druhý pár taktéž samostatně a na konec jsou oba páry krouceny dohromady. Varianta DM se pak používá například i u ethernetových kabelů [4].



Obr. 1.1: Vlevo: DM čtyřka, Vpravo: Křížová čtyřka

Neméně důležitým prvkem je izolace kabelů. V dnešní době se používají téměř výhradně polyetylény a jiné chemické směsi na bázi plastu. U starých telefonních kabelů je stále možné se setkat s izolací vzduch - papír, kde jsou jádra kabelů (místních) ovinuta vrstvou papíru. Dálkové kabely izolované papírem pak měly přidanou vrstvu, kde jádro bylo obaleno provázkem a až poté papírem. Tím vznikla vyšší vzduchová mezera a hlavním izolantem byl tedy vzduch. Díky tomu že byly vodiče dále od sebe se zvýšila kapacita a zmenšil útlum. Nevýhodou je nutnost izolace proti vlhkosti [4].

Ochranné obaly chrání kabel proti poškození mechanickými vlivy, proti pronikání vlhkosti, rušením od zdrojů elektromagnetického záření (velmi vysoké napětí, trakční systémy) a podobných. Ochrana se skládá z vrstev a liší se podle druhu kabelu. Může se jednat například o různé druhy stínění, pancéřování ocelovými páskami, gumovou izolací proti vlhkosti a jiné. Druh ochrany závisí na tom, kde kabel bude uložen a ekonomických parametrech. Podle potřeby jsou do ochranných obalů zakomponovány například tažná lana pro závěsný kabel, armorování pro přímé zakopání kabelu a nebo je obal vyroben z UV odolného materiálu [4].

## 1.6 Stínění

Stínění je jedním ze základních způsobů, kterým se snažíme ochránit metalické vodiče před okolním a i vzájemným rušením. Stínění je vodivý materiál, který obaluje jednotlivé páry vodiče a nebo i celý kabel. Toto stínění je pak vodivě spojeno s konektorem, který je uzemněn. Připojením stínění na potenciál země dochází k odvedení indukovaného napětí z kabelu a tím ke snížení rušení.

Materiálem pro stínění může být vodivá fólie, která je levnější, avšak méně ohebná. Druhým typem stínění může být opletení pomocí tenkých vodičů. Tento typ stínění je ohebnější, ale dražší [5].

Podle typu stínění pak rozlišujeme kabely typů:

- UTP – Kabely nestíněné.
- STP – Kabel se stíněnými páry.
- FTP (F/UTP) – Páry nejsou stíněné, ale plášť je stíněn fólií.
- S/UTP – Páry nejsou stíněné, plášť je stíněn opletením.
- F/FTP - Páry i plášť jsou stíněné fólií
- S/FTP – Páry stíněny fólií, plášť stíněn opletením.

Využití stíněné kabeláže vyžaduje použití stíněných konektorů a správnou montáž. Stíněné kabely je také nutné správně uzemnit. Pokud je stínění zapojeno špatně může naopak zhoršit přenosové vlastnosti celého kabelu [6].

Mezi prvky stínění můžeme řadit i využití celokovových kabelových žlabů využívaných pro montáž kabelů. Uvnitř těchto žlabů jsou pak uloženy datové kabely. Stínění kabelovým žlabem pak chrání kabely před elektromagnetickými vlivy od okolního prostředí. Pokud však chceme odstínit přeslechy mezi páry musíme i tak použít stíněný kabel [8].

## 1.7 Vznik rušení

Průchod elektricky nabitých částic vodičem způsobuje vznik elektromagnetického pole, které se vytváří kolem daného vodiče. Velikost tohoto pole je pak určena množstvím částic, které tímto vodičem procházejí.

Elektromagnetické pole pak ovlivňuje částice nacházející se v tomto poli. Tedy prochází li proud vodičem tak tento proud ovlivňuje proud v okolních vodičích nacházejících se v blízkosti vodiče. V závislosti na vzniku pak rozlišujeme [9]:

- **Přeslechy:** vzájemně na sebe působí jednotlivé páry v kabelu. Daný pár vyzařuje energii, která proniká do ostatních párů v daném kabelu. Jedná se o jeden z hlavních rušících prvků, které ovlivňují datové přenosy.
- **Provozní šum:** je způsobený zapojením a provozem aktivních a pasivních elektrických prvků v systému. Šum má charakteristiku bílého šumu a jeho



úroveň je relativně malá. Hodnota šumu kolísá s teplotou, podle toho, jak se zahřívají součástky.

- **Vysokofrekvenční rušení:** je způsoben pronikáním rádiových vln do metalických kabelů. Rádiové vlny pracují na stejných frekvencích jako přenosy v metalických kabelech a tak vzniká interference. Největší interferenci způsobuje amplitudová modulace.
- **Impulsní rušení:** se vyskytuje vesměs náhodně a je způsobeno různými zdroji, které produkují krátké elektrické přechodné jevy. Může se jednat o domácí spotřebiče, trakce vlaků a tramvají, připojení nebo odpojení velkých spotřebičů. Tato rušení způsobují shluky chyb v datovém přenosu.

## 1.8 Charakteristika vedení

Kabely pro datové přenosy jsou typem souměrných čtyřpólů, které mají prostorově rozprostřené parametry. Použité kabelové vedení má mnohonásobně větší délku než příčnou vzdálenost mezi vodiči (kabely jsou namotány kolem sebe. Toto umožňuje předpokládat vlnový charakter pouze v podélném směru.

Díky tomu dojde ke zjednodušení náhradního modelu vedení pro výpočet jeho parametrů. Stačí tedy pouze znát napětí a proud jako funkce času. Vedení, kde všechny vodiče mají stejnou délku a jejich průřez a uspořádání se ve sledovaném úseku nemění značíme jako homogenní [9].

Datové kabely, kterými se zabývá tato práce splňují výše uvedené parametry a můžeme je tak označit za homogenní.

## 1.9 Třídy symetrické kabeláže

Norma ČSN EN 50173-1 rozděluje symetrickou kabeláž do následujících tříd:

- třída A - specifikována do 100 kHz
- třída B - specifikována do 1 MHz
- třída C - specifikována do 16 MHz
- třída D - specifikována do 100 MHz
- třída E - specifikována do 250 MHz
- třída F - specifikována do 600 MHz

Šířka pásma dané třídy je specifikován tak, aby poskytl minimální přenosové vlastnosti pro podporu aplikací dané třídy. Kanály dané třídy podporují aplikace nižších tříd [12].

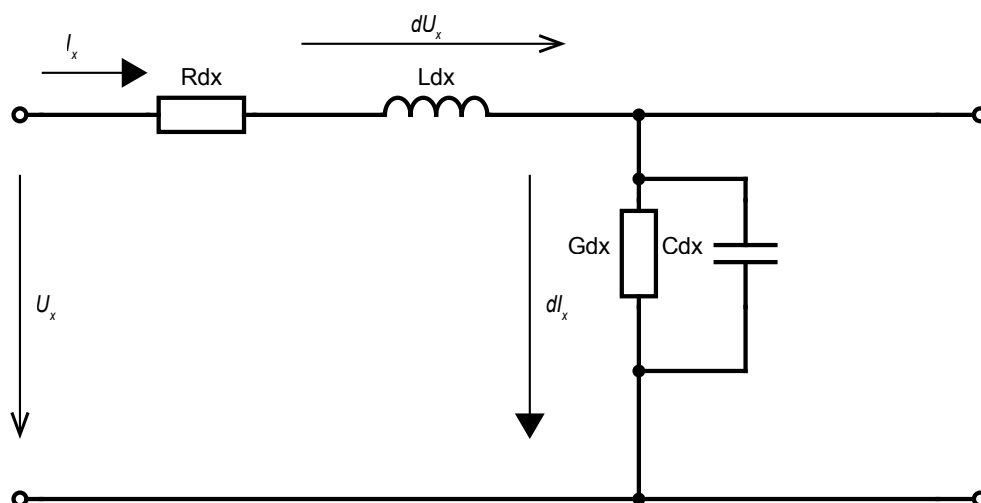
## 1.10 Homogenní vedení

Jsou parametry vedení, které nezávisí na napětí a přenášeném proudu ale závisí na konstrukci vedení, použitých materiálech a frekvenci přenášeného signálu. Mezi charakteristické parametry pak můžeme řadit parametry primární a to [4]:

- Měrný odpor  $R$  [ $\Omega/\text{km}$ ]
- Měrná indukčnost  $L$  [ $\text{H}/\text{km}$ ]
- Měrná kapacita  $C$  [ $\text{C}/\text{km}$ ]
- Měrný svod  $G$  [ $\text{S}/\text{km}$ ]

Kombinaci  $R+j\omega L$  lze souhrnně nazvat sériová impedance  $Z_s$ . Kombinaci  $G+j\omega C$  pak jako paralelní admitanci  $Y_p$ . Podle potřeb výpočtů v náhradním schématu můžeme sériovou impedanci použít dohromady v sérii s výstupní svorkou a nebo ji rozdělit na dvě stejné části a mezi ně připojit paralelní admitanci [6].

Pokud je homogenní vedení dvou vodičové, je možné sestavit náhradní schéma tohoto zapojení:



Obr. 1.2: Náhradní schéma homogenního vedení

Kombinaci  $R+j\omega L$  lze souhrnně nazvat sériová impedance  $Z_s$ . Kombinaci  $G+j\omega C$  pak jako paralelní admitanci  $Y_p$ . Podle potřeb výpočtů v náhradním schématu můžeme sériovou impedanci použít dohromady v sérii s výstupní svorkou a nebo ji rozdělit na dvě stejné části a mezi ně připojit paralelní admitanci [6].

Z primárních parametrů vedení pak lze vypočítat charakteristickou veličinu impedance  $Z_c$ .

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = X + jY = |Z_c|e^{j\varphi} \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

kde:

- Měrný odpor  $R$  [ $\Omega/\text{km}$ ]
- Měrná indukčnost  $L$  [ $\text{H}/\text{km}$ ]
- Měrná kapacita  $C$  [ $\text{C}/\text{km}$ ]
- Měrný svod  $G$  [ $\text{S}/\text{km}$ ]
- Úhlová frekvence  $\omega = 2\pi f$

$|Z_c|$  je absolutní hodnota charakteristické impedance - modul. Modul vyjadřuje poměr mezi velikostmi napěťové a proudové vlny. A to v každém místě vedení. Parametr  $\varphi$  označuje rozdíl mezi fázemi napětí a proudu.

Charakteristická impedance se pak používá například i pro označování kabeláže - známe jsou koaxiální vodiče s impedancí  $50 \Omega$  a nebo  $75 \Omega$ .

### 1.10.1 Výpočet primárních parametrů vedení

Primární parametry vedení ovlivňují charakteristiku vedení a tím i jeho přenosové vlastnosti.

**Měrný odpor  $R$**  symetrického vedení lze vyjádřit vztahem:

$$R = R_0 k_f = R_0 (k_s k_b k_0) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (1.2)$$

kde je:

- $R_0$  - Stejnoseměrný činitel odporu vedení v  $\Omega/\text{km}$
- $k_s$  - Činitel zvětšení odporu vlivem povrchového jevu - skin-effect
- $k_b$  - Činitel zvětšení odporu vlivem blízkosti vodičů
- $k_0$  - Činitel zvětšení odporu vlivem okolních vodičů (stínění, plášť...)

Činitel  $k_s$  se mění podle toho, zda je přenášený kmitočet nad a nebo pod kritickým kmitočtem. Kritický kmitočet je závislý na průměru vodiče. Například pro průměr  $0,5\text{mm}$  platí  $f_k=280\text{kHz}$  [9]

Pro nadkritický kmitočet platí:

$$k_s = 1,12d\sqrt{f} + 0,25 \quad (1.3)$$

Pro kmitočty nižší než kritický pak platí:

$$k_s = 1,25 \left( \frac{f}{f_k} \right)^2 \quad (1.4)$$

kde:

- $d$  - Průměr vodiče [ $\text{mm}$ ]
- $f$  - Kmitočet ( $\text{kHz}$ )

Činitel  $k_b$  který ovlivňuje blízkost vodičů je obvykle okolo 1,2 - 1,3. Činitel  $k_0$  který závisí na vlivu okolních vodičů je obvykle okolo 1,1 - 1,2 podle toho, zda je vodič uprostřed a nebo na kraji kabelu.

**Měrná kapacita  $C$**  vedení lze vyjádřit jako:

$$C = \frac{28\epsilon_r}{\ln p \frac{a}{d}} \quad [\text{nF/km}] \quad (1.5)$$

kde:

- $\epsilon_r$  - Dielektrická konstanta materiálu izolace. Pro papír = 1,5 až 1,8 pro styroflex = 1,3
- $p$  - Činitel typu vedení - pro DM čtyřky = 0,65, pro X čtyřky = 0,75 a pro UTP páry = 0,94
- $a$  - vzdálenost vodičů v daném páru v mm
- $d$  - průměr vodiče v mm

Závislost kapacity na kmitočtu se pro tento případ neuvažuje [9].

**Měrná indukčnost  $L$**  je dána jako:

$$L = 0,4 \ln \frac{2a}{d} + 0,25 \quad [\text{nH/km}] \quad (1.6)$$

kde:

- $a$  - vzdálenost vodičů v daném páru v mm
- $d$  - průměr vodiče v mm

Závislost indukčnosti na kmitočtu se pro tento případ neuvažuje. [9]

**Měrný svod  $G$**  lze vyjádřit jako:

$$G(\omega) = G_0 + k_g \omega C_p \quad [\text{mS/km}] \quad (1.7)$$

kde  $G_0$  je svod při stejnosměrném napětí mezi vodiči. U kabelů s papírovou izolací nabývá hodnot kolem 0,2 mS/km.

Druhou část rovnice tvoří kmitočtově závislá část. Je dána v poměru k vodivosti provozní kapacity. Parametr  $k_g$  je koeficientem střídavého svodu. Pro kabely s papírovou izolací nabývá hodnot  $1,2 \cdot 10^{-3}$ . Tento parametr je kmitočtově závislý a uvedená hodnota platí při kmitočtech do 10kHz. Hodnota svodu je u kabelových vedení minimální a v mnoha případech ji lze zanedbat [?]

## 1.10.2 Výpočet charakteristických veličin vedení

Úsek dvouvodičového vedení lze popsat pomocí náhradního modelu, který se skládá z pasivních prvků. Vstupní parametry napětí -  $u(x, t)$  a proud -  $i(x, t)$  jsou různé od výstupních parametrů kde napětí je:  $u(x+dx, t)$  a proud  $i(x+dx, t)$ .

## 1.11 Modely vedení

Vedení představuje složitý obvod s rozprostřenými parametry. Elektrické veličiny v těchto obvodech pak nejsou jen funkcí času ale i prostorových souřadnic. Řešit tyto obvody pak lze pomocí parciálních rovnic. Pro zjednodušení a vyhnutí se parciálním rovnicím vzniká řada modelů, které jsou zjednodušením a jsou matematickým popisem vedení.

