

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra Informatiky

---

**Změny přenášených informací v různých typech sítí**  
**The Changes of Carried Information in Different Types of**  
**Networks**

2010

Ondřej Ždych

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra informatiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Ždych**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie

Téma: **Změny přenášených informací v různých typech sítí**  
**The Changes of Carried Information in Different Types of Networks**

Zásady pro vypracování:

Základním požadavkem v přenosu libovolných typů zpráv je nezbytnost identity mezi vstupní a výstupní informací. Při různých typech a formách vlastních zpráv, při různých typech přenosových sítí dochází z různých důvodů k deformacím přenášených informací.

Cílem bakalářské práce je vytvořit analýzu zaměřenou na možnosti narušení totožnosti zdrojového a přijímaného signálu ve vztahu k charakteru signálu i typu přenosu.

1. Prostudujte a popište změny při přenosu analogového signálu.
2. Prostudujte a popište změny při přenosu digitálního signálu.
3. Systematizujte změny signálů v praxi pro různé sítě.
4. Vytvořte prezentaci z provedené systematizace.

Výsledkem bakalářské práce je:

1. Popis změn analogových signálů v jednotlivých úsecích přenosové trasy.
2. Popis změn digitálních signálů v jednotlivých úsecích přenosové trasy.
3. Systémový popis změn signálů pro různé typy komunikačních sítí.
4. Vytvoření prezentace změn různých typů přenášených signálů v návaznosti na různé komunikační sítě.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **PaedDr. Eduard Lyko, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



---

doc. Dr.Ing. Eduard Sojka  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
*děkan fakulty*

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. května 2010

.....

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu PaedDr. Eduardu Lykovi Ph.D., především za konzultace a odborné rady, které jsem zúročil při psaní tohoto textu.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou týkající se změn přenášených informací v různých typech sítí. Konkrétně se zabývá změnami analogového a digitálního signálu a vlivy, které tyto změny způsobují. Dále se bakalářská práce věnuje používaným vedením při přenosu těchto signálů a jejich přenosovým vlastnostem.

Úkolem práce je nejprve provést teoretický rozbor této problematiky a poté nabyté poznatky aplikovat na konkrétní přenosy signálů ve vybraných typech sítí. Jako součást práce bylo provedeno i měření, které spočívalo v simulaci průběhů různě deformovaných signálů.

### **Klíčová slova:**

analogový signál, digitální signál, přenos signálu, útlum, zkreslení, šum, přeslech, deformace signálu, vedení, bitová chybovost, zesilovač, opakovací, linkové kódy, zabezpečení, telefonní síť, ISDN, PCM

## **Abstract**

Bachelor's thesis deals with issues related with changes of carried information in different types of network. Specifically it deals with changes of analog and digital signal and with influences, which are causing these changes. This thesis deals with used signal leadings too and with their transmission characteristics.

The goal of this thesis is to accomplish a theoretical analysis of these issues at first and then to apply acquired knowledges at concrete transmissions at chosen types of networks. There was made a measurement as a part of this thesis too. This measurement consisted in simulation of courses of variously deformed signals.

### **Keywords:**

Analog Signal, Digital Signal, Signal Transmission, Attenuation, Distortion, Signal Noise, Crosstalk, Signal Deformation, Leading, Bit Error Rate, Amplifier, Repeater, Line Code, Security, Telephone Network, ISDN, PCM

## Seznam použitých symbolů

$\alpha$	[dB/km]	měrný útlum
$A$	[dB]	vlastní útlum vedení
$A_{FEXT}$	[dB]	přeslech na vzdáleném konci vedení
$A_I$	[dB]	útlum elektrického proudu
$A_{k0}$	[dB]	útlum odrazu
$A_{NEXT}$	[dB]	přeslech na blízkém konci vedení
$A_o$	[dB]	obrazový útlum
$A_P$	[dB]	útlum výkonu
$A_p$	[dB]	provozní útlum
$A_{SQ}$	[dB]	odstup signálu od kvantizačního zkreslení
$A_U$	[dBu]	útlum elektrického napětí
$A_z$	[dB]	zbytkový útlum
$BER$	[-]	bitová chybovost
$d$	[m]	šířka
$\Delta A_f$	[dB]	útlumové zkreslení
$f$	[Hz]	frekvence
$\varphi$	[rad]	fázový posun
$I$	[A]	elektrický proud
$I_N$	[A]	normálový elektrický proud
$k_0$	[-]	koeficient odrazu
$l$	[m]	délka
$\lambda$	[m]	vlnová délka
$L_m$	[dBm]	absolutní úroveň výkonu
$L_o$	[dB]	útlum prostředí
$L_r$	[dBr]	relativní úroveň výkonu
$L_{ru}$	[dBru]	relativní úroveň napětí
$L_u$	[dBu]	absolutní úroveň napětí
$n_E$	[-]	počet chybně přijatých bitů
$n_T$	[-]	počet celkově přijatých bitů

$\mu$	[H.m <sup>-1</sup> ]	permeabilita materiálu
$P$	[W]	výkon
$P_0$	[W]	výkon ve vztažném bodě
$P_{IN}$	[W]	výkon rušivého signálu na blízkém konci vedení
$P_{2N}$	[W]	výkon rušeného signálu na blízkém konci vedení
$P_{2F}$	[W]	výkon rušeného signálu na vzdáleném konci vedení
$P_N$	[W]	normálový výkon
$P_Q$	[W]	střední výkon kvantizačního šumu
$P_S$	[W]	střední výkon kódovaného signálu
$p$	[-]	pravděpodobnost výskytu chybného bloku
$r$	[m]	šířka Fresnelovy zóny
$\rho$	[ $\Omega$ .m]	měrná rezistivita
$S_I$	[dB]	zisk elektrického proudu
$\delta$	[-]	zkreslení impulzu
$S_C$	[-]	celkový interval
$S_N$	[-]	nepoužitelný interval
$S_P$	[dB]	zisk výkonu
$S_{Po}$	[-]	použitelný interval
$S_U$	[dBu]	zisk elektrického napětí
$SNR$	[dB]	odstup signálu od šumu
$U$	[V]	elektrické napětí
$U_0$	[V]	elektrické napětí ve vztažném bodě
$U_1$	[V]	vstupní elektrické napětí
$U_2$	[V]	výstupní elektrické napětí
$U_N$	[V]	normálové elektrické napětí
$Z$	[ $\Omega$ ]	impedance
$Z_N$	[ $\Omega$ ]	normálová impedance



## Seznam použitých zkratek

ATM	Asynchronous Transfer Mode (standard pro vysokorychlostní síťovou architekturu)
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line (asymetrická varianta DSL)
AM	amplitudová modulace
AMI	Alternate Mark Inversion linkový kód
BBE	Background Block Error (bloková chyba na pozadí)
BBER	Background Block Error Ratio (poměr blokových chyb v pozadí)
BER	Bit Error Ratio (bitová chybovost)
BRI	Basic Rate Interface (druh ISDN přípojky)
CMI	Coded Mark Inversion linkový kód
CRC	Cyclic Redundancy Check (Cyklický redundantní součet)
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
DSL	Digital Subscriber Line (digitální účastnická linka)
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer (přístupový koncentrátor)
EB	Errored Block (chybový blok)
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (ekvivalentní izotropně vyzářený výkon)
ES	Errored Second (chybná sekunda)
ESR	Errored Second Ratio (poměr chybových sekund)
FEXT	Far End Cross Talk (přeslech na vzdáleném konci)
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum (typ modulace)
FM	frekvenční modulace
GSM	Groupe Spécial Mobile (globální systém pro mobilní komunikaci)
HDB3	High Density Bipolar linkový kód
HFTP	Hybrid Fibre Twisted Pair (hybridní přístupové sítě)
ISDN	Integrated Services Digital Network (digitální síť integrovaných služeb)
ITU-T	International Telecommunication Union (mezinárodní telekomunikační unie)
MCM	Modified Coded Mark Inversion linkový kód
NEXT	Near End Cross Talk (přeslech na blízkém konci)
nLoS	non Line of Sight (komunikace na nepřímou vzdálenost)
NRZ	Non Return to Zero linkový kód
PCM	Pulse Code Modulation (pulzně kódová modulace)
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy (plesiochronní digitální hierarchie)