Různé modely jsou zaměřeny na řešení různých problémů. Existují i umělá vedení, což jsou převážně kaskáda elementárních dvojbranů, které simulují elektrické vlastnosti vedení. Model umělého vedení se využívá například pro počítačovou simulaci elektrických obvodů, vývoj a testování různých přenosových zařízení.

Při vytváření modelů je nutné definovat, jaké parametry modelem sledujeme. A to zda modelujeme kmitočtovou závislost na primárních a nebo sekundárních parametrech vedení a v jakém rozsahu kmitočtů [9].

## 1.12 Útlum odrazu

Odras signálu od vzdáleného konce je nežádoucí jev. Odras vzniká odchylkou od vstupní impedance kanálu. Pokud je zakončovací impedance shodná s impedancí vedení odraz nevzniká a vedením se šíří jen postupná vlna. Koeficient odrazu bude roven 0 a útlum odrazu se bude blížit nekonečnu. Pokud impedance zátěže není shodná s impedancí kanálu dochází ke vzniku odražené vlny.

Odražená vlna pak způsobí zvlnění vstupní impedance a přenosových charakteristik kanálu. Pro případ, kdy nastane totální odraz bude koeficient odrazu roven 1 a útlum odrazu bude nulový. Impedance vedení se liší podle kmitočtu přenášeného signálu. Musíme tak rozlišovat, pro jaký signál je vedení využíváno.

- Hovorové pásmo - 1 kHz, impedance  $600\Omega$  - Analogové telefony
- Střední pásmo - 100 kHz, impedance  $150\Omega$  - Nosné telefonní systémy s kmitočtovým dělením
- Střední pásmo - 300 kHz, impedance  $135\Omega$  - Digitální účastnické přípojky
- Vyšší pásmo - 1 MHz, impedance  $120\Omega$  - Digitální PCM systémy
- Nejvyšší pásmo - nad 10 MHz, impedance  $100\Omega$  - Datové sítě

Pro měření útlumu odrazu v kanálu se ke vzdálenému konci připojí zakončení s impedancí  $100\Omega$  [12].

Stupeň korektnosti impedančního zakončení udává koeficient odrazu

$$r = \left| \frac{Z_2 + Z_C}{Z_2 - Z_C} \right| \quad (1.8)$$

Útlum odrazu je pak vyjádřen vztahem:

$$A_r = 20 \log \left| \frac{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_C} \right| \quad [dB] \quad (1.9)$$

kde:

- $\mathbf{Z}_2$  = Impedance zátěže
- $\mathbf{Z}_C$  = Impedance vedení

Sekundární parametry vedení můžeme aproximovat pomocí mocninné řady. Měrný útlum lze zjednodušeně modelovat pomocí funkce s parametrem  $k_\alpha$  a závislosti na odmocnině kmitočtu vedení.

$$\alpha(f) = k_\alpha \sqrt{f} \quad [dB/km] \quad (1.10)$$

Pro vedení párů je vhodné pro přesnější modelování využít vztahu:

$$\alpha(f) = k_1 \sqrt{f} + k_2 f + k_3 \frac{1}{\sqrt{f}} \quad [dB/km] \quad (1.11)$$

Parametry  $k_1, k_2, k_3$  jsou určeny ze sekundárních parametrů vedení a jsou tabulizovány [6].

## 1.13 Vložný útlum

Vložný útlum  $A_V$  je definován jako absolutní hodnota poměru dvou zdánlivých výkonů. A to výkonů  $P_1$ , který je výkonem generátoru o vnitřním napětí  $U_i$  a vnitřní impedanci  $Z_i$ . A výkonu  $P_2$  který je výkon, který generátor dodává do zakončovací impedance  $Z_L$  [9]. Platí tedy:

$$A_V = 10 \log \left| \frac{P_1}{P_2} \right| \quad [dB] \quad (1.12)$$

kde:

- $P_1$  = Výkon generátoru
- $P_2$  = Výkon na konci vedení

Pro  $P_1$  pak platí:

$$P_1 = \frac{U_i^2}{Z_i} \quad [W] \quad (1.13)$$

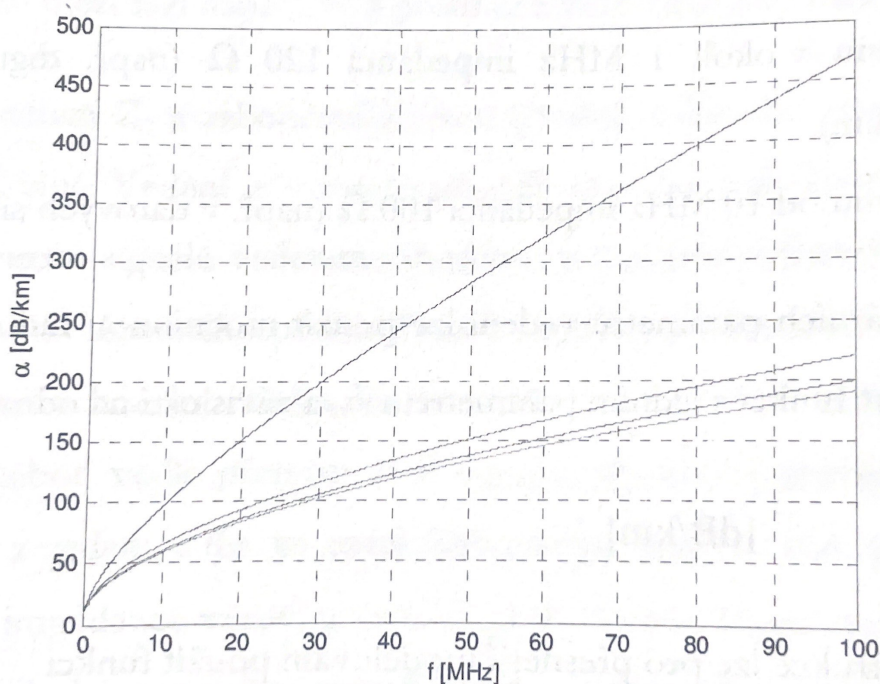
kde:

- $U_i$  = Napětí na výstupu generátoru
- $Z_i$  = Vnitřní impedance generátoru

Pro  $P_2$  pak platí:

$$P_2 = \frac{U_2^2}{Z_L} \quad [W] \quad (1.14)$$

kde:



Obr. 1.3: Graf závislosti měrného útlumu na frekvenci pro vedení párové konstrukce, odshora kabely kategorie 3,5,6,7. Převzato z [6]

- $U_2$  = Napětí na konci vedení
- $Z_L$  = Ukončovací impedance

Útlum závisí na parametrech vedení a to hlavně na délce, průřezu vodiče a frekvenci přenášeného signálu.

Měrný útlum vedení pak udává útlum na délku vedení 1 km (u kabelů UTP /STP je délka 100m)

$$\alpha = \frac{A}{l} \quad [dB/km] \quad (1.15)$$

Před samotným měřením útlumu je nutné přístroje zkalibrovat. Při kalibraci se změní celkový útlum Symetrizačních transformátorů. Přístroje změní útlum v celém frekvenčním pásmu a následně jej odečtou od změřeného útlumu při měření daného vedení [6].

## 1.14 Nehomogenity kabelů

Kabel nelze z ekonomického hlediska vyrobit zcela dokonale. Mezi hlavní nedokonalosti při výrobě kabelů patří:

- Kolísající průměr měděného drátu
- Různá velikost izolace
- Různá délka skrutů při stáčení

Pro ekonomičnost výroby kabelových svazků je pak nutné připustit toleranci elektrických vlastností kabelů. Ty pak rozlišujeme na: [4]

- Nehomogenity primárních parametrů
- Nesymetrie dílčích kapacit, svodů, odporů, indukci

### 1.14.1 Nehomogenity primárních parametrů

Nehomogenity jsou způsobeny nedokonalostí výroby. Vodiče jednotlivých výrobních sérií mají nepatrně odlišné hodnoty  $R$  (efektivní odpor),  $L$  (indukčnost),  $C$  (provozní kapacita),  $G$  (provozní svod). Kritická je pak hlavně provozní kapacita  $C$ . Při napojování různých kabelových sérií pak díky různosti parametrů vznikají odrazy. Odrazy se pak dále šíří vedením a to jak zpět o vysílači tak k přijímači jako vícenásobné odrazy.

Tyto nedokonalosti je možné eliminovat co nejkvalitněji výrobou kabelů a také kvalitní montáží (spojkami) [4].

### 1.14.2 Nesymetrie dílčích kapacit a svodů

Nesymetrie dílčích kapacit se taktéž někdy značí jako příčná nesymetrie. Dílčí kapacita vzniká mezi dvěma vodivými předměty. Je pak určena geometrickou konfigurací - tvarem, vzdáleností, polohou vodivých předmětů a dielektrikem (izolací) mezi nimi.

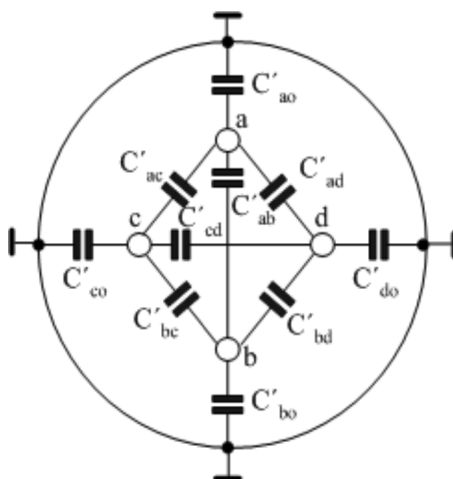
Dílčí kapacita mezi dvěma vodiči se pak nikdy neuplatňuje samostatně - vodiče nepůsobí jen pouze na sebe navzájem ale i na další vodiče. Zohledněním dílčích kapacit mezi vodiči vzniká efektivní dílčí kapacita. Tedy účinná dílčí kapacita mezi dvěma vodiči.

Pokud je uspořádání vodičů elektricky symetrické jsou efektivní dílčí kapacity mezi vodiči stejné. Nevzniká tak kapacitní nesymetrie mezi páry a tím nevzniká přeslech mezi páry.

Pokud však vodiče nejsou dokonale elektricky symetrické dochází ke kapacitní nesymetrii mezi páry a tím k přeslechům mezi páry. Po instalaci kabeláže můžeme tuto nesymetrii změřit a eliminovat přeslech tím, že vložíme přídatnou kapacitu mezi páry tak, aby se kapacitní nesymetrie vyrovnala a došlo k odrušení přeslechů [4].

Nesymetrie dílčích svodů je způsobená ztrátami v dielektriku (izolaci). Neovlivňuje tolik přenos jako nesymetrie kapacit.





Obr. 1.4: Schématické znázornění dílčích kapacit unitř čtyřky. Převzato z [4]

Provozní kapacita pak značí sumu efektivních dílčích kapacit mezi vodiči páru a okolními vodiči + kapacitu daného páru. Provozní kapacita se určuje pro délku kabelu  $l$ .

Nesymetrie lze znázornit na kabelovém vedení čtyřky, která je složená ze dvou párů, a to vodičů  $a + b, c + d$ .

Každý vodič má kapacitu vůdči zemi, a to kapacity:  $C'_{a0}, C'_{b0}, C'_{c0}, C'_{d0}$ . Toto jsou nesymetrie dílčích svodů.

Vodiče ve vedení pak na sebe navzájem působí a vznikají kapacity každý s každým, tedy:  $C'_{ab}, C'_{ac}, C'_{ad}, C'_{bc}, C'_{bd}, C'_{cd}$ . Pokud kapacity nejsou stejné vznikají nesymetrie mezi páry. Kapacity mezi vodiči pak ovlivňuje i poloha a vzdálenost mezi vodiči.

Sečtením dílčí kapacity  $C'_{ac}$  spolu se zemními kapacitami ( $C'_{c0}$  a  $C'_{a0}$ ) vzniká dílčí vazební kapacita které se rovná:

$$C_{ac} = C'_c + \frac{C_a C_c}{4C} \quad (1.16)$$

$$C_{ad} = C'_d + \frac{C_a C_d}{4C} \quad (1.17)$$

$$C_{bc} = C'_c + \frac{C_b C_c}{4C} \quad (1.18)$$

$$C_{bd} = C'_d + \frac{C_b C_d}{4C} \quad (1.19)$$

Kde:

- $C$  = průměrná kapacita všech žil

Pokud nejsou kapacity stejné a tedy můstek není vyrovnán dochází k přenosu rušivého napětí z okruhu a-b do c-d a to v poměru kapacit. Celkové rušivé napětí pak je:

$$U_2 = U_1 \left( \frac{C'_{ac}}{C'_{ac} + C'_{bc}} - \frac{C'_{ad}}{C'_{ad} + C'_{bd}} \right) \quad [V] \quad (1.20)$$

Rovnici pak můžeme upravit na:

$$U_2 = U_1 \frac{C'_{ac}C'_{bd} - C'_{bc}C'_{ad}}{(C'_{ac} + C'_{bc} + C'_{ad} + C'_{bd}) \cdot C_{cd}} = U_1 \frac{k}{C_{cd}} \quad [V] \quad (1.21)$$

z předchozího vztahu pak lze vyjádřit kapacitní vazbu mezi okruhy jako:

$$k = \frac{C'_{ac}C'_{bd} - C'_{bc}C'_{ad}}{C'_{ac} + C'_{bc} + C'_{ad} + C'_{bd}} \quad (1.22)$$

Díličí kapacity jsou však téměř totožné se střední hodnotou. Můžeme tak uvažovat tedy:

$$C = \frac{C'_{ac} + C'_{bc} + C'_{ad} + C'_{bd}}{4} \quad (1.23)$$

Vztah pro vazbu mezi okruhy pak lze upravit na:

$$k = \frac{(C'_{ac} + C'_{bd}) - (C'_{bc} + C'_{ad})}{4} = \frac{k_1}{4} \quad (1.24)$$

kde:

- $k_1$  = Kapacitní nerovnováha mezi okruhy.