RSSI	Received Signal Strength Indication (přijímaná úroveň signálu)
RZ	Return to Zero linkový kód
SDH	Synchronous Digital Hierarchy (digitální hierarchie)
SEP	Severely Errored Period (silně chybový interval)
SEPI	Severely Errored Period Intensity (poměr událostí SEP k celkovému času)
SES	Severely Errored Second (silně rušená chyba)
SESR	Severely Errored Second Ratio (poměr silně chybových sekund)
SNR	Signal to Noise Ratio (odstup signálu od šumu)
STP	Shielded Twisted Pair (stíněná kroucená dvojlinka)
TTL	Transistor-Transistor-Logic (tranzistorově-tranzistorová logika)
UTP	Unshielded Twisted Pair (nestíněná kroucená dvojlinka)
VoFR	Voice over Frame Relay (technologie pro přenos digitalizovaného hlasu)
VoIP	Voice over IP (technologie pro přenos digitalizovaného hlasu)
Wi-Fi	Wireless Fidelity (standard pro lokální bezdrátové sítě)

# Obsah

1. Úvod.....	5
2. Analogový signál.....	6
2.1 Změny analogového signálu.....	6
2.1.1 Úrovně signálu.....	7
2.1.1.1 Absolutní úrovně .....	7
2.1.1.2 Relativní úrovně .....	8
2.1.2 Útlum.....	9
2.1.2.1 Útlum a zisk signálu .....	9
2.1.2.2 Vlastní útlum vedení.....	10
2.1.2.3 Provozní útlum .....	10
2.1.2.4 Zbytkový útlum .....	11
2.1.2.5 Obrazový útlum .....	12
2.1.2.6 Útlum odrazu .....	12
2.1.2.7 Fyzikální jevy ovlivňující útlum vedení .....	13
2.1.2.8 Zesilovače.....	13
2.1.3 Zkreslení.....	14
2.1.3.1 Harmonické zkreslení .....	14
2.1.3.2 Fázové zkreslení .....	14
2.1.3.3 Intermodulační zkreslení .....	15
2.1.3.4 Oříznutí.....	15
2.1.3.5 Lineární zkreslení .....	16
2.1.4 Šum.....	17
2.1.5 Přeslech.....	18
2.2 Používaná vedení pro přenos analogového signálu.....	19
2.2.1 Metalická vedení pro přenos analogového signálu.....	19
2.2.2 Rádiová vedení pro přenos analogového signálu .....	20
2.2.2.1 Amplitudová modulace AM .....	21

2.2.2.2	Frekvenční modulace FM.....	22
2.2.3	Optická vedení pro přenos analogového signálu.....	22
3.	Digitální signál.....	24
3.1	Změny digitálního signálu.....	24
3.1.1	Útlum.....	25
3.1.1.1	Opakovače.....	26
3.1.2	Zkreslení.....	26
3.1.2.1	Zkreslení tvaru impulzů.....	27
3.1.2.2	Kvantizační zkreslení.....	28
3.1.2.3	Fázové chvění.....	28
3.1.2.4	Útlumové zkreslení.....	29
3.1.2.5	Disperze.....	30
3.1.3	Šum.....	30
3.1.4	Přeslech.....	31
3.1.5	Bitová chybovost.....	32
3.1.5.1	Vyhodnocování bitové chybovosti.....	33
3.1.5.2	Doporučení ITU-T pro vyhodnocování chybovosti.....	34
3.1.5.3	Další doporučení.....	36
3.1.6	Zabezpečení digitálního přenosu.....	36
3.1.6.1	Algoritmy detekce chyb.....	37
3.1.6.2	Samoopravné kódy.....	38
3.2	Linkové kódy.....	39
3.2.1	Linkový kód AMI.....	39
3.2.2	Linkový kód HDB3.....	40
3.2.3	Linkový kód MCMI.....	40
3.3	Používaná vedení pro přenos digitálního signálu.....	41
3.3.1	Metalická vedení pro přenos digitálního signálu.....	41
3.3.2	Rádiová vedení pro přenos digitálního signálu.....	42

3.3.2.1	Vliv počasí a přímá viditelnost .....	42
3.3.2.2	Vícecestné šíření signálu .....	43
3.3.2.3	Rušení jinými systémy ve stejném frekvenčním pásmu .....	43
3.3.2.4	Útlum prostředí a Fresnelova zóna .....	44
3.3.3	Optická vedení pro přenos digitálního signálu .....	44
4.	Změny signálů v různých typech sítí .....	46
4.1	Rozdělení sítí podle úrovní .....	46
4.1.1	Přístupové sítě .....	46
4.1.1.1	Analogová přístupová síť .....	47
4.1.1.2	Digitální přístupová síť .....	49
4.1.2	Transportní sítě .....	51
4.1.2.1	Digitální transportní síť .....	51
4.2	Rozdělení sítí podle služeb .....	53
4.2.1	Hlasové sítě .....	53
4.2.2	Datové sítě .....	54
5.	Praktická měření .....	56
5.1	Příprava měření .....	56
5.1.1	Analogový signál .....	57
5.1.1.1	Útlum na vedení .....	57
5.1.1.2	Zisk na zesilovači .....	58
5.1.1.3	Fázový posuv .....	60
5.1.1.4	Šum .....	61
5.1.1.5	Přeslech na vedení .....	62
5.1.1.6	Oříznutí .....	64
5.1.2	Digitální signál .....	65
5.1.2.1	Útlum na vedení .....	65
5.1.2.2	Obnovení úrovně signálu na opakovací .....	66
5.1.2.3	Zkreslení tvaru impulzu .....	67

5.1.2.4	Šum.....	68
5.1.2.5	Přeslech na vedení .....	69
5.1.2.6	Měření bitové chybovosti .....	70
5.2	Prezentace praktických měření.....	71
6.	Závěr.....	72
7.	Literatura .....	73
8.	Obsah CD .....	74

# 1. ÚVOD

Tématem mé bakalářské práce jsou změny přenášených informací v různých typech sítí. Výběr tématu této práce byl motivován mým zájmem o vytvoření komplexního přehledu změn přenášených signálů. V bakalářské práci se věnuji jednotlivým vlivům, které mohou nějakým způsobem deformovat signál vysílaný různými typy vedení a způsobovat tím špatnou interpretaci vyslané informace na přijímací straně vedení. V textu se tedy mj. věnuji i přenosovým vlastnostem používaných přenosových vedení pro přenos analogového a digitálního signálu. Snažím se systematicky klasifikovat a rozčlenit jednotlivé vlivy a jejich vliv na kvalitu přenosu. Velká část této práce je věnována přenosu digitálního signálu a s ním spjatým problémem bitové chybovosti, která má vztah k neustále se zvyšující přenosové rychlosti digitálních přenosových systémů.

První část této práce je teoretickým základem k problematice týkající se přenosu analogového signálu a používaných vedení pro tento přenos. Další část se zabývá problematikou přenosu signálu digitálního. Jak již bylo řečeno, tak největší část této části je věnována právě bitové chybovosti, která je klíčovým parametrem digitálních přenosových systémů. Obsah prvních dvou částí bakalářské práce jsem se snažil psát paralelně, abych zachoval stejnou náplň kapitol a mohl zároveň porovnat vliv jednotlivých vlivů na daný přenášený signál. Nejdříve se věnuji obecným vlivům, které jsou společné jak analogovému, tak i digitálnímu přenosu signálu. Z těchto obecných vlivů se věnuji jednotlivým druhům útlumů a jejich vlivu na přenos signálu, dále se zabývám různými druhy zkreslení. Mezi další vlivy řadím šum a přeslech a jeho vliv na přenos signálu. Na konci části věnované digitálnímu signálu se věnuji specifickým záležitostem, jako jsou linkové kódy a výše zmíněná bitová chybovost.

Další část této bakalářské práce je věnována přenosům signálů v konkrétních typech sítí.

V poslední části tohoto textu uvedu rozbor a výsledky měření, která jsem provedl z důvodu praktického ověření zpracovaných teoretických poznatků.

## 2. ANALOGOVÝ SIGNÁL

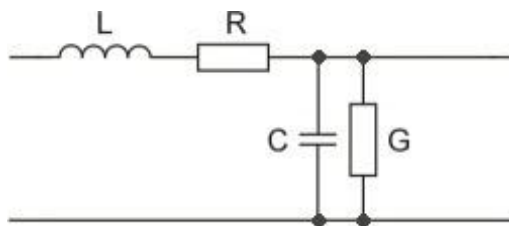
Starý telefonní systém je typickým příkladem užití analogového signálu. Hudba, řeč – to vše je šířeno ve formě zvukových vln. Mikrofon v telefonním přístroji dokáže tyto vlny konvertovat a podle toho generuje výstupní analogové napětí, které se v čase mění stejně jako vlastnosti zvukové vlny. Změny napětí jsou poté přenášeny přenosovým řetězcem přes zesilovače až do reproduktoru dalšího telefonního přístroje. Na přijímacím konci přenosové cesty se membrána reproduktoru rozechvívá podle přijatého napětí. Tím se opět vytváří zvuková vlna a posluchač slyší zvuk. Změny napětí, které jsou přenášeny z jednoho telefonu do druhého, jsou uvažovány jako analogové ke změnám zvukových vln. Takový signál nazýváme analogovým signálem.

Analogový signál je relativně jednoduché vytvořit a přenášet ho z místa na místo. Avšak nevýhodou analogových signálů je jejich spojitý charakter tzn., že každý detail tohoto signálu se liší. Stačí jen nepatrné působení nežádoucího šumu nebo jiného deformačního vlivu a výstupní signál už nebude identický k signálu vstupnímu.

V následujícím textu se budu věnovat jednotlivým nežádoucím vlivům, které mohou ovlivňovat přenášený analogový signál.

### 2.1 ZMĚNY ANALOGOVÉHO SIGNÁLU

V reálném světě se musíme umět vypořádat se situacemi, které odlišují tento svět od toho ideálního. Při přenosu signálu toto platí rovněž. Není možné signál jednoduše poslat vedením a očekávat, že na konci vedení bude identický. Při přenosu signálu musíme čelit různým vlivům, které signál různě mění. Na následujícím obrázku uvádím schéma dvoudrátového vedení, jak se ve skutečnosti jeví z hlediska fyzikálních vlastností.



**Obr. 1: Náhradní schéma vedení**

Z obrázku je patrné, že mezi dvěma vodiči, které jsou vedeny vedle sebe, dochází k projevu kapacitních vazeb (C). Tímto působením dochází ke změně průběhu přenášených signálů, ale nedochází k jejich utlumení. K utlumení, které na druhou stranu neovlivňuje průběh signálu, dochází působením dalších prvků v našem náhradním schématu. Těmito prvky jsou rezistory. V obrázku máme zapojen jeden rezistor v sérii (R), ten klade odpor vedenému signálu a druhý mezi vodiči (G), který

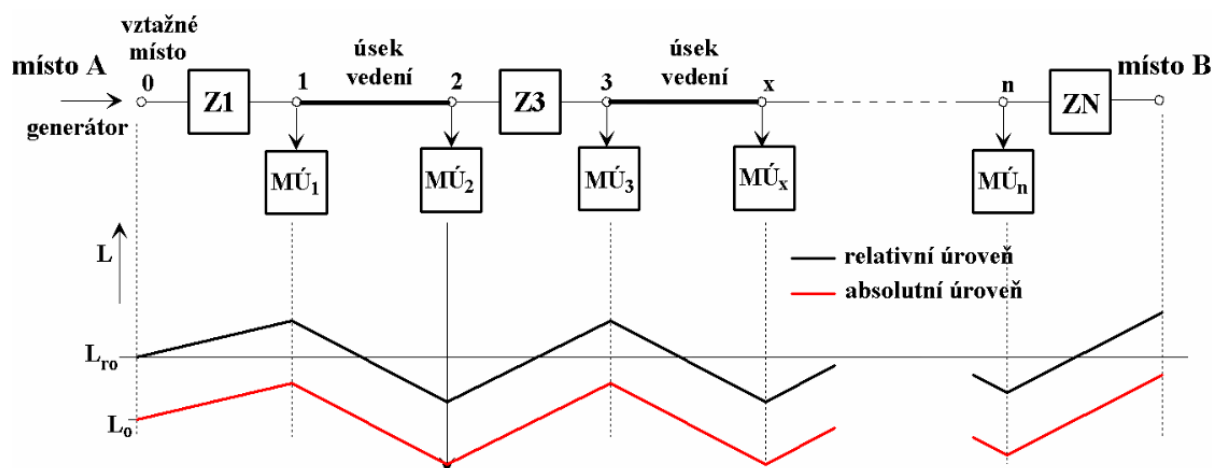


ovlivňuje svod vedení. Dále máme v obrázku vyznačenu cívku ( $L$ ), která svou indukčností ovlivňuje průběh signálu. Jednoduše řečeno, působením odporu dochází ke zmenšení amplitudy signálu a vlivem kapacity a indukčnosti dochází ke změně průběhu signálu (zaoblování).

V další části této kapitoly se budu podrobněji věnovat změnám, které vznikají při přenosu analogového signálu. Mezi tyto změny patří útlum, zkreslení, šum a přeslech na vedení.

### 2.1.1 Úrovně signálu

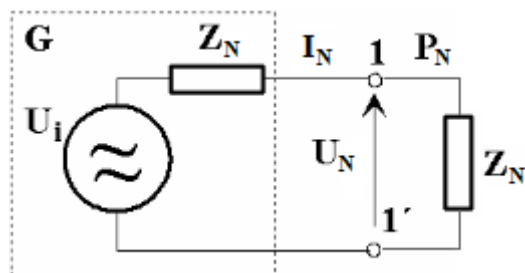
Celý přenosový řetězec i jeho jednotlivé části můžeme z hlediska přenosu signálu považovat za čtyřpóly (dvojbrany). K vyjádření napětí a výkonu nejčastěji používáme logaritmické poměrové veličiny – úrovně  $L$  (z anglického slova Level). Rozlišujeme úrovně napětí a výkonu, které mohou být relativní nebo absolutní. Na obr. 2 je znázorněn přenosový řetězec, který je rozdělen na  $n$  úseků, kde každý sousední úsek je oddělen zesilovačem, který nám zesiluje postupně utlumený signál. Dále na obrázku vidíme znázorněné absolutní i relativní úrovně signálu, kterým se budu podrobněji věnovat dále.



Obr. 2: Úrovně signálu

#### 2.1.1.1 Absolutní úrovně

Jak sám název napovídá, tak vztažnými hodnotami u absolutních úrovní budou pevné přesně definované hodnoty zdánlivého výkonu  $P_N$ , efektivní hodnoty napětí  $U_N$  a příslušné impedance  $Z_N$ , na které se absolutní úroveň vztahuje. Tyto vztažné (normálové) hodnoty jsou nejčastěji označovány indexem  $N$ . Při definici těchto hodnot vycházíme z tzv. normálového generátoru, který generuje sinusový proud. [1] Následuje schéma normálového generátoru:



**Obr. 3: Normálový generátor**

Normálové hodnoty jsou  $Z_N = 600\Omega$ ,  $P_N = 1mW$ ,  $U_N = 0,775V$ ,  $I_N = 1,29mA$ ,  $U_i = 1,55V$ .

Absolutní úroveň výkonu nebo napětí v kterémkoliv místě přenosového řetězce stanovíme ze zdánlivého výkonu  $P$  nebo efektivní hodnoty napětí  $U$  pomocí následujících vzorců [1]:

- **Absolutní úroveň výkonu**

$$L_m = 10 \log \frac{P}{P_N} \quad (1)$$

- **Absolutní úroveň napětí**

$$L_u = 20 \log \frac{U}{U_N} \quad (2)$$

Pokud jsou jednotlivé části přenosového řetězce impedančně přizpůsobeny, pak platí následující vztah:

$$Z = Z_N = 600\Omega \Rightarrow L_m = L_u \quad (3)$$

Pokud nejsou jednotlivé části přenosového řetězce impedančně přizpůsobeny, platí mezi absolutními úrovněmi výkonu a napětí následující vztah [9]:

$$L_m = 10 \log \frac{P}{P_N} = 10 \log \frac{U^2}{\frac{Z}{Z_N} U_N^2} = 20 \log \frac{U}{U_N} + 10 \log \frac{Z_N}{Z} = L_u + \Delta Z \quad (4)$$

kde  $\Delta Z$  je tzv. korekční člen.

### 2.1.1.2 Relativní úrovně

Relativní úrovně popisují vztah mezi různými body přenosového řetězce. Volíme vždy určité vztahné místo, ke kterému v místě  $x$  vztahujeme příslušnou veličinu.