Z výše uvedeného vzorce vyplývá, že útlum přeslechu je závislý na kapacitní vazbě, které je rovna čtvrtině kapacitní nerovnováhy, které je:

$$k_1 = (C'_{ac} + C'_{bd}) - (C'_{bc} + C'_{ad}) \quad (1.25)$$

Obdobným způsobem lze vyjádřit vazby mezi kmenovým a sdruženým okruhem dané čtyřky.

$$k = \frac{(C'_{ac} + C'_{ad}) - (C'_{bc} + C'_{bd})}{2} = \frac{k_2}{2} \quad (1.26)$$

$$k = \frac{(C'_{ac} + C'_{bc}) - (C'_{ad} + C'_{bd})}{2} = \frac{k_3}{2} \quad (1.27)$$

kde

- $k_2$  a  $k_3$  = kapacitní nerovnováhy mezi kmenovým a sdruženým okruhem

Hodnoty  $k_1, k_2, k_3$  mohou nabývat kladných i záporných hodnot podle převažujících vazeb. Cílem je dosáhnout stavu kdy  $k_x = 0$ . Toto je možné dosáhnout při spojování kabelů kdy spojujeme páry s kladnými hodnotami na páry s hodnotami zápornými a obráceně. Experimentálně lze stanovit

## 1.15 Nehomogenity vedení

Vedení je delší úsek spojovaný s jednotlivých vyrobených kabelů. Do nehomogenit vedení proto přibývá problematika spojování jednotlivých kabelů. Charakteristická impedance  $Z_c$  není na celém vedení stejná, ale osciluje kolem Střední hodnoty  $Z_c$ . Důvodem těchto odchylek jsou dílčí nehomogenity jednotlivých kabelů.

Při spojení dvou výrobních délky kabelů s různou impedancí dochází k odrazu části vln. Tyto odrazy se opakují na všech impedančních nehomogenitách na vedení, začátku i konci vedení.

Součet všech těchto jedenkrát odražených vln způsobí změnu vstupní impedance a tím i změnu výkonu užitečného signálu. Impedance je kmitočtově závislá a proto každá změna impedance způsobí rozvlnění kmitočtových charakteristik.

Součet všech dvakrát odražených vln se projeví primárně na vzdáleném konci vedení. Vícekrát odražené signály jsou již natolik utlumené, že nezpůsobují problémy [4].

V lokálních sítích se snažíme vyhnout napojování více kabelů v jedné trase. Vyhne se tak výše uvedeným problémům. I z ekonomického hlediska nejsou spojky vhodná volba.

## 1.16 Modely přeslechů

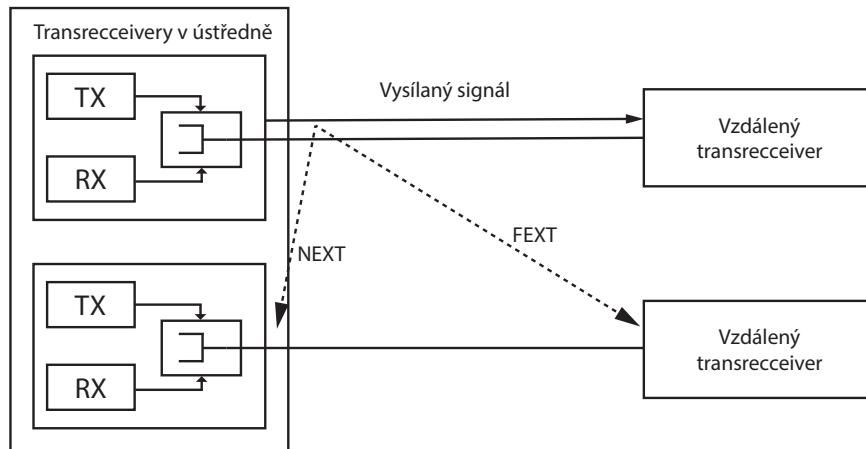
Přeslech můžeme chápat jako rušení, které ovlivňuje přenášený signál. Pro výpočet velikosti rušícího signálu využíváme výkonovou přenosovou funkci. Výsledný průběh funkce je pak závislý na typu použitého kabelu, počtech párů v kabelu a jejich délce.

Přeslechy je velice složité modelovat, protože závisí na stanovení konkrétních vazebních parametrů daného kabelového vedení. Skutečné měření přeslechů v závislosti na kmitočtu pak pak vykazuje značné zvlnění. Toto zvlnění vzniká jako důsledek nerovnoměrnosti kapacitních a induktivních nerovnováh. Výsledné přeslechy tak jsou závislé na procesu výroby kabelu, dodržení tolerancí, způsobu tažení a ohýbání kabelu.

Není obvyklé, aby se zkoumaly přeslechy mezi jednotlivými páry navzájem. Většinou potřebujeme znát míru ovlivnění zkoumaného páru od všech ostatních párů. Pak lze stanovit střední míru vazeb a tu aplikovat na všechny páry v kabelu.

Existují dva modely výpočtu rušení. Ten první stanoví průměrnou úroveň rušení páru a tato úroveň se pak násobí počtem aktivních párů v daném kabelu. Je zde lineární nárůst rušení závislý na počtu aktivních párů Základem druhého modelu je nejhorší případ přeslechu mezi sousedními páry. Při analýze se do modelu postupně přidávají páry od nejsilněji rušícího po nejslaběji rušícího. V doporučení ITU jsou k dispozici konstanty pro rušení, které byly získány měřením a vyhodnocením

přeslechů na kabelu s 50 páry. V dalších výpočtech budeme počítat s tímto modelem [9].



Obr. 1.5: Modely přeslechů

### 1.16.1 Přímý a nepřímý přeslech

Přímý přeslech je přeslech, kdy rušení přechází přímo z rušícího vedení do vedení rušeného. Rušící vlny přecházejí do rušeného vedení přes nesymetrie.

Nepřímý přeslech vzniká pomocí dalšího přenosového mechanismu. Přenos vln se uskutečňuje například pomocí odrazů. Tento přeslech eliminujeme zabráněním odrazů - tedy co nejhladší impedanční charakteristikou [4].

### 1.16.2 NEXT

Near end cross talk, neboli přeslech na blízkém konci se měří na stejné straně, na které vysíláme rušení. Je rostoucí s frekvencí a v závislosti na použité technologii přenosu je nutné ho eliminovat. Například pro technologii VDSL. [13] Množství přeslechů mezi jednotlivými páry v referenčním telefonním kabelu lze pak modelovat pro NEXT vztahem [9]:

$$|H_{next}(f)| = K_{next} \frac{N^{0,6}}{49} f^{\frac{3}{2}} \quad (1.28)$$

kde:

- $K_{next} = 8,818 * 10^{-14}$
- $N$  = počet zdrojů rušení
- $f$  = kmitočet v Hz

Výkonovou spektrální hustotu rušení, které pochází ze sousedních systémů  $PSD_{NEXT}(f)$  lze pomocí přenosové funkce přeslechů spočítat jako:

$$PSD_{NEXT}(f) = PSD_{Disturber}(f) |H_{NEXT}(f)|^2 \quad (1.29)$$

kde:

- $PSD_{Disturber}(f)$  = výkonová spektrální hustota rušícího systému

Útlum přeslechů na blízkém konci pak získáme poměrem naměřených výkonů. Měříme na stejné straně jako vysíláme rušení do vedení [6].

$$A_{NEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \right) \quad [dB] \quad (1.30)$$

kde:

- $P_{1N}$  = vstupní výkon na rušeném páru
- $P_{2N}$  = výstupní výkon rušeného páru na blízkém konci

Výpočet vstupního i výstupního výkonu pak realizujeme pomocí vzorce:

$$P = \frac{(U_{RMS})^2}{z} \quad [W] \quad (1.31)$$

kde:

- $U_{RMS}$  = Napětí naměření na osciloskopu
- $z$  = impedance vedení. Pro UTP kabely volíme  $100\Omega$

Norma udává pro jednotlivé třídy kabeláží a jejich kmitočtů tyto meze pro minimální NEXT [12]. Parametry pro jednotlivé třídy zajišťují funkčnost v dané třídě s daným kmitočtem a tím i přenosovou rychlostí.

Norma také specifikuje mezní hodnoty NEXT pro hlavní kmitočty. Meze výkonové spektrální hustoty specifikuje norma pro kabely třídy D, E, F.

Tab. 1.1: Vztahy pro meze NEXT v kanále

Třída	Kmitočet [MHz]	Mimální NEXT [dB]
A	$f = 0, 1$	27,0
B	$0, 1 \leq f \leq 1$	$25 - 15 \cdot \lg f$
C	$1 \leq f \leq 16$	$39, 1 - 16, 4 \cdot \lg f$
D	$1 \leq f \leq 100$	$-20 \cdot \lg \left( 10^{\frac{65,3-15 \cdot \lg f}{-20}} + 2 \cdot 10^{\frac{83-20 \cdot \lg f}{-20}} \right)$ , max 60,0
E	$1 \leq f \leq 250$	$-20 \cdot \lg \left( 10^{\frac{74,3-15 \cdot \lg f}{-20}} + 2 \cdot 10^{\frac{94-20 \cdot \lg f}{-20}} \right)$ , max 65,0
F	$1 \leq f \leq 600$	$-20 \cdot \lg \left( 10^{\frac{102,4-15 \cdot \lg f}{-20}} + 2 \cdot 10^{\frac{102,4-15 \cdot \lg f}{-20}} \right)$ , max 65,0

### 1.16.3 FEXT

Far end cross talk, neboli přeslech na vzdáleném konci. Detekujeme ho na opačné straně než na které vysíláme rušení. Přenosová funkce pro přeslechy na vzdáleném konci je obdobná přenosové funkci na blízkém konci. Díky odporu vodičů a útlumu vedení. Rovnice tedy musí zahrnovat i délku vazební cesty a přenosovou charakteristiku vedení. Pro referenční (50 párový) telefonní kabel pak platí [9]:

$$|H_{Fext}(f)| = K_{Fext} \frac{N^{0,6}}{49} f^2 l |H_{channel}(f, l)| \quad (1.32)$$

kde:

- $K_{Fext} = 8 * 10^{-20}$
- $N$  = počet zdrojů rušení
- $f$  = kmitočet v Hz
- $H_{channel}(f, l)$  = přenosová funkce vedení
- $l$  = délka vedení v km, kde délka vedení = délka vazební cesty. Pokud systém ruší systémy jen na části trasy je nutné délky odlišit.

Výkonová spektrální hustota pro přeslechy na vzdáleném konci je pak:

$$PSD_{FEXT}(f) = PSD_{Disturber}(f) |H_{FEXT}(f)|^2 \quad (1.33)$$

kde:

- $PSDDisturber(f)$  = výkonová spektrální hustota rušícího systému
- Útlum přeslechů na vzdáleném konci pak získáme poměrem naměřených výkonů. Měříme na opačné straně jako vysíláme rušení do vedení [6].

$$A_{FEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \right) \quad [dB] \quad (1.34)$$

kde:

- $P_{1N}$  = vstupní výkon na rušeném páru
- $P_{2F}$  = výstupní výkon rušeného páru na vzdáleném konci

K výpočtu výkonů pak použijeme vzorec 4.7

Taktéž pro FEXT norma udává parametry FEXT. Parametr FEXT se však aplikuje pouze na třídy kabelů D, E, F [12]. Parametry pro jednotlivé třídy zajišťují funkčnost v dané třídě s daným kmitočtem a tím i přenosovou rychlostí.

### 1.16.4 FEXT a ELFEXT

Je možné se setkat s parametrem ELFEXT namísto FEXT. Rozdíl v těchto parametrech je v hodnotě napětí rušícího vedení. FEXT je poměrná hodnota naměřeného přeslechu a napětí na **vstupu** do rušícího vedení. ELFEXT je poměrná hodnota naměřeného přeslechu a napětí na **výstupu** rušícího vedení [10].

Tab. 1.2: Vztahy pro meze ELFEXT v kanále

Třída	Kmitočet [MHz]	Mimální ELFEXT [dB]
D	$1 \leq f \leq 100$	$-20 \cdot \lg \left( 10^{\frac{63,8-20 \cdot \lg f}{-20}} + 4 \cdot 10^{\frac{75,1-20 \cdot \lg f}{-20}} \right)$
E	$1 \leq f \leq 250$	$-20 \cdot \lg \left( 10^{\frac{67,8-20 \cdot \lg f}{-20}} + 4 \cdot 10^{\frac{83,1-20 \cdot \lg f}{-20}} \right)$
F	$1 \leq f \leq 600$	$-20 \cdot \lg \left( 10^{\frac{94-20 \cdot \lg f}{-20}} + 4 \cdot 10^{\frac{90-15 \cdot \lg f}{-20}} \right), \max 65,0$

### 1.16.5 PSNEXT / PSFEXT

Útlum celkového přeslechového rušení se používá v kabelu s více metalickými páry. Popisuje vzájemný vliv více vedení na jeden konkrétní pár. Skládá se s dílčích přeslechů mezi rušícím a rušeným párem.

PSNEXT a nebo PSFEXT označuje stupeň rušení kabelu při obsazení celého kabelu systémy se stejným frekvenčním spektrem. PS FEXT se dá vyjádřit obdobně [6].

Výpočet PSNext je pak:

$$PS_{NEXT,k} = -10 \log \sum_{i=1, i \neq k}^n 10^{-0,1 \cdot A_{NEXT}(i,k)} \quad [dB] \quad (1.35)$$

kde:

- $A_{NEXT}(i, k)$  = útlum přeslechu na blízkém konci mezi rušícím párem i a rušeným párem k.
- $n$  = počet prvků

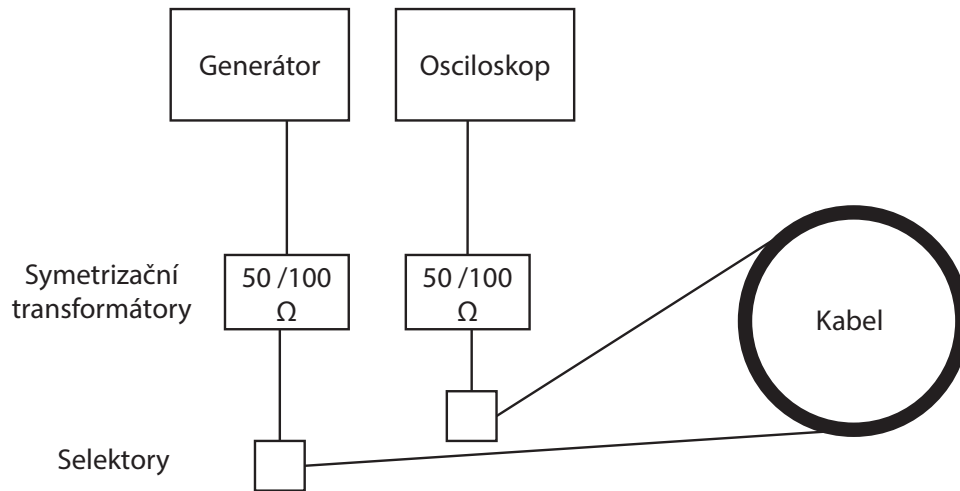
## 1.17 Měření symetrických vedení

Měření přenosových parametrů najde uplatnění například při ověřování instalované kabeláže. Lze využít automatizované obvodové analyzátoři, které jsou konstruované pro tato měření a výstupem jsou pak přenosové parametry - charakteristika útlumu vedení, přeslechů, odrazu, nesymetrie, charakteristická impedance a další.

Pokud bychom připojili vodiče z páru mezi generátor a osciloskop (měřicí přístroj) přímo tak bychom jeden vodič z páru uzemnili a měřili bychom tak jen jeden vodič. Proto se při měření symetrických vedení využívají symstrizační transformátory.

Problémem měření symetrického vedení je konstrukce symetrizačního transformátoru pro široké frekvenční pásmo. Dalším problémem je bezodrazné připojení k měřícím přístrojům. Obvykle jsou generátory signálů a osciloscipy impedančně přizpůsobeny na zátěž  $50 \Omega$ . Datové páry pak vyžadují impedanci  $100 \Omega$  [6].

Selektory jsou pak přepojovací pole, které umožňují připojení / přepojení / odpojení jednotlivých párů pro kalibraci, volbu měření (NEXT/FEXT), spojení, zakončení impedancí a mnoho dalšího.



Obr. 1.6: Blokové schéma měření

Symetrizační transformátor musí splňovat podmínky pro přenos a to:

- Dva přímo připojené transformátory musí mít útlum  $\leq 15$  dB
- Útlum odrazu z nesymetrické strany  $\geq 20$  dB
- Potlačení souhlasného signálu  $\geq 50$  dB při 1 MHz a  $\geq 20$  dB při frekvencích  $> 1$  MHz

Pro měření v komerčních aplikacích se využívají certifikované měřicí přístroje. Výstupem těchto měření jsou pak protokoly, kde je uvedeno, zda dané vedení splňuje anebo nesplňuje parametry dané normou.

## 1.18 Měření charakteristické impedance a útlumu odrazu

Charakteristická impedance  $Z_c$  je z definice poměr mezi napětovou a proudovou vlnou, která se šíří stejným směrem. Charakteristická impedance je komplexní veličina a udává se buďto jako reálná a imaginární část nebo absolutní hodnota s fází. Pro vysoké kmitočty na homogenních vedeních je reálná část konstantní [6].

Reálné kabely však homogenní nejsou proto se měří impedance na začátku vedení, když je vzdálený konec impedančně přizpůsobený. Samotné měření pak probíhá tak, že se nejprve změří vedení naprázdno a poté nakrátko. Průběh výsledné charakteristiky pak odráží nehomogenity na vedení.



Útlum odrazu vyjadřuje velikost odraženého signálu, který vzniká nehomogenitami na vedení a na vedením impedančně nepřizpůsobeném. Útlum odrazu můžeme měřit obvodovým analyzátozem, který umožňuje měřit rozptylové S parametry nebo pomocí generátoru, přijímače měřícího modul a fázi a můstku pro měření odrazů.

Kalibrace přístrojů probíhá tak, že symetrizační transformátor na straně vedení ukončíme nakrátko, naprázdno a nominální impedancí. Naměřené hodnoty pak slouží pro korekci měření s kabelem [6].

## 1.19 Parametry vedení

V této kapitole jsou popsány některé parametry strukturované kabeláže, určené pro lokální datové sítě (LAN), spolu s tabulkovými hodnotami, které by neměly přesáhnout [6].

- Referenční délka – 100 metrů.
- Stejnoseměrný odbor – by neměl přesáhnout hodnotu  $30 \Omega / 100 \text{ m}$ .
- Izolační odpor – délky 1 km nesmí být menší než  $500 \text{ M}\Omega$ .
- Kapacitní nerovnováha – proti zemi nesmí přesáhnout  $1600 \text{ pF/km}$ .
- Rychlost šíření – musí být  $0,6 \cdot c$  nebo vyšší na kmitočtu 1 MHz a  $0,65 \cdot c$  a víc na kmitočtu 10 MHz a 100 MHz. Kde  $c$  je rychlost šíření elektromagnetické vlny ve vakuu.

Rozdíl v rychlosti mezi páry nesmí přesáhnout  $40 \text{ ns}/100 \text{ m}$ .

- Vstupní impedance – předepsaná nominální absolutní hodnota je  $100 \Omega$  pro nestíněné kabely. Pro stíněné kabely je možné použít:  $100, 120$  a  $150 \Omega$  s tolerancí  $\pm 15 \Omega$ .
- Útlum odrazu – při nominálním zakončení musí být vyšší než 23 dB (pro pásmo 10 až 100 MHz). Pokud je kabel certifikovaný pro přenos 600 MHz platí tato mez do 300 MHz a dále pak 10 dB/dekáda.
- Vazební útlum – nesmí být menší než 55 dB (nestíněný kabel, pásmo 30-100 MHz), 40 dB (stíněný kabel do 100 MHz), 80 dB (stíněný kabel, pásmo do 600 MHz, nad 100 MHz klesá mez 20 dB /dekáda).
- Útlum vedení – Limity pro útlum vedení jsou definovány v tabulce níže. Naměřené hodnoty nikde nesmí protnout mezní křivku proloženou těmito body.

Přesné parametry pro jednotlivé kmitočty a dané třídy kabeláže lze najít v normě. Například v normě ČSN EN 50173-1 jsou uvedeny jak minimální / maximální přípustné hodnoty parametrů vedení tak jejich výpočty pro dané kmitočty.

Vodič datového strukturovaného kabelu může být tvořena:

- plným měděným materiálem
- měděným lankem

$f$ [MHz]	1	4	10	16	20	31,25	62,5	100
$A$ [dB]	2,1	4,3	6,6	8,2	9,2	11,8	17,1	22
$A_{NEXT}$ [dB]	62	43	47	44	42	40	35	32

Tab. 1.3: Mezní hodnoty pro útlum vedení a útlum přeslechu NEXT kabelů do 100 MHz

$f$ [MHz]	1	4	10	16	20	31,25	62,5	100	155	200	300	600
$A$ [dB]	2,1	3,9	6	7,6	8,5	10,6	15	19	24	27	33	50
$A_{NEXT}$ [dB]	80	80	80	80	80	80	75	71	68	66	64	60

Tab. 1.4: Mezní hodnoty pro útlum vedení a útlum přeslechu NEXT kabelů do 600 MHz

Kabely z měděného lanka se díky své ohebnosti používají pro výrobu krátkých propojovacích kabelů (patchcords). Mají ovšem horší některé přenosové vlastnosti. Kabely z plného materiálu se využívají pro pevnou instalaci v kabelových trasách. Nepředpokládá se, že by s nimi bylo manipulováno. Kabely s plnou žílou mají menší mechanickou ohebnost, ale lepší přenosové vlastnosti [6].

Průměry žil jednotlivých kabelů se mohou lišit. Pro označení průměru se využívá americká norma AWG. Norma AWG tabulkově přiřazuje AWG číslo k danému průměru (ploše) žíly. Standardní strukturované kabeláž má velikost žil AWG 24 a tedy průměr 0,5mm. Obecně platí že čím vyšší AWG číslo tím menší průměr žíly [6].

Izolace mezi jednotlivými žílami je dnes plastová - PVC nebo PE. Izolanty musí vykazovat minimální dielektrické ztráty v celém pásmu. Izolanty rovněž musí splňovat přísné parametry z hlediska požární odolnosti. Pokud je nutné kabel umístit do větracích šachet, podhledových stropů a obecně tam, kde se vyskytují lidé a kabel není ve stěně musí se použít kabelů s označením LSZH - Low Smoke Zero Halogen. Tyto kabely mají izolaci z materiálů, které neobsahují halogeny, které při zahoření produkují škodlivé spaliny a vyšší množství kouře. Tyto kabely jsou však dražší [6].

## 1.20 Měření v časové oblasti TDR

Měření v časové oblasti (TDR - Time domain Reflectometry) se využívá pro zjištění poruch a diagnostiku vedení. Zařízení pracuje na principu měření času, který signál potřebuje k dosažení na místo nehomogenity a zpět.

Tímto měřením lze získat data o délce vedení, spojích, přerušování vedení, nehomogenit vedení, proniknutí vody do vedení, odboček a další.

Měření se skládá z pulzního generátoru, řídicích a oddělovacích obvodů a osciloskopu. Generátor vysílá do kabelu pulzy a osciloskop tyto pulzy přijímá. Všechny

nehomogenity na vedení způsobí odraz daného pulzu.

Přijímané pulzy potom analyzujeme. Na základě času přijetí můžeme vypočítat vzdálenost, jakou signál urazil, než byl odražen. Pokud je odražený signál ve fázi s vysílaným, znamená to nehomogenitu zvyšující impedanci oproti charakteristické impedanci. Pokud je odražený signál v opačné fázi znamená to nehomogenitu snižující charakteristickou impedanci. Hlavní výhodou je přesná lokalizace daného jevu na vedení.

Měření ovlivňuje amplituda a šířka vyslaného pulzu. V měření platí jednoduchá úměra: čím vyšší amplituda, tím vzdálenější nehomogenity lze detekovat. Čím širší pulz, tím větší dosah, ale menší přesnost měření. Amplitudu však nelze zvolit příliš vysokou, aby nedocházelo k deformaci signálu. Používají se pulsy s amplitudou 20V. Šířka pulsu bývá nastavitelná a to většinou od 2 do 6000 ns. Lze si tak zvolit vhodnou šířku pulzu podle vedení, které je měřeno.

Příliš široký pulz nedokáže rozlišit dvě chyby, které jsou blízko u sebe. V tomto případě budeme detekovat pouze jednu chybu. Taktéž nejsme schopni detekovat chyby blízké měřicímu přístroji. Vzniká úsek, který se nazývá slepý.

$t_W$ [ns]	$l$ [m]	$l_0$ [m]
2	165	2
10	250	4
100	660	16
1000	1980	120
6000	5850	564

Tab. 1.5: Příklady dosahu a slepých úseků v závislosti na délce pulzu [6]

Aby bylo možné provést lokalizaci závady musí být známá rychlost šíření pulzu v daném vedení. Rychlost šíření  $v$  lze vyjádřit jako převrácenou velikost směrnice fázové charakteristiky.

$$v = 10^3 \cdot \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 10^3}{b} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_R}} c \quad [m/s; rad/s, rad/km; s/km] \quad (1.36)$$

kde:

- $c$  = rychlost světla ve vakuu -  $2,9979 \cdot 10^8$  m/s
- $\varepsilon$  = perermitivita

Prostředí, kterým se impulz šíří je v rovnici určem pomocí  $\varepsilon_R$ . Pro vakuum je tato hodnota rovna 1. Pro vzduch pak 1,0167. Plasty mají perimitivitu 2 až 5, záleží na konkrétním materiálu. Pro popis šíření se častokrát používá hodnota NVP - Nominal Velocity of Propagation. Tedy poměr rychlosti šíření v kabelu a ve vakuu. Tento poměr lze vyjádřit i v %.

Vzdálenost poruchy lze zjistit jednoduchým výpočtem:

$$l_x = \frac{v}{2}t_x = \frac{c \cdot NVP}{2}t_x \quad [m; m/s, s; m/s, -, s] \quad (1.37)$$

kde:

- $l_x$  = vzdálenost poruchy
- $t_x$  = čas mezi vysláním a přijetím pulzu
- $v$  = rychlost šíření pulzu v médiu
- $c$  = rychlost světla ve vakuu
- $NVP$  = poměr mezi rychlostí světla ve vakuu a rychlostí šíření v médiu

Typ vedení (izolace, průměr jádra)	NVP [-]
telefonní symetrické, papír-vzduch, 0,4mm	0,64
telefonní symetrické, PE, 0,4mm	0,66
koaxiální, 2,6/9,5 mm	0,96
koaxiální, 1,2/4,4 mm	0,94
koaxiální, 0,7/2,9 mm	0,85
UTP kategorie 3, 0,5mm	0,62
UTP kategorie 4, 0,5mm	0,69
UTP kategorie 5, 0,5mm	0,78

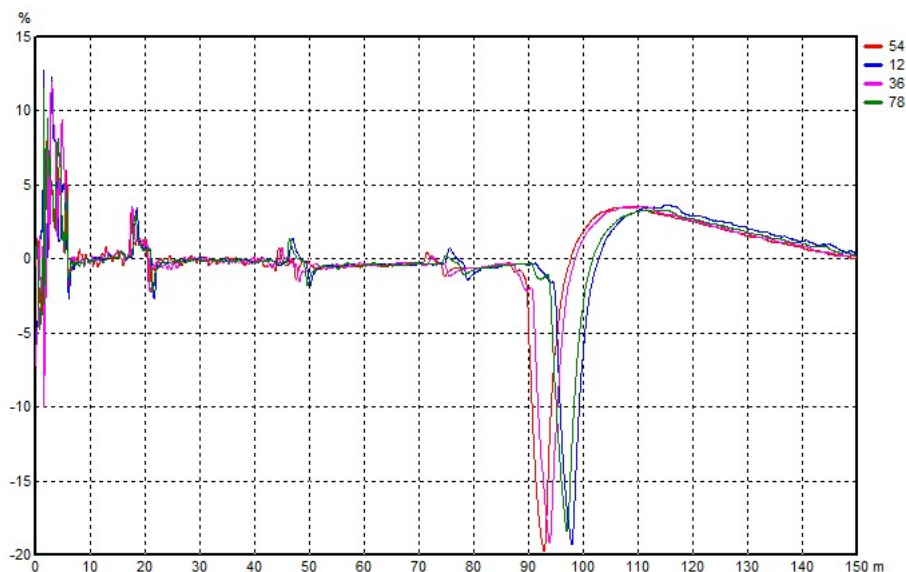
Tab. 1.6: Příklady NVP pro vybrané typy kabelů [6]

Mimo měření homogenity a délky vedení lze měřit i jiné parametry. Pokud detekujeme odražený impulz na jiném vedení, než do kterého byl vyslán signál mlze měřit přeslech na blízkém konci - NEXT. Lze taktéž snadno rozpoznat chybné zapojení vodičů mezi páry, nezakončené odbočky a další jinak obtížně zjistitelné prvky. Pomocí TDR nelze měřit vysokoohmové zkraty nad 1 kΩ[6].

V obrázku 1.7 je náměr TDR vedení v laboratoři. Lze pozorovat úvodní šum, spoje mezi propojovacími kabely a zásuvkou ve stole. Dále pozorujeme že kabel není v celku, ale jsou na něm 3 spoje. Snižující se amplituda na místech spojů je dána vzdáleností a tedy útlumem. Z grafu pak můžeme pozorovat celkovou délku vedení okolo 95 metrů.

## 1.21 Měření pro systémy xDSL

Systémy xDSL využívají diskretní multitónovou modulaci pro přenos dat. Jedná se o modulaci, která má více nosných. Celé přenosové pásmo se rozdělí na dílčí, sub-pásma a v jednotlivých sub-kanálech je pak přenos realizován QAM modulací. Díky



Obr. 1.7: Náměr TDR vzorku kabelu

znalosti frekvencí, na kterých jsou jednotlivé tóny je možné upravit detekční a korekční obvody tak, aby na těchto frekvencích docházelo k co nejlepším parametrům.