- **Relativní úroveň výkonu**

$$L_r = 10 \log \frac{P_x}{P_0} \quad (5)$$

- **Relativní úroveň napětí**

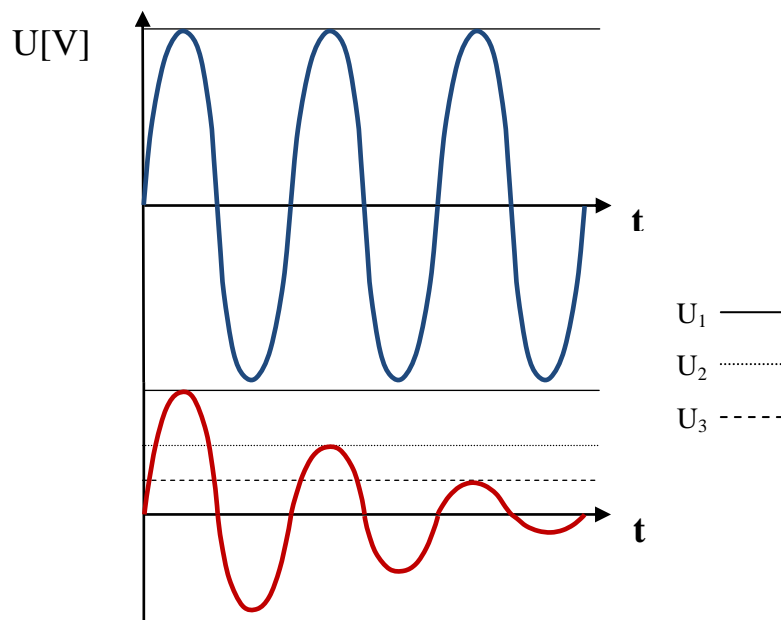
$$L_{ru} = 20 \log \frac{U_x}{U_0} \quad (6)$$

kde  $P_0$  a  $U_0$  je výkon a napětí ve vztázném bodě.

### 2.1.2 Útlum

V této části se budu věnovat jednotlivým typům útlumů, se kterými se můžeme v praxi setkat. Na konci této kapitoly se zmíním o zesilovačích, které utlumený signál zesilují a jsou tak nedílnou součástí přenosového řetězce.

Pro představu, již zde na začátku uvádím obrázek, na kterém můžeme vidět průběh ideálního sinusového signálu a průběh toho samého signálu, ale utlumeného. Z vyznačených úrovní napětí je patrné, že  $U_1 > U_2 > U_3$ , tedy že opravdu došlo k útlumu. Útlum napětí se spočítá ze vzorce č. 8 (viz 2.1.2.1).



**Obr. 4: Sinusový signál ovlivněný útlumem**

#### 2.1.2.1 Útlum a zisk signálu

Vlastnosti vedení z hlediska přenosu signálu z jeho počátku na jeho konec popisujeme nejčastěji útlumem. Útlum je logaritmický poměr hodnot elektrické veličiny, se kterou do vedení

vstupujeme a hodnoty elektrické veličiny se kterou z vedení vystupujeme. Pokud je útlum kladná hodnota, pak byl signál zeslaben. Útlum značíme  $A$  a uvádíme jej v jednotkách dB nebo Np. Pokud je útlum záporná hodnota, znamená to, že signál byl zesílen. Potom již nepočítáme se zápornou hodnotou útlumu, ale zavádíme zisk signálu  $S$ . Zisk je v podstatě záporný útlum, a proto platí rovnost  $S = -A$ . Zisk je spojen s aktivními částmi přenosového řetězce, jako jsou průběžné nebo koncové zesilovače. Zisk signálu uvádíme logicky ve stejných jednotkách jako útlum. Ve zbytku textu budu používat pouze vzorce, ve kterých se počítá s jednotkami dB.

Dále již následují vzorce pro výpočet útlumu (resp. zisku) výkonu, napětí a proudu [1]:

- **Útlum a zisk výkonu**

$$A_p = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \quad S_p = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (7)$$

- **Útlum a zisk napětí**

$$A_U = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \quad S_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad (8)$$

- **Útlum a zisk proudu**

$$A_I = 20 \log \frac{I_1}{I_2} \quad S_I = 20 \log \frac{I_2}{I_1} \quad (9)$$

Ve zbytku kapitoly se budu věnovat několika útlumům, které jsou z hlediska přenosu signálu nejdůležitější. Jedná se o vlastní útlum vodiče, provozní útlum, zbytkový útlum a obrazový útlum.

### 2.1.2.2 *Vlastní útlum vedení*

Vlastní útlum vedení je vyjádřen následujícím vztahem:

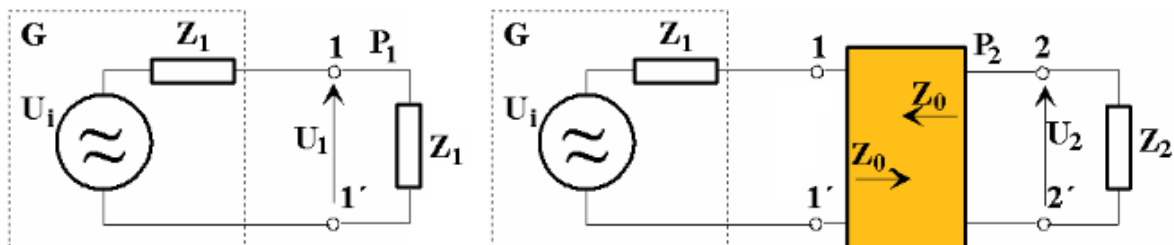
$$A = \alpha \cdot l \quad (10)$$

kde  $\alpha$  je měrný útlum, který nám udává, k jak velkému poklesu amplitudy dojde na aerce jeanono metru vedení, a  $l$  je délka vedení. Je jasné vidět, že čím delší vedení bude, tím bude docházet k většímu útlumu. V takovém případě je nutné délku vedení proložit zesilovači, které signál opět zesílí na požadovanou úroveň (viz 2.1.1.3).

### 2.1.2.3 *Provozní útlum*

Provozní útlum má mimořádný význam, protože jeho definice nejvíce odpovídá praxi. Při skutečném zapojení přenosové cesty ovlivňují přenosové vlastnosti také uzavírající impedance. Vliv těchto impedancí na přenosovou schopnost nám vyjadřuje právě provozní útlum. Provozní útlum je

logaritmický poměr výkonu  $P_1$  a  $P_2$ . Kde výkon  $P_1$  je výkon který dodává zdroj s vnitřním napětím  $U_i$  a s vnitřní impedancí  $Z_1$  do zátěže se stejnou impedancí ( $Z_1$ ).  $P_2$  je výkon který dodává stejný zdroj přes uvažovaný čtyřpól s impedancí  $Z_0$  do zátěže s impedancí  $Z_2$ . [1]



Obr. 5: Provozní útlum

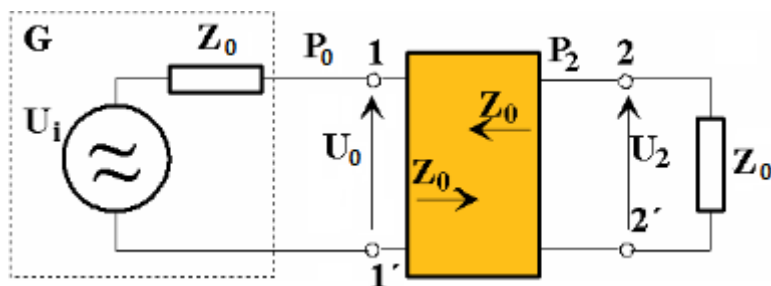
Následuje odvození vzorce pro výpočet provozního útlumu [1]:

$$A_p = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad P_1 = \frac{U_1^2}{4Z_1} \quad P_2 = \frac{U_2^2}{Z_2} \quad (11)$$

$$A_p = 20 \log \frac{U_1}{U_2} + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} \quad (12)$$

#### 2.1.2.4 Zbytkový útlum

Zbytkový útlum je zvláštním druhem provozního útlumu. Zjišťuje se u jednotlivých obvodů, určitých částí přenosových systémů či u celého přenosového systému. Zbytkový útlum je útlum měřený na výstupu přenosového systému (nebo jeho části) zakončeného normálovou impedancí  $Z_0 = 600\Omega$ , na jehož vstupu je připojen normálový generátor. Dále uvádím obrázek a vzorec pro vyjádření zbytkového útlumu  $A_z$ :