Přenos pomocí xDSL systémů je nejčastěji realizován na původních metalických rozvodech sloužících k analogovým telefonům. Při nasazení digitálních přenosů na tyto linky dochází k přeslechům a tím ke snížení maximální možné vzdálenosti přenosu. Jednotlivé systémy se navzájem ovlivňují podle jejich kódování, rychlostí a spektrem. Pokud se spektra systému nasazených v jednom kabelu překrývají dochází k nejvyššímu ovlivnění. Důležitým parametrem, který omezuje rušení je potlačení echa. Například systémy ADSL nasazené v jednom kabelu nejvíce ovlivňuje přeslech SFEXT [9].

Počet rušících systémů	256 kbit/s	512 kbit/s	768 kbit/s	1024 kbit/s	1536 kbit/s	2048 kbit/s	4096 kbit/s	6144 kbit/s
1	5,44	5,14	4,89	4,64	4,29	3,94	3,07	2,50
10	4,64	4,26	3,98	3,68	3,29	2,93	2,13	1,54
24	4,15	3,78	3,50	3,20	2,83	2,50	1,75	1,19
49	3,74	3,39	3,10	2,80	2,46	2,15	1,45	0,93

Tab. 1.7: Dosah systému ADSL [km] ve směru k účastníkovi

Systémy xDSL a kvalita jejich služeb jsou přímo ovlivněny parametry vedení, které je v systému použito. Pro měření systému xDSL a modelování jeho celkového rušení je nutné uvažovat všechny možné varianty a zdroje rušení. Generátor šumu

se proto skládá ze 7 dílčích na sobě nezávislých generátorů. Dále pak z přenosových funkcí modulujících závislost NEXT a FEXT na přeslechu a spínačů, které umožňují rozhodnout, zda se daný dílčí generátor bude podílet na celkovém rušení [7].

Jednotlivé generátory jsou:

1. **G1** - Generátor šumu pro NEXT, který představuje celkové rušení způsobené přeslechem na blízkém konci. Tento šum je možné popsat funkcí:

$$H_1(f, k) = K_{xn} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{0,75} \cdot \sqrt{1 - |s_{T0}(f, L)|^4} \quad (1.38)$$

kde:

- $f_0$  = referenční frekvence 1 MHz
  - $L$  = fyzická délka vedení [m]
  - $L_0$  = referenční délka 1 km
  - $s_{T0}(f, L)$  = přenosová funkce vedení
  - $K_{xn}$  = empiricky získaná hodnota,  $10^{(-50/20)} \approx 0,0032$
2. **G2** - Generátor šumu pro FEXT, který představuje celkové rušení způsobené přeslechem na vzdáleném konci. Tento šum je možné popsat funkcí:

$$H_2(f, L) = K_{xf} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right) \cdot \sqrt{\frac{L}{L_0}} \cdot |s_{T0}(f, L)| \quad (1.39)$$

kde:

- $f_0$  = referenční frekvence 1 MHz
  - $L$  = průměrná fyzická délka vedení [m]
  - $L_0$  = referenční délka 1 km
  - $s_{T0}(f, L)$  = přenosová funkce vedení
  - $K_{xf}$  = empiricky získaná hodnota,  $10^{(-45/20)} \approx 0,0056$
3. **G3** - Generátor šumu na pozadí
  4. **G4** - Generátor bílého šumu, frekvenčně nezávislý a konstantní generátor s hodnotou -140 dBm/Hz (zakončen nominální impedancí). Šum je náhodný podle Gaussova rozložení.
  5. **G5** - Generátor vysokofrekvenčního rušení (RFI) - představuje rušení které způsobují AM vysílače v pásmu krátkých, středních i dlouhých vln. Tyto frekvence jsou časově stálé, protože nemají potlačené nosné frekvence. Úroveň rušení je od -40 do -70 dBm, v závislosti na frekvenci (doporučeno tabulkou).
  6. **G6** - Generátor vysokofrekvenčního rušení simulující amatérské vysílání. Má stejný charakter jako G5, avšak rušení je většinou jen na 1 frekvenci ale výkonnější.
  7. **G7** - Generátor impulsního rušení - simuluje zdroje, které generují přechodové jevy. Tyto jevy mohou být přenášeny elektromagnetickou vazbou do přenosového systému. Například start motoru.

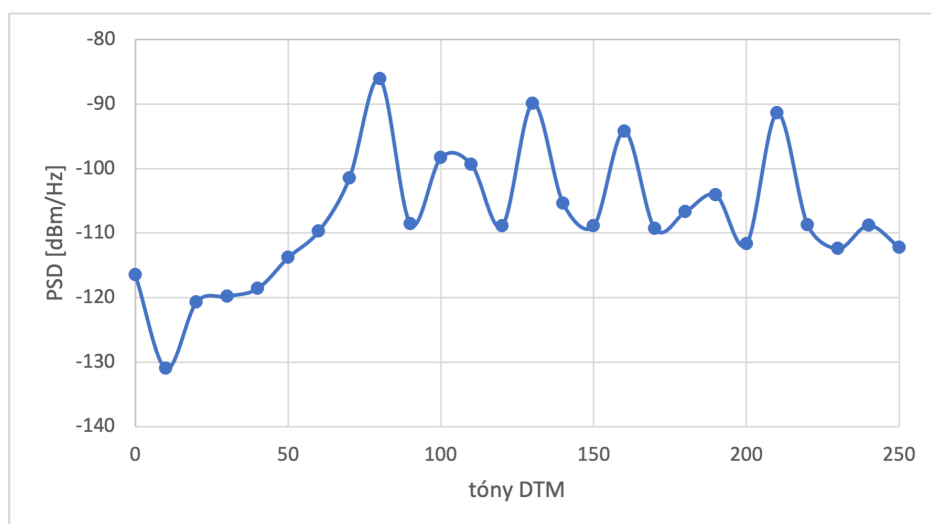
Pro docílení co nejreálnějších výsledků se při měření těchto systémů se používají generátory šumu se spektrálními charakteristikami G1 a G2. Šum vysílaný do vedení pro testování je frekvenčně závislý, závislý na délce vedení a směru přenosu. Používají se jiné šумы pro upstream a downstream. Šum vzniklý v transcierech stejného typu označujeme jako vlastní a cizí šum vzniká v transcierech jiného typu. Celkový přeslechový šum je superpozicí s šumu vlastního a cizího. Pro oba šумы taktéž musíme uvažovat přeslechy na obou koncích vedení.

Doporučením jsou dány typické modely situací ve kterých se xDSL systémy nachází v praxi. Primárně modely závisí na velikosti a druhu rušení. Pro modely jsou stanoveny průběhy PSD profilů.

Pro SHDSL a ADSL jsou modelovány tyto situace:

- **A** model: určen pro situace s **vysokou** mírou rušení, systém se nachází v kabelu s více než **100 páry** symetrického vedení ve kterých už jsou nasazeny digitální systémy.
- **B** model: určen pro situace se **střední** mírou rušení, systém se nachází v kabelu s více než **10 páry** symetrického vedení ve kterých už jsou nasazeny digitální systémy.
- **C** model: určen pro situace kdy rušení způsobují ISDN přípojky s HDB3 kódem přidaných do B modelu
- **D** model: určen pro situace, kdy přípojky mají stejný typ jako testovaný modem.

Obdobné a více specifické scénáře jsou definovány i pro systémy VDSL. V doporučeních jsou uvedeny parametry, které mají být na výstupu funkčních bloků generátorů G1 a G2 pro konkrétní modely, systémy a směry [7].



Obr. 1.8: Naměřený šum při ADSL DTM modulaci, simulace vedení 1500m

## 2 Laboratorní úloha

V diplomové práci je návrh laboratorní úlohy, která studentům přiblíží problematiku měření přeslechů. Součástí návrhu je i vyrobený měřicí přípravek, který umožňuje manuální měření přeslechů.

### 2.1 Cíle měření

Cílem laboratorní úlohy je přiblížit problematiku měření přeslechů ve strukturované kabeláži. V rámci laboratorní úlohy bude měřen parametr útlumu vedení, NEXT a FEXT.

Měřicí pracoviště bude sestavené z generátoru signálu, osciloskopu a přípravku pro měření. Měřená kabeláž pak jsou různé kategorie strukturované kabeláže a to jak v nestíněné tak stíněné variantě. V nestíněné variantě je využita již stávající kabeláže v učebně, kde v patch panelu propojíme dvě zásuvky vedoucí k měřicímu pracovišti a získáme tak nestíněný kabel k měření. Jako další vzorky jsou pak nachystány vzorek krátkého stíněného kabelu kategorie 6, krátký kabel kategorie 5e a smotaný kabel kategorie 6.

### 2.2 Měřicí přípravek

Vyrobený měřicí přípravek bude umožňovat jednoduché připojení strukturované kabeláže s konektory RJ45 k měřicím přístrojům, které mají připojovací konektory typu BNC.

Pro impedanční přizpůsobení měřené trasy lze využít samostatných oddělovacích transformátorů určených pro standard ethernet a nebo lze zakoupit konektory s již zabudovanými oddělovacími transformátory. Ve vyrobeném přípravku jsou použity konektory s již zabudovanými transformátory.

Vstupem do přípravku je BNC konektor, který bude sloužit pro přivedení signálu z generátoru na oddělovací transformátor a přes něj pak na rušící pár.

Výstupem pak jsou BNC konektory připojené (přes transformátor) na oba konce rušeného páru. Připojením osciloskopu ke konektoru na blízkém nebo vzdáleném konci vedení určíme, zda měříme parametr NEXT a nebo FEXT.

Měření útlumu lze realizovat na rušeném páru a to tak, že na konektor na kterém měříme parametr NEXT přivedeme vstup generátoru a výstupem pak bude konektor FEXT.



## Mechanická konstrukce

Měřicí přípravek musí splňovat základní požadavky na mechanickou odolnost.

Deska plošných spojů je vyrobena z oboustranně pokoveného materiálu. To zajišťuje stínění a vyšší odolnost proti nežádoucím přeslechům na desce. Konektory RJ45 jsou stíněné a jsou propojeny s tímto stíněním na desce. BNC konektory jsou izolované a nejsou propojeny se stíněním.

## Impedanční přizpůsobení

Pro správné měření je důležité správně impedančně nastavit jednotlivé přístroje. A to tak, kdy na výstupu generátoru bude nastavena zátěž  $50 \Omega$ . Na obou vstupech osciloskopu pak bude taktéž nastaveno, že se měří zátěž  $50 \Omega$ .

Nesprávné nastavení těchto hodnot způsobí chybné měření, které nedává smysl. Například kdy na generátoru generujeme napětí 1V jsme schopni na osciloskopu naměřit 2V.

## Transformátory pro ethernet

Standardní transformátor využívaný v síťových kartách a síťových zařízeních se skládá ze dvou vinutí. Viz 2.2. Vinutí na schématu vertikální slouží k odfiltrování stejnosměrné složky, která se mohla naindukovat na vedení. Vinutí na schématu horizontální (Common mode choke) filtruje souhlasné napětí, které je mezi jednotlivými vodiči.

Různé varianty transformátorů pak umožňují modulaci stejnosměrného napájení pro koncové zařízení (Power over Ethernet - POE).

## Konektor s integrovanými transformátory

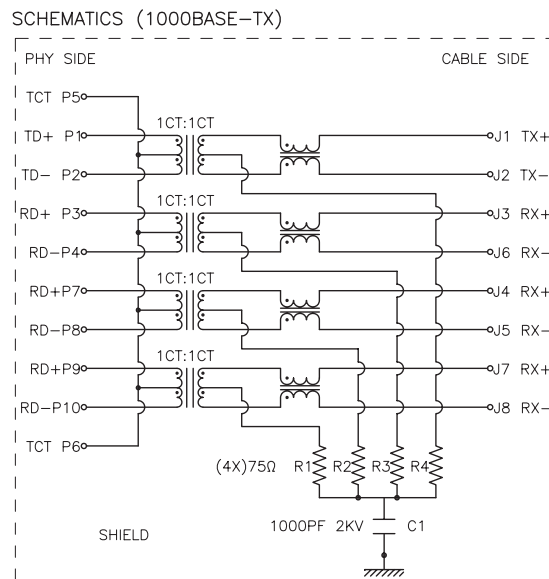
Nejjednodušší variantou pro provedení zapojení je využití konektoru s již integrovanými transformátory. Vyhneme se tak nutnosti přidávat další prvek na desku plošných spojů.

Na desce je osazen konektor od společnosti multicom určený pro síť s rychlostí 1 Gbit/s. Schéma zapojené vnitřního transformátoru je pak na obrázku: 2.2

## Využití samostatného transformátoru

V případě, potřeby nebo nutností speciálního zapojení je možné samostatně osadit konektor a samostatně oddělovací transformátor. U samostatných oddělovacích transformátorů musíme dbát na certifikaci, pro jaké rychlosti jsou určeny. Mnoho nabízených transformátorů je pouze pro rychlosti 10/100 Mbit/s.

Ideální variantou by bylo využití transformátoru s podporou a certifikací pro rychlosti 10 Gbit/s. Tyto transformátory však zatím nejsou tak rozšířené a tedy i nejsou tak dostupné.



Obr. 2.1: Vnitřní zapojení konektoru Multicomp [11]

## Výroba laboratorního přípravku

Laboratorní přípravek byl navrhnut v programu EAGLE a vyroben vyfrézováním desky plošných spojů na CNC fríze. Následné osazení konektory proběhlo ručně. Na přípravkou jsou použity prvky s pájecími piny. Nejsou použity SMD komponenty.

## 2.3 Laboratorní pracoviště

Laboratorní pracoviště bude obsahovat:

- Signálový generátor Tektronix AFG 3101
- Osciloskop Tektronix DPO 4032
- Propojovací BNC kabely
- Propojovací přípravek
- Měřenou kabeláž
- Počítač pro zápis hodnot

Generátor je hlavní ovlivňující složka měřící aparatury. Podle jeho rozsahu se bude určovat jaké frekvence dokážeme měřit. Ideálně by měl mít rozsah do stovek MHz tak, aby zvládl otestovat co nejširší pásmo, pro které je kabeláž certifikována.

Na funkce osciloskopu nejsou kladeny speciální nároky, avšak musí být schopen měřit ve stejném rozsahu jako generátor.

Generátor bude propojen na rušící vedení a zároveň na druhý kanál osciloskopu tak, aby bylo možné zkontrolovat parametry výstupního signálu z osciloskopu.

Na první kanál osciloskopu pak bude přiveden signál z rušeného vedení. Zda se bude jednat o FEXT nebo NEXT závisí na připojení.

Naměřené hodnoty je možné zaznamenávat do tabulky v počítači. Vstupními daty pro připravenou tabulku jsou naměřená napětí. Tabulka automaticky počítá výkony, útlumy a generuje grafy. Jsou připraveny dva soubory pro zápis výsledků. Jeden umožňuje zapsat hodnoty pro 4 různé frekvence ke každému měření. Druhý soubor je rozšířený. Umožňuje zapsat data pro 10 různých frekvencí a navíc obsahuje sekci pro měření ELFEXT.