Obr. 6: Zbytkový útlum

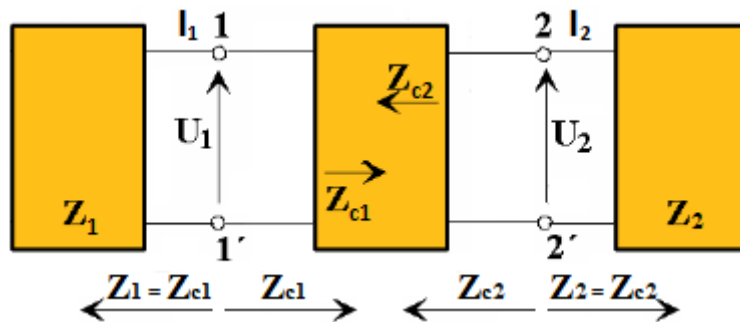
$$A_z = 10 \log \frac{P_0}{P_2} \quad P_0 = \frac{U_0^2}{Z_0} \quad P_2 = \frac{U_2^2}{Z_0} \quad (13)$$

Dosazením normálových hodnot  $Z_0 = 600\Omega$ ,  $U_i = 1,55V$ ,  $U_0 = 0,775V$ ,  $P_0 = 1mW$  dostaneme následující vztah [1]:

$$A_z = 20 \log \frac{U_0}{U_2} \quad (14)$$

### 2.1.2.5 Obrazový útlum

Obrazový neboli tzv. charakteristický útlum je útlum, zjištěný při ideálním impedančním přizpůsobení, kdy vnitřní impedance zdroje je obrazem vstupní charakteristické impedance čtyřpólu ( $Z_1 = Z_{c1}$ ) a zatěžovací impedance je obrazem výstupní charakteristické impedance čtyřpólu ( $Z_2 = Z_{c2}$ ). [9]



Obr. 7: Obrazový útlum

Následuje vzorec pro výpočet obrazového útlumu  $A_o$ :

$$A_o = 10 \log \frac{|U_1| |I_1|}{|U_2| |I_2|} \quad (15)$$

### 2.1.2.6 Útlum odrazu

Amplituda napětí a proudu se v každém místě vedení skládá ze dvou složek. První složkou je vlna hlavní (postupná) a druhou složkou je vlna zpětná (odražená). Amplitudy těchto vln závisí na vlnové impedanci vedení  $Z_C$  (charakteristická impedance vedení) a na impedančním zakončení vedení  $Z_2$ . V praxi mohou nastat dvě situace:

1. Pokud platí vztah  $Z_C = Z_2$ , odražená vlna nevzniká a vedením se šíří pouze vlna postupná. Vedení je tedy bezodrazově zakončeno a to je žádoucí stav.
2. Pokud však platí vztah  $Z_C \neq Z_2$ , dojde k uplatňování útlumu odrazu.

Pro útlum odrazu platí následující vztah [9]:

$$A_{k0} = 20 \log \frac{1}{k_0} \quad k_0 = \left| \frac{Z_2 - Z_C}{Z_2 + Z_C} \right| \quad (16)$$

kde  $k_0$  je koeficient odrazu a vyjadřuje stupeň korektnosti impedančního zakončení.

### 2.1.2.7 Fyzikální jevy ovlivňující útlum vedení

V této části bych se chtěl ještě zmínit o dvou fyzikálních vlivech, které nám zvyšují měrný odpor vedení a tím dochází i ke zvyšování útlumu vedení. Mezi tyto vlivy patří povrchový jev (skin efekt) a jev blízkosti. Tyto vlivy se uplatňují převážně u vysokofrekvenčních signálů.

#### ▪ Povrchový jev

Při průtoku střídavého proudu vodičem, jeho magnetické pole indukuje ve vodiči vířivé proudy, které působí proti toku primárního proudu. S tím, jak vzrůstá frekvence, toto nutí celkový proud ke stále větší koncentraci na povrchu vodiče. Při velmi vysokých frekvencích je skoro všechen proud veden v tenké vrstvě blízko povrchu vodiče. Tento efekt se nazývá povrchový jev (skin efekt). Chceme-li určit tloušťku vrstvy  $d_s$ , ve které je veden proud o frekvenci  $f$ , můžeme použít následující vztah [10]:

$$d_s = \sqrt{\frac{\rho}{f\pi\mu}} \quad (17)$$

kde  $d_s$  vyjde v mm,  $f$  je frekvence uvedená v kHz,  $\rho$  je měrná rezistivita vodiče a  $\mu$  je permeabilita materiálu (viz tabulky).

#### ▪ Jev blízkosti

Podobně jako povrchový jev, má i jev blízkosti vliv na výsledné rozložení proudové hustoty ve vedení a ve výsledku způsobuje zvětšení měrného odporu u vysokých frekvencí. Jev blízkosti vzniká u dvou vodičů téhož vedení, jimiž protéká proud v opačných směrech. Vnější silové čáry vyvolané proudem ve vodiči  $A$  způsobí vznik dílčích proudů ve vodiči  $B$ , které na blízké straně k vodiči  $A$  procházející proud zvětší a na odvrácené straně zmenší. Podobně působí i vliv blízkosti vodičů sousedních párů, kovového pláště nebo stínění. Na rozdíl od povrchového jevu, který se zvětšuje se vzrůstající frekvencí, jev blízkosti dosáhne při určitém kmitočtu rovnovážné hodnoty a dále se nezvyšuje. [10]

### 2.1.2.8 Zesilovače

Do teď jsem se věnoval jednotlivým vlivům, které signál utlumují. Na závěr této kapitoly by bylo vhodné zmínit se o možnostech zesílení signálu, tedy o zesilovačích.

Zesilovač je elektronický obvodový systém, který se používá k zesílení elektronických signálů. Při zesilování dochází pouze ke zvětšení amplitudy signálu, tvar a frekvence signálu jsou nezměněny. Zesilovače jsou nedílnou součástí delších přenosových řetězců a bývají umístěny na místech, kde je potřeba zesílit úroveň signálu na požadovanou úroveň. Zesilovače můžeme rozdělit podle různých hledisek:

## 1. Podle frekvence zesilovaných signálů

- Nízkofrekvenční – frekvence v pásmu slyšitelném lidskému uchu (20 Hz – 20 kHz)
- Vysokofrekvenční

## 2. Podle velikosti vstupního signálu

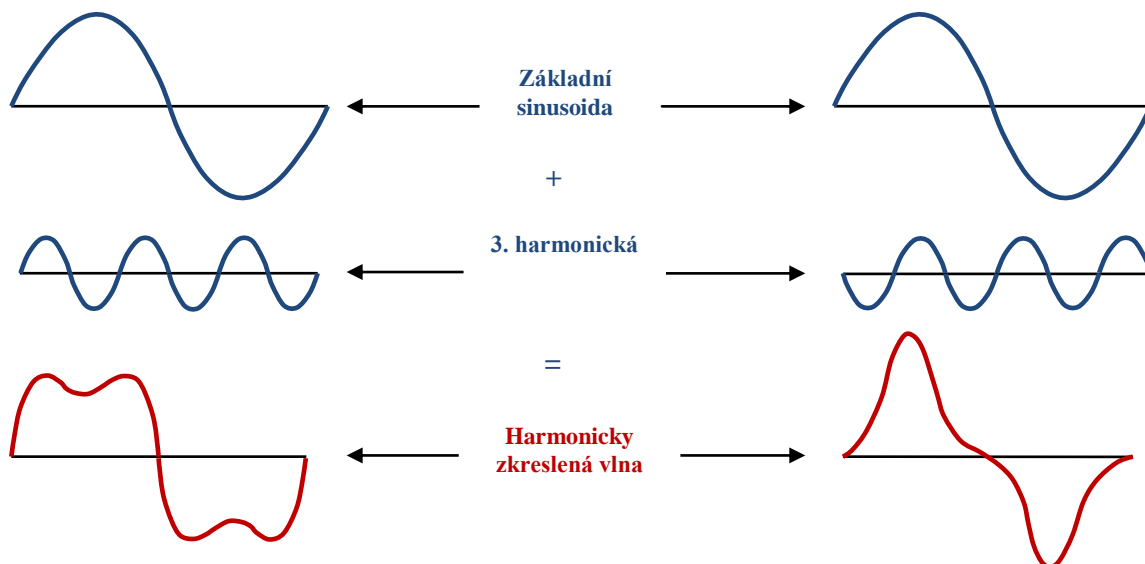
- Předzesilovače – zesilují signál malé úrovně
- Výkonový zesilovač – velké výkonové zesílení

### 2.1.3 Zkreslení

Zkreslení je dalším vlivem, který ovlivňuje průběh signálu. Stejně tak jako útlum, je i zkreslení signálu nežádoucí účinek, při kterém dochází k deformaci signálu a přenášené informace. V následující kapitole se budu věnovat základním typům zkreslení, které mohou signál ovlivňovat.