## 2.4 Metodika měření

Protože parametry přeslechů jsou frekvenčně závislé bude měření prováděné při několika různých kmitočtech. Amplituda rušícího signálu bude konstantní pro všechna prováděná měření a rušící signál bude harmonický.

Při měření v různých kmitočtových hladinách je pak možné hodnoty zanést do grafu, který bude zobrazovat závislost úrovně přeslechů na frekvenci. Toto grafické zobrazení je nejnázornější pro pochopení a porozumění problematiky.

V závislosti na časové dotaci pro laboratorní úlohu pak lze zvolit množství měřených hodnot, což ovlivní plynulost a přesnost výsledného grafu.

Připravený excelový dokument obsahuje připravené generování grafů pro 4 vzorky kabelů a 4 frekvence na měření. Taktéž obsahuje list se souhrnnými grafy, ve kterých lze jednoduše porovnávat jednotlivé naměřené vzorky.

## 2.5 Možnost rozšíření

Laboratorní přípravek je zkonstruován tak, že každý pár symetrického kabelu je přiveden na jeden BNC konektor.

Je tak možné měřit rušení vzájemně mezi všemi páry v libovolném uspořádání. Použít více rušících párů a nebo i simulovat reálný provoz ve vícepárového kabelu. Díky tomu je možné vypočítat sumární přeslechy NEXT/ FEXT na daný pár z celého kabelu.

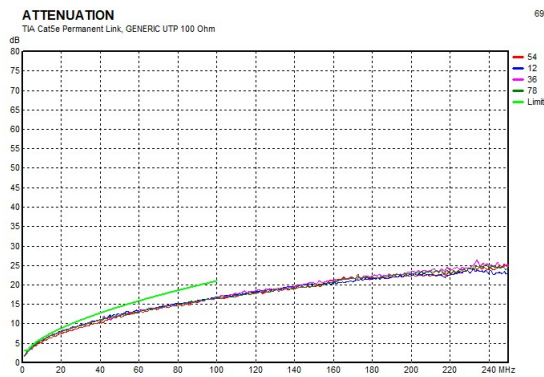
Měření rušení více párů je však časově náročné a jeho přidaná hodnota pro pochopení problematiky není velká.

## 2.6 Kontrolní měření

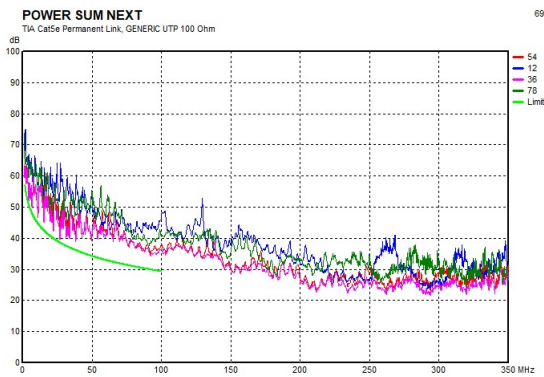
Funkčnost přípravku a přesnost měření byla zkoumána kontrolním měřením. Naměřené hodnoty jsou porovnány s údaji naměřenými pomocí měřicího přístroje Optokon Multi Lan 350. Tento přístroj umožňuje měření parametrů symetrické kabeláže a jejich vyhodnocení.

Vzorky jsou následující:

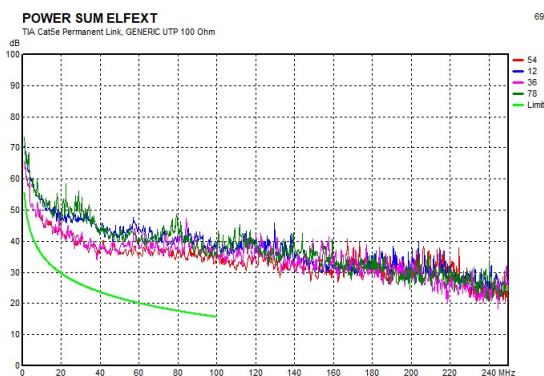
1. Kabel UTP, CAT 5e, zabudovaný v rozvodech laboratoře
2. Kabel CAT 6, smotaná cívka 100m
3. Kabel UTP, CAT 5e, délka 10m
4. Kabel STP, CAT 6, délka 2m



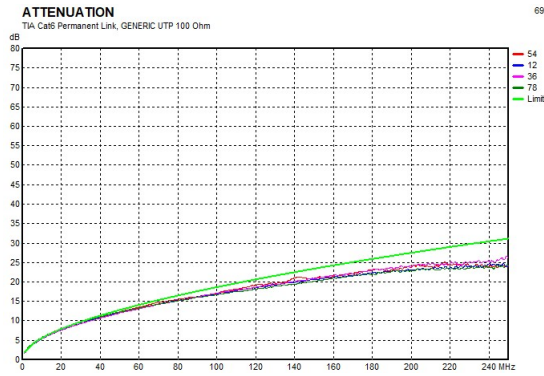
Obr. 2.2: Kontrolní měření pro vzorek 1 - Útlum



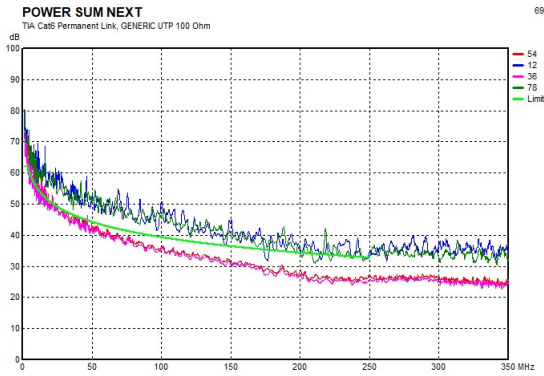
Obr. 2.3: Kontrolní měření pro vzorek 1 - power sum next



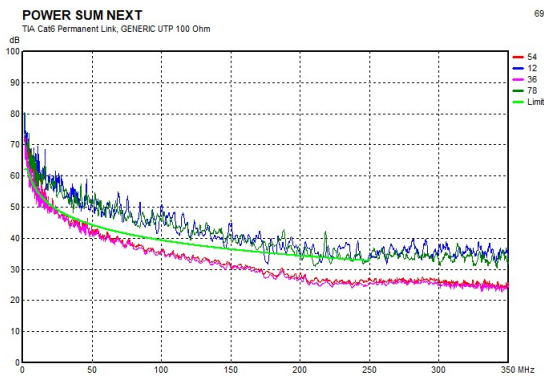
Obr. 2.4: Kontrolní měření pro vzorek 1 - power sum elfext



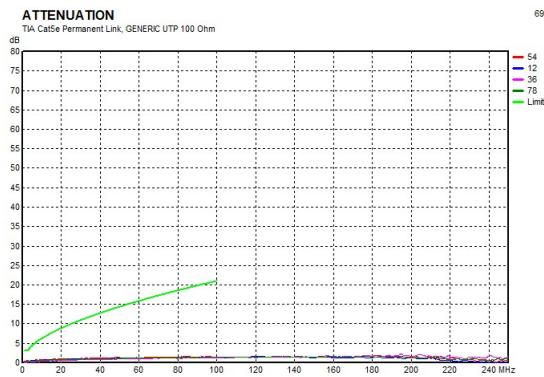
Obr. 2.5: Kontrolní měření pro vzorek 2 - Útlum



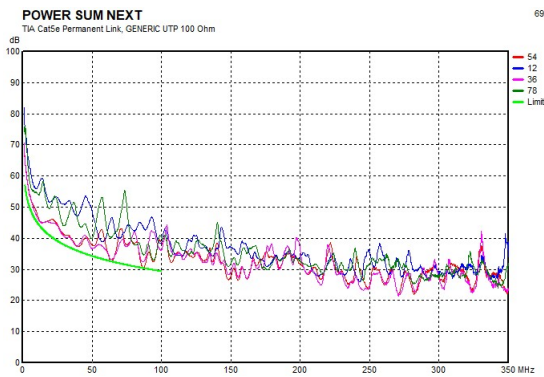
Obr. 2.6: Kontrolní měření pro vzorek 2 - power sum next



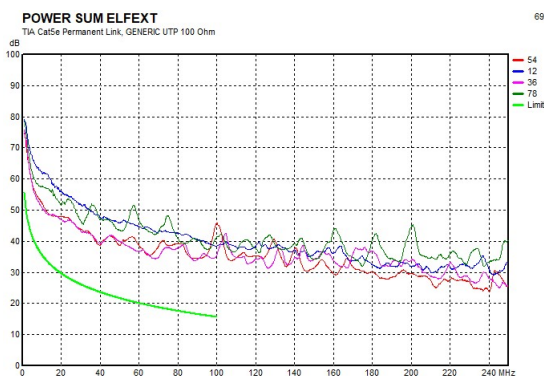
Obr. 2.7: Kontrolní měření pro vzorek 2 - power sum elfext



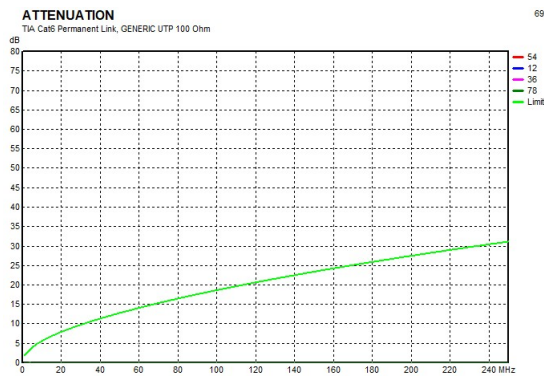
Obr. 2.8: Kontrolní měření pro vzorek 3 - Útlum



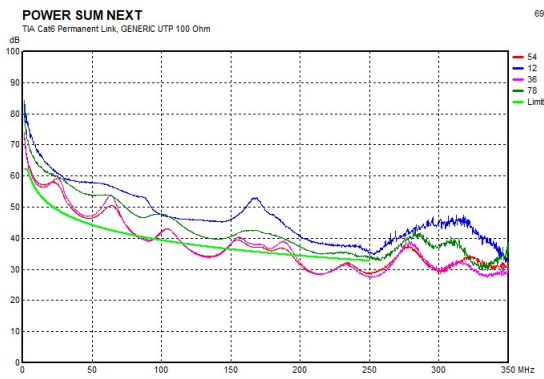
Obr. 2.9: Kontrolní měření pro vzorek 3 - power sum next



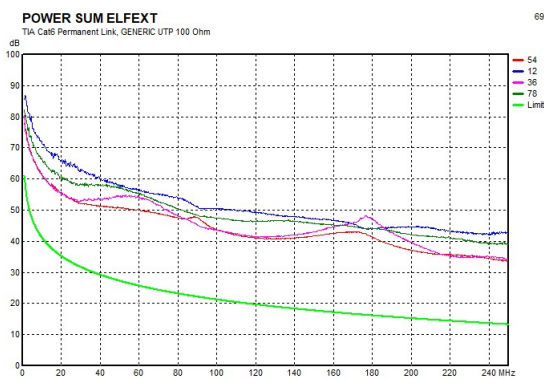
Obr. 2.10: Kontrolní měření pro vzorek 3 - power sum elfext



Obr. 2.11: Kontrolní měření pro vzorek 4 - Útlum



Obr. 2.12: Kontrolní měření pro vzorek 4 - power sum next



Obr. 2.13: Kontrolní měření pro vzorek 4 - power sum elfext



## 2.7 Naměřené hodnoty

Funkčnost přípravku byla otestována měřením na jednotlivých vzorcích kabelů. Měření bylo prováděno na jednom páru kde rušícím vedením byl pár číslo 1 - konektor A1 a rušeným párem byl pár číslo 2 - konektor B2 pro FEXT, A2 pro NEXT.

Naměřené hodnoty byly omezeny rozsahem generátoru, který je konstruován pro generování signálu s frekvencí do 100 MHz. Vyšší hodnoty kmitočtů nemůžeme porovnávat s hodnotami naměřenými referenčním měřicím přístrojem.

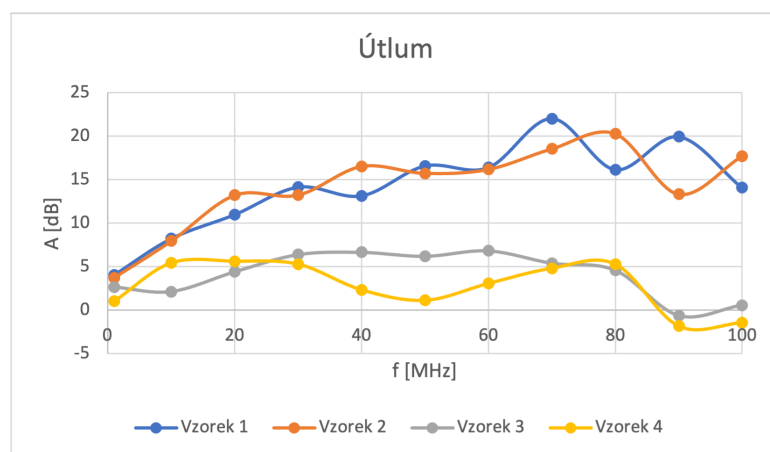
Z výsledků měření je patrné, že jednotlivé vzorky navzájem mají relativně podobné hodnoty přeslechů. Na Grafu útlumu je dobře vidět rozdíl v délkách vzorků 1 a 2 (okolo 100 metrů) a kratších vzorků 3 a 4.

Na grafech útlumu lze pozorovat záporné hodnoty útlumu u vzorků 3 a 4 na frekvenci 90 MHz. Nejspíše se jedná o rezonanci daných prvků. Hodnota byla několikrát proměřena a je to reálně naměřená hodnota. Jedná se tedy o jasný nedostatek přípravku.

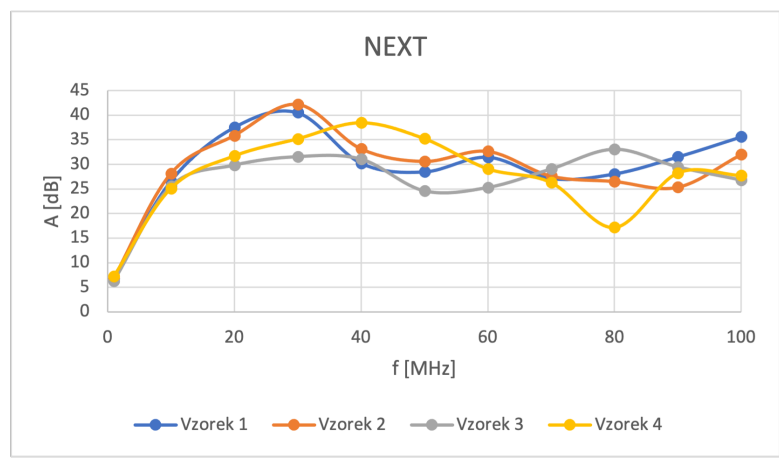
Při porovnání grafu útlumu naměřeného referenčním přístrojem a měřicím přípravkem můžeme konstatovat, že hodnoty jsou lehce vyšší u měřicího přípravku, avšak trend grafu je stejný.

Na grafech NEXT a ELFEXT lze názorně pozorovat vysoká úroveň přeslechu (= malý útlum) při nízkých frekvencích. Tato úroveň následně několikanásobně klesá se zvyšující se frekvencí. Je to přesně obrácený trend grafu jako u výsledků z referenčního měřicího přístroje.

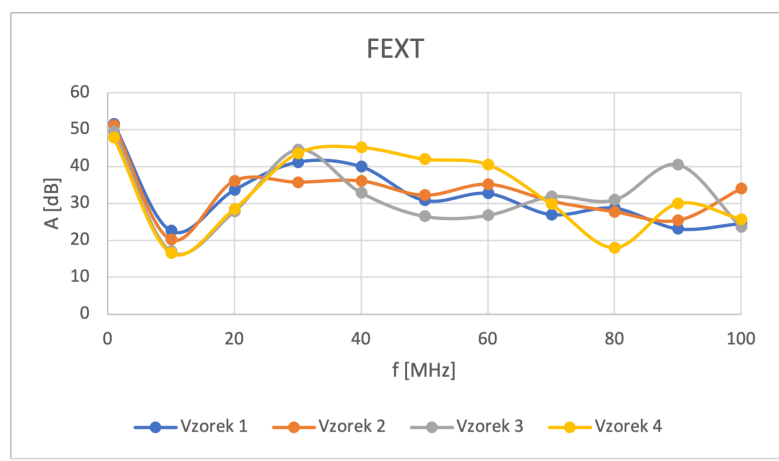
Jednotlivé přeslechy jsou relativně stejné pro všechny druhy zkoumaných vzorků. Hodnoty útlumu přeslechů jsou podobné jak u dlouhých tak krátkých vzorků. Z toho vyplývá, že samotný přípravek ovlivňuje měření a sám o sobě má vysokou míru přeslechů.



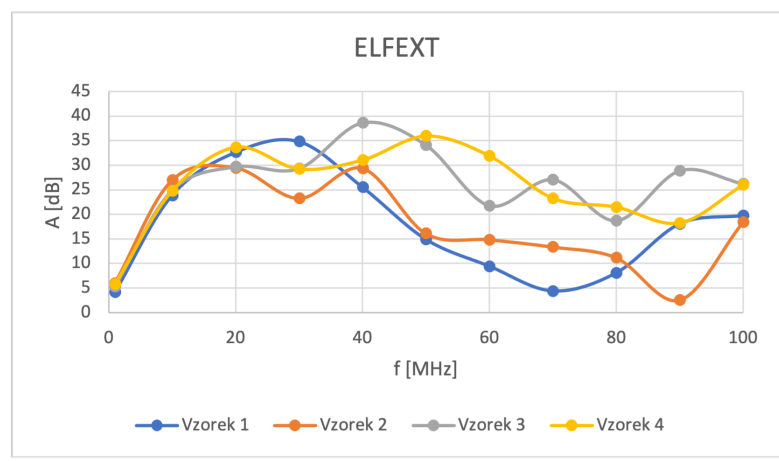
Obr. 2.14: Naměřené hodnoty útlumu na přípravku



Obr. 2.15: Naměřené hodnoty přeslechu NEXT na přípravku



Obr. 2.16: Naměřené hodnoty přeslechu FEXT na přípravku



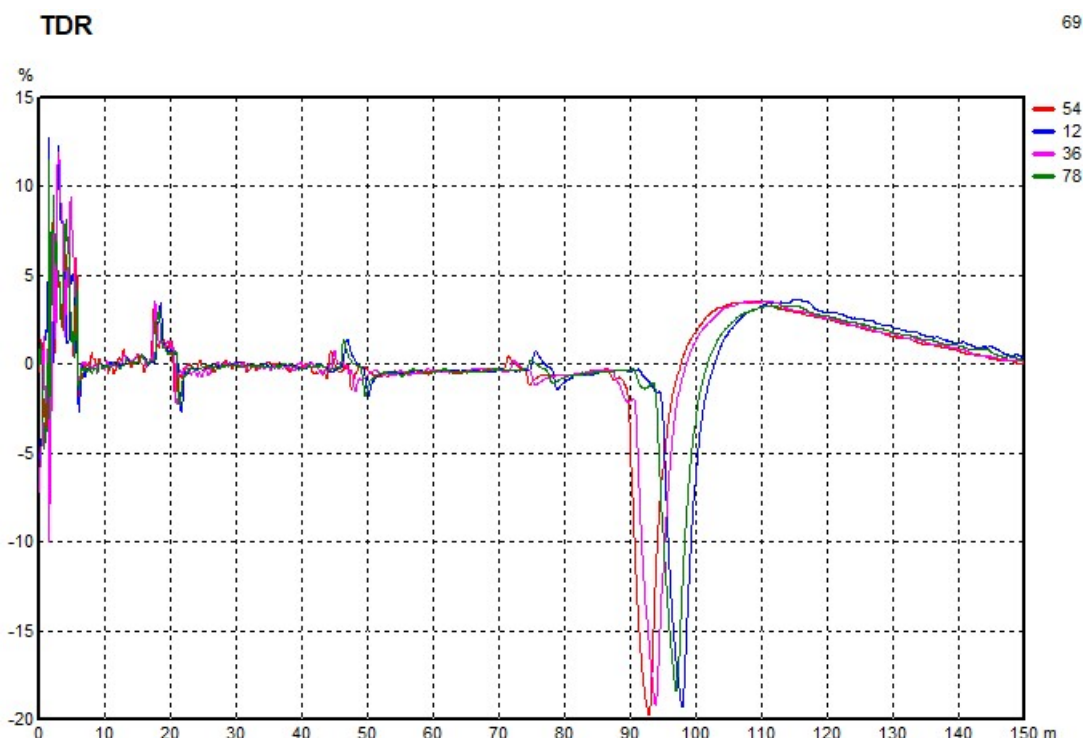
Obr. 2.17: Naměřené hodnoty přeslechu ELFEXT na přípravku

## 3 Numerické příklady

Numerické příklady slouží k procvičení jevů a problematiky popsané v předchozích částech.

### 3.1 Zadání

1. Vypočítejte útlum odrazu pro kabel s charakteristickou impedancí  $100 \Omega$  zakončený zátěží s impedancí  $50 \Omega$
2. Vypočítejte útlum odrazu pro kabel s charakteristickou impedancí  $100 \Omega$  zakončený zátěží s impedancí  $90 \Omega$
3. Vypočítejte útlum odrazu pro kabel s charakteristickou impedancí  $100 \Omega$ , který není zakončený.
4. Vypočítejte útlum na konci kabelu o délce 1500 metrů s měrným útlumem vedení  $4 \text{ dB/km}$ .
5. Vypočítejte útlum přeslechu FEXT na vedení s impedancí  $100 \Omega$ , kde vstupní napětí na rušícím vedení je  $1 \text{ V}$  a napětí naměřené na rušeném vedení je  $18,2 \text{ mV}$ .
6. Popište Následující náměr TDR. Kolik je na trase spojů? Jaká je celková délka trasy?



Obr. 3.1: Náměr TDR vzorku kabelu zabudovaného ve stole v laboratoři

## 3.2 Řešení

1. Vypočítejte útlum odrazu pro kabel s charakteristickou impedancí  $100 \Omega$  zakončený zátěží s impedancí  $50 \Omega$

$$A_r = 20 \log \left| \frac{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_C} \right| = 20 \log \left| \frac{50 + 100}{50 - 100} \right| = 20 \log (3) = 9,542[dB] \quad (3.1)$$

2. Vypočítejte útlum odrazu pro kabel s charakteristickou impedancí  $100 \Omega$  zakončený zátěží s impedancí  $90 \Omega$

$$A_r = 20 \log \left| \frac{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_C} \right| = 20 \log \left| \frac{90 + 100}{90 - 100} \right| = 20 \log (19) = 25,575[dB] \quad (3.2)$$

3. Vypočítejte útlum odrazu pro kabel s charakteristickou impedancí  $100 \Omega$ , který není zakončený.

$$A_r = 20 \log \left| \frac{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_C} \right| = 20 \log \left| \frac{0 + 100}{0 - 100} \right| = 20 \log (1) = 0[dB] \quad (3.3)$$

4. Vypočítejte útlum na konci kabelu o délce 1500 metrů s měrným útlumem vedení  $4 \text{ dB/km}$ .

$$A = \alpha \cdot l = 4 \cdot 1,5 = 6[dB] \quad (3.4)$$

5. Vypočítejte útlum přeslechu FEXT na vedení s impedancí  $100 \Omega$ , kde vstupní napětí na rušícím vedení je  $1\text{V}$  a napětí naměřené na rušeném vedení je  $18,2\text{mV}$ .

$$A_{FEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \right) \quad [dB] \quad (3.5)$$

kde

$$P = \frac{(U_{RMS})^2}{z} \quad [W] \quad (3.6)$$

z toho plyne že:

$$P_{1N} = \frac{(U_{RMS})^2}{z} = \frac{1^2}{100} = 0,01[W] \quad (3.7)$$

$$P_{2F} = \frac{(U_{RMS})^2}{z} = \frac{0,0182^2}{100} = 3,31 \cdot 10^{-6}[W] \quad (3.8)$$

dosazením získáme:

$$A_{FEXT} = 10 \log \left( \frac{0,01}{3,31 \cdot 10^{-6}} \right) = 34,799[dB] \quad (3.9)$$

6. Na náměru trasy jsou viditelné 4 spoje a to ve vzdálenostech 5, 20, 48 a 75 metrů. Celková délka kabelu je přibližně 95 metrů. Všechny páry jsou funkční a mají stejnou délku.

## 4 Návod laboratorní úlohy

Cílem laboratorní úlohy je vysvětlit problematiku přeslechů v metalických datových sítích.

### 4.1 Úkoly

Na poskytnutých vzorcích kabelů naměřte

- Útlum
- Přeslech NEXT
- Přeslech FEXT

### 4.2 Teoretický úvod

#### 4.2.1 Vznik rušení

Průchod elektricky nabitých částic vodičem způsobuje vznik elektromagnetického pole, které se vytváří kolem daného vodiče. Velikost tohoto pole je pak určena množstvím částic, které tímto vodičem procházejí.

Elektromagnetické pole pak ovlivňuje částice nacházející se v tomto poli. Tedy prochází li proud vodičem tak tento proud ovlivňuje proud v okolních vodičích nacházejících se v blízkosti vodiče. V závislosti na vzniku pak rozlišujeme:

- **Přeslechy:** vzájemně na sebe působí jednotlivé páry v kabelu. Daný pár vyzařuje energii, která proniká do ostatních párů v daném kabelu. Jedná se o jeden z hlavních rušících prvků, které ovlivňují datové přenosy.
- **Provozní šum:** je způsobený zapojením a provozem aktivních a pasivních elektrických prvků v systému. Šum má charakteristiku bílého šumu a jeho úroveň je relativně malá. Hodnota šumu kolísá s teplotou, podle toho, jak se zahřívají součástky.
- **Vysokofrekvenční rušení:** je způsoben pronikáním rádiových vln do metalických kabelů. Rádiové vlny pracují na stejných frekvencích jako přenosy v metalických kabelech a tak vzniká interference. Největší interferenci způsobuje amplitudová modulace.
- **Impulsní rušení:** se vyskytuje vesměs náhodně a je způsobeno různými zdroji, které produkují krátké elektrické přechodné jevy. Může se jednat o domácí spotřebiče, trakce vlaků a tramvajů, připojení nebo odpojení velkých spotřebičů. Tato rušení způsobují shluky chyb v datovém přenosu.

## 4.2.2 Nehomogenity primárních parametrů

Nehomogenity jsou způsobeny nedokonalostí výroby a tedy kabely jednotlivých výrobních sérií mají nepatrně odlišné hodnoty  $R$  (efektivní odpor),  $L$  (indukčnost),  $C$  (provozní kapacita),  $G$  (provozní svod). Kritická je pak hlavně provozní kapacita  $C$ . Při napojování různých kabelových sérií pak díky různosti parametrů vznikají odrazy. Odrazy se pak dále šíří vedením a to jak zpět o vysílači tak k přijímači jako vícenásobné odrazy.

Tyto nedokonalosti je možné eliminovat co nejkvalitněji výrobou kabelů a také kvalitní montáží (spojkami).

## 4.2.3 Nesymetrie dílčích kapacit a svodů

Nesymetrie dílčích kapacit se taktéž někdy značí jako příčná nesymetrie. Dílčí kapacita vzniká mezi dvěma vodivými předměty. Je pak určena geometrickou konfigurací - tvarem, vzdáleností, polohou vodivých předmětů a dielektrikem (izolací) mezi nimi.

Dílčí kapacita mezi dvěma vodiči se pak nikdy neuplatňuje samostatně - vodiče nepůsobí jen pouze na sebe navzájem ale i na další vodiče. Zohledněním dílčích kapacit mezi vodiči vzniká efektivní dílčí kapacita. Tedy účinná dílčí kapacita mezi dvěma vodiči.

Pokud je uspořádání vodičů elektricky symetrické jsou efektivní dílčí kapacity mezi vodiči stejné. Nevzniká tak kapacitní nesymetrie mezi páry a tím nevzniká přeslech mezi páry.

Pokud však vodiče nejsou dokonale elektricky symetrické dochází ke kapacitní nesymetrii mezi páry a tím k přeslechům mezi páry. Po instalaci kabeláže můžeme tuto nesymetrii změřit a eliminovat přeslech tím, že vložíme přídatnou kapacitu mezi páry tak, aby se kapacitní nesymetrie vyrovnala a došlo k odrušení přeslechů.

## 4.2.4 Vložný útlum

Vložný útlum  $A_V$  je definován jako absolutní hodnota poměru dvou zdánlivých výkonů. A to výkonů  $P_1$ , který je výkonem generátoru o vnitřním napětí  $U_i$  a vnitřní impedanci  $Z_i$ . A výkonu  $P_2$  který je výkon, který generátor dodává do zakončovací impedance  $Z_L$ . [9] Platí tedy:

$$A_V = 10 \log \left| \frac{P_1}{P_2} \right| \quad [dB] \quad (4.1)$$

kde:

- $P_1$  = Výkon generátoru
- $P_2$  = Výkon na konci vedení

Pro  $P_1$  pak platí:

$$P_1 = \frac{U_i^2}{Z_i} \quad [W] \quad (4.2)$$

kde:

- $U_i$  = Napětí na výstupu generátoru
- $Z_i$  = Vnitřní impedance generátoru

Pro  $P_2$  pak platí:

$$P_2 = \frac{U_2^2}{Z_L} \quad [W] \quad (4.3)$$

kde:

- $U_2$  = Napětí na konci vedení
- $Z_L$  = Ukončovací impedance

Útlum závisí na parametrech vedení a to hlavně na délce, průřezu vodiče a frekvenci přenášeného signálu.