#### 2.1.3.1 Harmonické zkreslení

Vznik harmonického zkreslení je způsoben nelinearitou aktivních součástek, jako jsou např. diody a tranzistory. Nelinearita způsobuje vznik vyšších harmonických složek vstupního signálu. Harmonické složky obsahují jednotné násobky frekvence signálu vstupního. Sudé harmonické složky nepůsobí na signál tak rušivě jako liché. Nejnejpříjemnější je zkreslení třetí harmonickou [1].



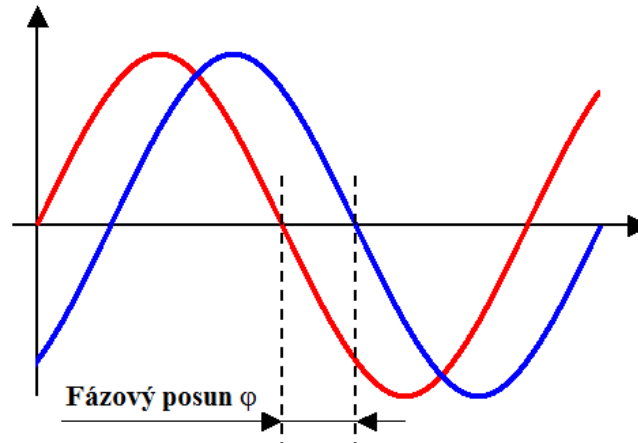
Obr. 8: Harmonické zkreslení

#### 2.1.3.2 Fázové zkreslení

Ke vzniku fázového zkreslení dochází při přenosu širokých kmitočtových pásem. Nižší kmitočty se šíří vedením rychleji než kmitočty vysoké. Z toho plyne, že nižší kmitočty se dostanou na



konec vedení rychleji než kmitočty vysoké. Dochází vlastně k časovému posuvu mezi nízkofrekvenční a vysokofrekvenční částí přenášeného pásma. Z důvodu tohoto posuvu pak přijímaný signál neodpovídá signálu vysílanému [2].



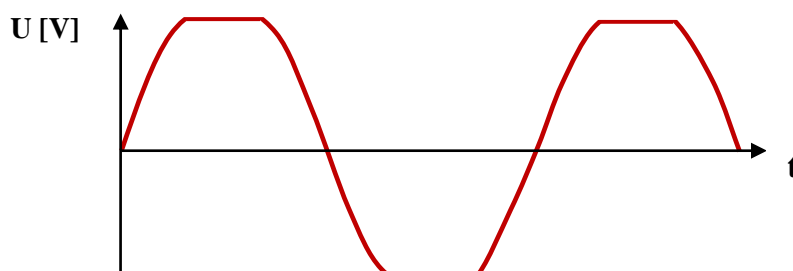
**Obr. 9: Fázové zkreslení**

### 2.1.3.3 Intermodulační zkreslení

Intermodulační zkreslení je způsobeno nelinearitou převodních charakteristik zesilovačů. Jestliže přivedeme na vstup zesilovače dva sinusové signály o frekvencích  $f_1$  a  $f_2$ , potom se nám na výstupu zesilovače kromě těchto původních dvou sinusových signálů objeví ještě jejich kombinace ( $f_1 + f_2$ ), ( $f_1 - f_2$ ), ( $2 \cdot f_1 - f_2$ ), ( $2 \cdot f_2 - f_1$ ), obecně ( $m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2$ ), kde  $m$  a  $n$  je celé číslo [2].

### 2.1.3.4 Oříznutí

K oříznutí dochází, když obvod, obvykle se jedná o zesilovač, nedokáže zpracovat nejvyšší hladiny signálu a jednoduše je „odstříhne“. Když má zesilovač zesílit vstupní signál na hodnotu vyšší, než je jeho maximální výkon, dojde k tomu, že hladiny signálu, které jsou nad hodnotou jeho maximálního výkonu jednoduše „odstříhne“. Tím dochází k deformaci signálu a ze signálu sinusového průběhu nám může vzniknout signál úplně jiný (viz obr. 10).



**Obr. 10: Oříznutí**

### 2.1.3.5 Lineární zkreslení

Ideální přenosové řetězce přenášejí signál všech kmitočtů bez omezení, mají tedy lineární přenosové charakteristiky. Odchyly reálných přenosových charakteristik od ideálních (lineárních) charakteristik nazýváme zkreslením. Lineární zkreslení popisuje závislost přenosových charakteristik na kmitočtu a dělíme ho na:

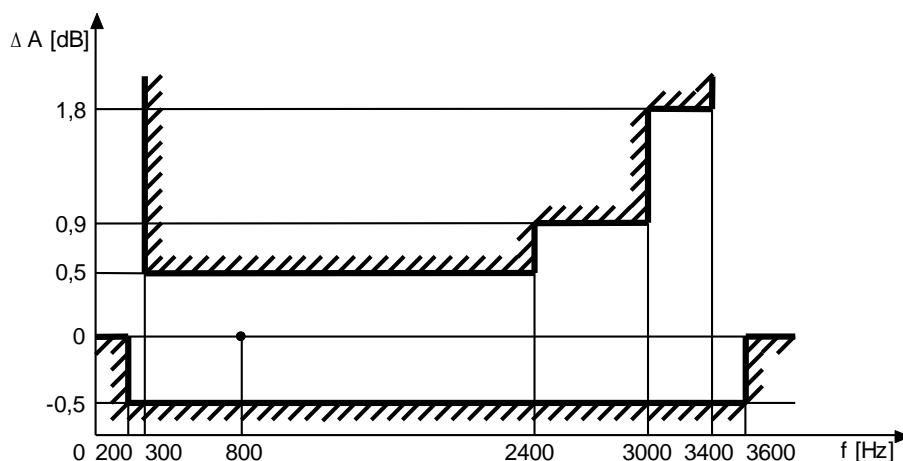
1. Útlumové zkreslení
2. Zkreslení skupinového zpoždění

- **Útlumové zkreslení**

Útlumovým zkreslením definujeme rozdílné provozní útlumy pro různé kmitočty. Často měříme frekvenční charakteristiku útlumového zkreslení, kde jsou hodnoty vztaženy k referenční hodnotě  $A(f_R)$ . Potom platí následující vztah [9]:

$$\Delta A_f = A(f) - A(f_R) \quad (18)$$

kde  $\Delta A$  je útlumové zkreslení na příslušném kmitočtu,  $A(f)$  je hodnota na příslušném kmitočtu a  $A(f_R)$  je hodnota pro vztazný kmitočet, který je pro analogový systém 800 Hz. Aby analogový systém vyhovoval standardu, musí graficky vynesena závislost na vztazném kmitočtu procházet nulou a musí se vejít do toleranční masky. Na následujícím obrázku uvádím toleranční masku pro telefonní okruh podle doporučení ITU-T M.102:



Obr. 11: Toleranční maska pro telefonní okruh

- **Zkreslení skupinového zpoždění**

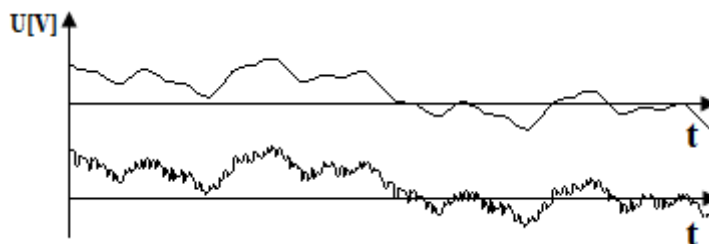
Jak jsem uvedl v části o fázovém zkreslení, různé kmitočty se vedením šíří různě rychle. Vzhledem k tomu, že v praxi nikdy nepřenášíme po vedení jeden kmitočet, ale celá kmitočtová pásma, počítáme proto se skupinovou rychlostí šíření. Skupinová rychlost šíření je rychlost, s níž se šíří po

vedení skupina dvou nebo více sinusových signálů, jejichž kmitočty se nepatrně liší. Z důvodu různých rychlostí šíření dochází ke zkreslení skupinového zpoždění.

Útlumové zkreslení a zkreslení skupinovým zpožděním se v praxi vyskytuje společně a jsou dány frekvenční závislostí parametrů přenosových systémů. Pro korekci těchto zkreslení se na přijímací straně používají korektory různých typů, které pomocí útlumových a fázových článků utlumí málo tlumené složky a zpozdí rychleji se šířící složky. Výsledkem je vyrovnání útlumu a skupinového zpoždění pro potřebné frekvenční pásmo. [9]

#### 2.1.4 Šum

V předchozím textu jsme se dozvěděli, že při přenosu signálu dochází k určité degradaci, která nastává z důvodu útlumu a zkreslení signálu. V následující části se budu věnovat dalšímu vlivu, který signál deformuje. Jedná se o šum. Hned v úvodu opět uvedu obrázek, na kterém je vidět analogový signál a jak tento signál může vypadat poté, co ho vystavíme působení šumu.



**Obr. 12: Analogový signál ovlivněný šumem**

Šum je definován jako nežádoucí elektrický nebo magnetický jev, který poškozuje signál přenášející užitečnou informaci. Působení šumu můžeme rozdělit do dvou kategorií podle toho, zda se bavíme o vnějším nebo vnitřním působení na signál. Zatímco vnitřní šum je spjat s vlastnostmi samotného signálu a s fyzikálními vlastnostmi přenosového média (jako je např. materiál, ze kterého je vyroben), vnější šum vzniká při působení přírodních a fyzikálních vlivů jako je elektrické a magnetické pole. Šum limituje schopnost správně identifikovat vyslanou informaci. Dále uvádím některé zdroje vnitřního a vnějšího šumu:

1. Elektromagnetická interference
2. Termální šum
3. Rádiové-frekvenční interference
4. Vlivy jiných elektrických spotřebičů v okolí
5. Přepínání vysokonapěťových zátěží v blízkosti vedení
6. Zahřívání vznikající při změnách odporu
7. Elektrické motory

## 8. Špatná instalace vedení

Jak moc šum ovlivní přenášený signál, závisí na poměru celkového výkonu signálu k celkové úrovni šumu. Tento poměr je známý jako Signal to Noise Ratio [3].

$$SNR = 10 \log \left| \frac{P_S}{P_N} \right| \quad (19)$$

Když je výkon signálu  $P_S$  v porovnání k šumu  $P_N$  řádově vyšší, pak může být šum většinou zanedbán. Avšak signál má omezený výkon, a proto při přenosu bez zesilovačů na velké vzdálenosti dochází k postupnému útlumu užitečného signálu z důvodu působení vlastního útlumu vodiče. Tím dochází i ke zvětšování působení šumu na tento signál. Po určité době může dojít k tomu, že bude signál šumem totálně poškozen.

Ačkoliv vnitřní a vnější interference mohou být při přenosu analogového signálu problematické, je analogový přenos v průmyslovém odvětví dodnes hojně využíván. Nežádoucí efekt šumu na přenos signálu může být také víceméně potlačen při správném návrhu, výběru vhodného vedení (vhodné stínění a zemnění) a jeho instalací.

Další možností, jak tento jev minimalizovat, spočívá v maximalizaci  $SNR$ . To znamená, zvýšit výkon vysílaného signálu. Přestože tato technika v některých případech funguje, má také své omezení. Při zesílení výkonu signálu totiž dochází k efektu, kdy při zvětšení amplitudy signálu dochází i ke stejnému zvýšení hladiny šumu.

Další podstatnou věcí pro efektivní fungování přenosového systému je zemnění. Špatné zemnění může vést ke vzniku nebezpečných proudových zemních smyček (ground loops) a pravděpodobně ke vzniku další interference. Existuje několik technik zemnění, které nejsou navrženy pouze pro ochranu přenášených informací, ale i pro ochranu jiných zařízení a živých bytostí.

### 2.1.5 Přeslech

Dalším omezujícím faktorem při přenosu signálů jsou přeslechy. Mají vliv na dosah signálu a na počet přenosových systémů provozovaných v jednom kabelu.

Přeslech na blízkém konci (NEXT) vzniká přenosem signálů z vysílače na ostatní páry ve stejném vícepárovém kabelu přes kapacitní a induktivní vazby na vstup přijímače na stejném konci. Přeslech typu NEXT je ve většině případů nejvýznamnějším zdrojem rušení, který limituje dosah přenosových systémů pracujících v základním pásmu na vyšších frekvencích. NEXT závisí na typu použitého kabelu a na frekvenci přenášeného signálu. [14]

Přeslech na vzdáleném konci (FEXT) se projevuje tím, že signály z vysílače na jiných párech ve stejném kabelu pronikají do vstupu přijímače na opačném konci vedení. FEXT se většinou

zanedbává u systémů s dominantním přeslechem na blízkém konci. Velikost FEXTu závisí jak na frekvenci signálu, tak i na délce vedení.

Více se těmito přeslechy zabývám v části pojednávající o digitálním signálu, a proto vás pro více informací odkazuji právě na tuto kapitolu (viz 3.1.4).

## **2.2 POUŽÍVANÁ VEDENÍ PRO PŘENOS ANALOGOVÉHO SIGNÁLU**

Volba vedení by určitě neměla být podceňována, protože již správná volba vedení nám může umožnit efektivnější přenos signálu. Analogový přenosový systém se obvykle skládá z dvoudrátového nebo třídrátového vedení. V systémech, kde se klade větší důraz na přesnost přenosu, se využívá ještě právě třetího vedení, a to ke stínění. V konfiguraci se třemi dráty, je stínící vedení uzemněno u zdroje signálu. To nám umožňuje eliminovat šum. Samozřejmě nám toto řešení neposkytuje stoprocentní jistotu odchyčení veškerého šumu. Především v případech, kdy se setkáváme se situací, kde má šum a samotný přenášený signál stejnou frekvenci, je nesmírně důležité předcházet těmto vlivům. V této situaci totiž není možné na přijímacím konci systému vzniklý šum odfiltrout.

Ačkoliv není nikdy možné docílit úplné ochrany proti šumu, správným návrhem, následným výběrem typu vedení a jeho následnou montáží můžeme tento nežádoucí vliv celkem slušným způsobem eliminovat.

### **2.2.1 Metalická vedení pro přenos analogového signálu**

Ve většině případů bývá pro přenos analogového signálu využito dvou metalických vodičů. Mezi základní metalické přenosové prostředky patří následující čtyři typy. Jedná se o klasickou dvojlunku, stíněnou dvojlunku, kroucenou dvojlunku a koaxiální kabel.

Klasická dvojlinka se skládá z dvojice běžných jednožilových vodičů. Aby se co možná nejvíce minimalizoval vliv rušení, používá se pro tyto vodiče tzv. diferenciální buzení. To znamená, že přenášenou informaci vyjadřujeme rozdílem signálů na obou vodičích. Dojde-li pak vlivem vnějšího rušení ke stejné změně signálu na obou vodičích, na rozdíl obou signálů se toto neprojeví.

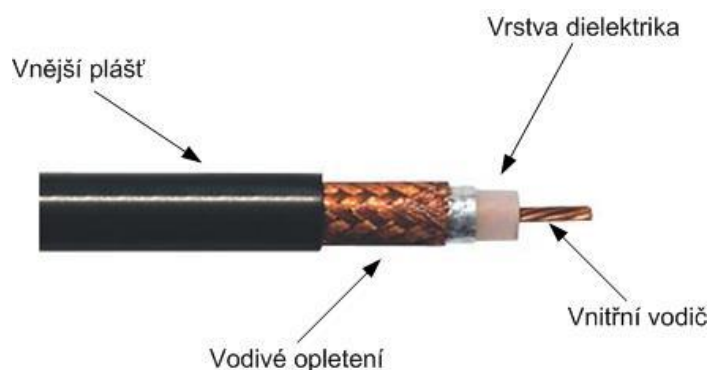
Stíněná dvojlinka se skládá z jednoho páru vodiče a jednoho stínícího vodiče, který nepřenáší žádný proud. Stínící vodič nám slouží k uzemnění případně vzniklého šumu. Při použití stíněné dvojlinky nesmíme zapomínat na zásady správného zemnění. Stínící drát musí být uzemněn pouze u zdroje nebo přijímače. To nám umožňuje vyhnout se vzniku zemních proudových smyček.

Při souběžném vedení více dvojic vodičů pak může i mezi nimi docházet k nežádoucímu přeslechu, tedy ke vzájemnému ovlivňování přenášených signálů (viz 2.1.4). To plyne z vlastnosti, že dvě souběžná vedení se chovají jako jednoduchá anténa. Toto ovlivňování je možné výrazně omezit

zkroucením jednotlivých dvojic vodičů v pravidelných intervalech, což minimalizuje jejich chování jako antény - tak vzniká kroucená dvojlinka (Twisted Pair).