Měrný útlum vedení pak udává útlum na délku vedení 1 km (u kabelů UTP /STP je délka 100m)

$$\alpha = \frac{A}{l} \quad [dB/km] \quad (4.4)$$

## 4.2.5 NEXT

Near end cross talk, neboli přeslech na blízkém konci se měří na stejné straně, na které vysíláme rušení. Je rostoucí s frekvencí a v závislosti na použité technologii přenosu je nutné ho eliminovat. Například pro technologii VDSL. Množství přeslechů mezi jednotlivými páry v referenčním kabelu lze pak modelovat pro NEXT vztahem:

$$|H_{next}(f)| = K_{next} \frac{N^{0,6}}{49} f^{\frac{3}{2}} \quad (4.5)$$

kde:

- $K_{next} = 8,818 * 10^{-14}$
- $N$  = počet zdrojů rušení
- $f$  = kmitočet v Hz

Útlum přeslechů na blízkém konci pak získáme poměrem naměřených výkonů. Měříme na stejné straně jako vysíláme rušení do vedení

$$A_{NEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \right) \quad [dB] \quad (4.6)$$

kde:

- $P_{1N}$  = vstupní výkon na rušeném páru
- $P_{2N}$  = výstupní výkon rušeného páru na blízkém konci

Výpočet vstupního i výstupního výkonu pak realizujeme pomocí vzorce:

$$P = \frac{(U_{RMS})^2}{z} \quad [W] \quad (4.7)$$

kde:

- $U_{RMS}$  = Napětí naměření na osciloskopu
- $z$  = impedance vedení. Pro UTP kabely volíme  $100\Omega$

## 4.2.6 FEXT

Far end cross talk, neboli přeslech na vzdáleném konci. Detekujeme ho na opačné straně než na které vysíláme rušení. Přenosová funkce pro přeslechy na vzdáleném konci je obdobná přenosové funkci na blízkém konci.

$$|H_{Fext}(f)| = K_{Fext} \frac{N^{0,6}}{49} f^2 l |H_{channel}(f, l)| \quad (4.8)$$

kde:

- $K_{Fext} = 8 * 10^{-20}$
- $N$  = počet zdrojů rušení
- $f$  = kmitočet v Hz
- $H_{channel}(f, l)$  = přenosová funkce vedení
- $l$  = délka vedení v km, kde délka vedení = délka vazební cesty. Pokud systém ruší systémy jen na části trasy je nutné délky odlišit.

Útlum přeslechů na vzdáleném konci pak získáme poměrem naměřených výkonů. Měříme na opačné straně jako vysíláme rušení do vedení

$$A_{FEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \right) \quad [dB] \quad (4.9)$$

kde:

- $P_{1N}$  = vstupní výkon na rušeném páru
- $P_{2F}$  = výstupní výkon rušeného páru na vzdáleném konci

K výpočtu výkonů pak použijeme vzorec jako u NEXT.

## 4.2.7 FEXT a ELFEXT

Je možné se setkat s parametrem ELFEXT namísto FEXT. Rozdíl v těchto parametrech je v hodnotě napětí rušícího vedení. FEXT je poměrná hodnota naměřeného přeslechu a napětí na **vstupu** do rušícího vedení. ELFEXT je poměrná hodnota naměřeného přeslechu a napětí na **výstupu** rušícího vedení.



## 4.2.8 Měření symetrických vedení

Měření přenosových parametrů najde uplatnění například při ověřování instalované kabeláže. Lze využít automatizované obvodové analyzátory, které jsou konstruované pro tato měření a výstupem jsou pak přenosové parametry - charakteristika útlumu vedení, přeslechů, odrazu, nesymetrie, charakteristická impedance a další.

Pokud bychom připojili vodiče z páru mezi generátor a osciloskop (měřicí přístroj) přímo tak bychom jeden vodič z páru uzemnili a měřili bychom tak jen jeden vodič. Proto se při měření symetrických vedení využívají symetrizační transformátory. V měřicím přípravku jsou symetrizační transformátory integrovány do ethernetových konektorů.

## 4.3 Vybavení pracoviště

- Signálový generátor Tektronix AFG 3101
- Osciloskop Tektronix DPO 4032
- Propojovací BNC kabely
- Propojovací přípravek
- Měřená kabeláž
- Počítač pro zápis hodnot

## 4.4 Měření

1. Na generátoru nastavte výstupní amplitudu na 1 V RMS
2. Na generátoru nastavte typ výstupu na zátěž o hodnotě  $50\Omega$
3. Na osciloskopu nastavte typ vstupu na zátěž  $50\Omega$  pro oba vstupy 1 a 2.
4. Na osciloskopu zapněte měření napětí RMS na vstupech 1 a 2.
5. Na výstup generátoru připojte rozbočení. Jeden výstup zapojte do přípravku, druhý na vstup 1 do osciloskopu.
6. Na vstup osciloskopu 2 připojte BNC kabel, který budete přepojovat podle potřeb měření.
7. Naměřené hodnoty zapisujte do tabulek (viz níže) a nebo využijte excelový dokument na počítači.

### 4.4.1 Měření útlumu

1. Zapojte měřicí přípravek tak, aby byl vstup z generátoru a výstup do osciloskopu na **stejném** označení konektoru na přípravku na obou koncích měřeného kabelu - například A1, B1.

2. Nastavte frekvenci na generátoru dle tabulky níže.
3. Po každé změně frekvence upravte rozlišení osciloskopu stisknutím tlačítka Autoset.
4. Zapiště naměřené hodnoty do tabulky - jak napětí na vstupu tak i na výstupu.

#### 4.4.2 Měření přeslechu NEXT

1. Zapojte měřící přípravek tak, aby byl vstup z generátoru a výstup do osciloskopu na **rozdílném** označení konektoru na přípravku na **stejně** straně měřeného kabelu - například A1, A2.
2. Nastavte frekvenci na generátoru dle tabulky níže.
3. Po každé změně frekvence upravte rozlišení osciloskopu stisknutím tlačítka Autoset.
4. Zapiště naměřené hodnoty do tabulky - jak napětí na vstupu tak i na výstupu.

#### 4.4.3 Měření přeslechu FEXT

1. Zapojte měřící přípravek tak, aby byl vstup z generátoru a výstup do osciloskopu na **rozdílném** označení konektoru na přípravku na **rozdílné** straně měřeného kabelu - například A1, B2.
2. Nastavte frekvenci na generátoru dle tabulky níže.
3. Po každé změně frekvence upravte rozlišení osciloskopu stisknutím tlačítka Autoset.
4. Zapiště naměřené hodnoty do tabulky - jak napětí na vstupu tak i na výstupu.

#### 4.4.4 Tabulka pro měření

$f$ [MHz]	$U_{vstup}$ [V]	$U_{výstup}$ [V]	A [dB]
1			
30			
50			
90			

## Závěr

Rušení v datových sítích vzniká primárně z důvodu nehomogenit na vedení. Nehomogenity vznikají nedokonalou výrobou kabelů a neideálním zakončením a nebo spojením kabelů. Díky těmto nedokonalostem vzniká přeslech mezi jednotlivými páry metalických vodičů a ten pak ovlivňuje přenos signálu. V práci jsou popsány jednotlivé typy nehomogenit a jejich důsledky. Taktéž jsou rozebrány jednotlivé typy přeslechů a způsoby jejich měření.

Hlavní přeslechy mezi vodiči jsou přeslech na blízkém a vzdáleném konci vedení. Velikost těchto přeslechů je závislá na konstrukci vedení, frekvenci, typu zakončení a nehomogenitách na vedení.

Výstupem této diplomové práce je návrh laboratorního pracoviště a přípravek pro měření přeslechů na metalických kabelech. Laboratorní přípravek umožňuje měření symetrických párů vodičů pomocí osciloskopu a generátoru signálu. Přípravek umožňuje simulaci, kdy na vedení působí více rušivých zdrojů z více vedení.

Laboratorní úloha má za cíl lépe osvětlit problematiku přeslechů a jejich měření. Manuálním změřením dochází k lepšímu pochopení problematiky oproti měření pomocí automatizovaných přístrojů.

Z kontrolního měření vyplývá, že měření pomocí přípravku jsou podobná pro dlouhá vedení avšak pro krátká vedení jsou naměřené útlumy přeslechů příliš nízké. Samotný měřicí přípravek má tedy vysoký přeslech.

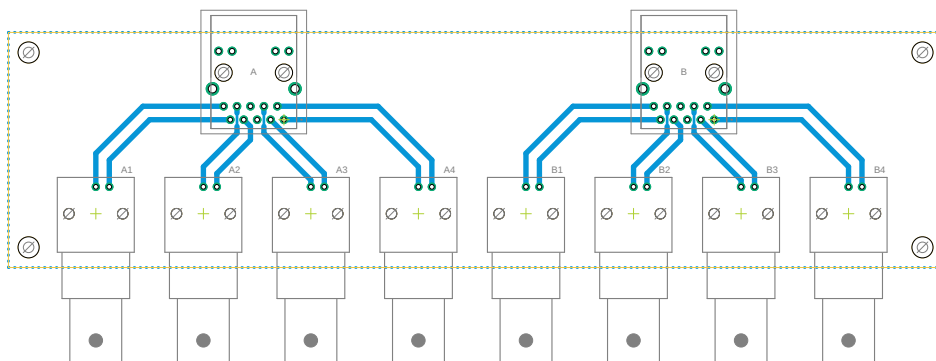
# Literatura

- [1] *Modely metalické přístupové sítě* [online]. Praha, 2006 [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=modely-metalicke-pristupove-site&cisloclanku=2006062001>
- [2] *Kratší „poslední míle“ má zrychlit i zoufale pomalé internetové přípojky*[online]. 28. 7. 2017 [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/technet/technika/cetin-buduje-vysunute-dslamy-dsl-internet-by-mel-zrychlit.A170727\\_124423\\_mob\\_tech\\_nyv](https://www.idnes.cz/technet/technika/cetin-buduje-vysunute-dslamy-dsl-internet-by-mel-zrychlit.A170727_124423_mob_tech_nyv)
- [3] *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Digital\\_Subscriber\\_Line\\_Access\\_Multiplexer](https://cs.wikipedia.org/wiki/Digital_Subscriber_Line_Access_Multiplexer)
- [4] *FILKA, Miloslav. Přenosová média*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [5] *Kroucená dvojlinka*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kroucená\\_dvojlinka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kroucená_dvojlinka)
- [6] *BOHÁČ, Leoš a Pavel BEZPALEC. Datové sítě: přednášky*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04694-4.
- [7] *VODRÁŽKA, Jiří a Martin HAVLAN. Přístupové přenosové systémy: cvičení : měření na přípojkách xDSL*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2786-4.
- [8] *ČSN EN 50174-2 Informační technologie - Instalace kabelových rozvodů: Projektová příprava a výstavba v budovách*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] *ZEMAN, Václav. Vyšší techniky datových přenosů, část skript*. Brno: FEKT VUT
- [10] *Understanding FEXT and ELFEXT* [online]. USA: Agilent Technologies, 2000 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: [https://mlinarsky.com/English/Collaterals/Whitepapers/octoScope\\_WP\\_UnderstandingELFEXT\\_200009.pdf](https://mlinarsky.com/English/Collaterals/Whitepapers/octoScope_WP_UnderstandingELFEXT_200009.pdf)

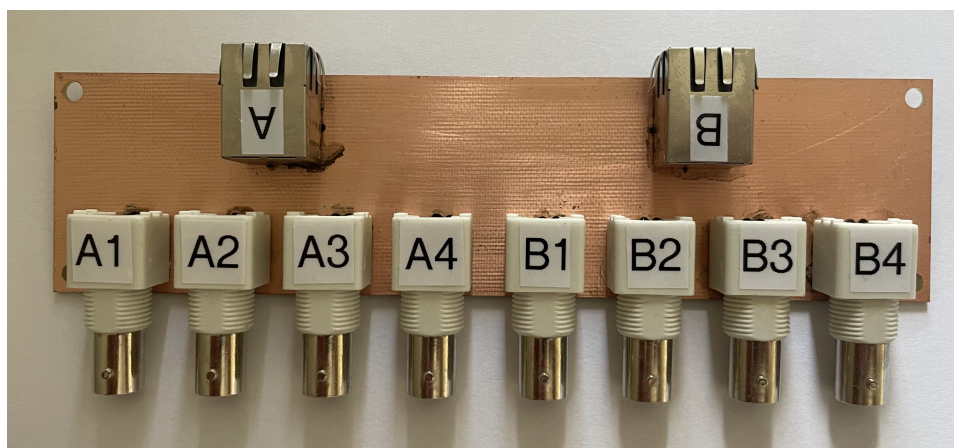
- [11] *RJ45 Jack, 1x1 Tab Down R/A, LED Shilded, TH [online]. 2021 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/3186396.pdf>*
- [12] *ČSN EN 50173-1 (36 7253) Informační technologie – Univerzální kabeláž systémy - Část 1: Všeobecné požadavky. Ed 2. Praha: Český normalizační institut, 2008.*
- [13] BINGHAM, John A. C. ADSL, VDSL, and multicarrier modulation. New York: John Wiley, 2000, xvii, 289 s. ISBN 0-471-29099-8.
- [14] *GIGABIT MAGNETIC JACK 1X1 LED PRODUCT CUSTOMER DRAWING [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: [https://www.molex.com/pdm\\_docs/sd/857931013\\_sd.pdf](https://www.molex.com/pdm_docs/sd/857931013_sd.pdf)*

## A Schéma a fotografie měřícího přípravku

V příloze je vyobrazeno schéma zapojení a fotografie výsledného přípravku pro měření.



Obr. A.1: Zapojení desky plošných spojů



Obr. A.2: Vyrobený přípravek pro měření

## B Obsah elektronické přílohy

Elektronickou přílohou práce jsou dva soubory v programu Microsoft Excel. Tyto soubory slouží k zápisu hodnot při měření v laboratoři. Soubor Mereni\_preslechu.xlsx je základní verzí, která je určena pro 4 vzorky vedení. U každého vzorku je nachystané pole pro zápis měření útlumu, NEXT a FEXT. Každé měření se provádí na 4 různých frekvencích.

Soubor Mereni\_preslechu\_rozsirene.xlsx je rozšířením předchozího souboru. Také je možné měřit 4 vzorky vedení. Rozdílem je, že je přidána tabulka pro měření přeslechu ELFEXT a každé měření se provádí na 10 různých frekvencích.

Oba soubory obsahují generování grafů pro jednotlivá měření. Posledním listem v souborech je pak strana s kombinovanými grafy. Tedy s grafy ve kterých jsou zaneseny vždy všechny 4 vzorky pro dané měření.