Ještě větší odolnosti proti rušení můžeme dosáhnout stíněním každé dvojice vodičů. Pak se jedná o stíněnou kroucenou dvojlinku (Shielded Twisted Pair), která je pak ovšem dražší než původní nestíněná kroucená dvojlinka (Unshielded Twisted Pair). Kroucená dvojlinka se běžně využívá u telefonních přípojek.

Koaxiální kabel je nejefektivnějším metalickým vedením, co se týče ochrany přenášeného signálu před rušením. Koaxiální kabel je tvořen vnitřním měděným nebo postříbřeným vodičem, kolem kterého se nachází izolující vrstva dielektrika. Nad touto vrstvou je pak nanášeno vodivé opletení, které je překryto další izolující vrstvou - vnějším pláštěm. Vodivé opletení představuje rozprostřený vodič, jehož podélná osa je shodná s osou vnitřního vodiče. Z tohoto důvodu je použito označení koaxiální kabel (tj. souosý kabel). Hlavním efektem vodivého opletení je právě odstínění vnitřního vodiče od vlivu vnějšího rušení. Koaxiální kabely nevytvářejí téměř žádné vnější elektrické ani magnetické pole a zároveň jsou vůči těmto působením vysoce imunní. Z těchto vlastností vyplývá, že jsou nejvhodnějším metalickým řešením pro vedení signálu.



**Obr. 13: Koaxiální kabel**

### 2.2.2 Rádiová vedení pro přenos analogového signálu

Rádiová vedení většinou používáme všude tam, kde není z nějakých důvodů možné dovést signál klasickým metalickým vedením. Nejčastěji je rádiový přenos používán v místech, kde není možné kvůli členitosti terénu signál dopravit jinak než vzduchem nebo v případech, kdy nechceme být omezováni pevným spojením (např. v případě poslechu rádia v autě). S rádiovým přenosem jsou však spojeny největší problémy. Zde totiž nemůžeme přesně určit, kudy se bude signál šířit, jako v případě metalického vedení. Mezi hlavní problémy spojené s šířením rádiového signálu patří hlavně vliv počasí a přímé viditelnosti, rušení jinými systémy, které se nacházejí ve stejném frekvenčním pásmu, vícecestné šíření signálu a v neposlední řadě je to vlastní útlum přenosového prostředí.

Vliv počasí a přímé viditelnosti je v případě rádiového spojení nezanedbatelný. Počasí nemůžeme žádným způsobem nějak ovlivnit, tudíž musíme přenosový systém připravit i pro zhoršené meteorologické podmínky. V případě zhoršeného počasí (např. když prší) totiž narůstá vlastní útlum prostředí, kterému se budu podrobněji věnovat v kapitole (viz 3.3.2.4).

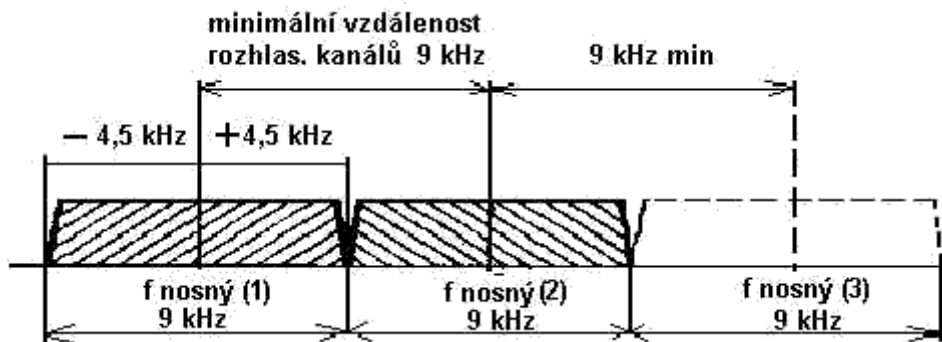
Problém rušení jinými systémy se snaží řešit Český telekomunikační úřad licencováním přidělovaných rádiových frekvencí. Existuje i tzv. nelicencované pásmo, kde se smí vysílat bez nutnosti vlastnění licence. I v tomto pásmu však platí určitá pravidla a omezení, které musí vysílače a přijímače signálu splňovat. Asi nejdůležitějším omezením je limit týkající se maximálního dovoleného vyzářeného výkonu EIRP. V případě nedodržení limitů ČTÚ dochází ke snížení odstupu užitečného signálu od šumu SNR (viz 2.1.3) a to způsobuje rapidní snížení kvality signálu. U nelicencovaného pásma samozřejmě nemáme zaručenou garanci kvality přenosu.

Dalším problémem šíření rádiového signálu je vícestné šíření. K tomuto dochází, když se mezi vysílačem a přijímačem nachází překážky, od kterých je signál různě odrážen. Toto způsobuje, že na přijímači dochází k příjmu a ve výsledku k součtu několika signálů, které jsou různě fázově zpožděné a amplitudově deformované.

Všechny tyto problémy se dají do určité míry řešit volbou správné modulace. U analogového signálu používáme nejčastěji amplitudovou modulaci AM a frekvenční modulaci FM. V následujícím textu se jim budu věnovat podrobněji.

### **2.2.2.1 Amplitudová modulace AM**

Při amplitudové modulaci se mění původně stálá amplituda nosné vlny v rytmu přenášené informace. Je-li přenášený tón hlasitý, je i velikost změny amplitudy nosné vlny velká a naopak. Tento jev nazýváme hloubkou modulace – přenáší informaci o hlasitosti. Procentem modulace rozumíme hodnotu, o kolik se v kmitně nebo uzlu změní velikost amplitudy nosné vlny. Největší hlasitosti odpovídá hloubka modulace 100 % - tím ale zaniká nosná vlna. Při překročení hloubky modulace přes 100 % začíná docházet ke zkreslení. Proto se v praxi užívá hloubky modulace okolo 80 %. Přenos větší šířky pásma je spojen s různými technickými potížemi. Proto bylo dohodami stanoveno, že amplitudově modulovaný rozhlas bude přenášet nejvyšší kmitočty 4,5 kHz – to znamená, že okolo každého nosného kmitočtu bude vyhrazeno pro přenos postranních kmitočtů pásmo  $\pm 4,5$  kHz. Celková šířka rozhlasového kanálu pro přenos amplitudově modulovaných signálů bude tedy 9 kHz, jak je vidět na následujícím obrázku.



**Obr. 14: Normalizované kmitočtové spektrum tří sousedních AM kanálů**

Uvedené kmitočtové pásmo rozhlasu AM zaručuje dobrou srozumitelnost mluveného slova, avšak pro kvalitní poslech hudby je zcela nevyhovující. Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že jednotlivé vysílače musí být od sebe kmitočtově vzdáleny nejméně právě o zmíněných 9 kHz a navíc musí být rozděleny tak, aby vedle sebe nebyly umístěny vysílače výkonově silné. Jinak by mohlo docházet k vzájemnému rušení.

#### 2.2.2.2 Frekvenční modulace FM

Při frekvenční modulaci nedochází k ovlivňování amplitudy nosné vlny, ale dochází ke změnám frekvence. Znamená to, že frekvence nosné vlny není stabilní jako u AM, ale v menších nebo i ve větších mezích se mění. V praxi to znamená, že modulační signál frekvenci nosné částečně mění - zvyšuje ji a snižuje. Tomu odpovídá změna kmitočtu nosné vlny. Kladná půlvlna nízkofrekvenčního signálu způsobuje zvyšování frekvence, při záporné půlvlně se frekvence snižuje. Rychlost změn závisí na modulačním kmitočtu. Bude-li mít modulační signál sinusového průběhu frekvenci např. 1 kHz, pak se frekvence nosné bude pravidelně zvyšovat a snižovat tisíckrát za sekundu. Při vyšším modulačním kmitočtu bude změna frekvence nosné rychlejší a při nižším kmitočtu pomalejší. Mezi největší výhody FM oproti AM patří podstatně menší rušení příjmu, protože signál před demodulací prochází omezovačem a ten tyto poruchy odstraňuje. Také vzájemné rušení sousedních stanic je menší než u amplitudové modulace. Pracují-li dvě AM stanice na velmi blízkých kmitočtech, pak dochází k rušení. U FM modulací se při příjmu dvou signálů se stejným nebo blízkým kmitočtem automaticky zdůrazňuje silnější signál a naopak výrazně se potlačuje slabší rušivý signál. S FM modulací je však na druhou stranu spjata komplikovanější technické řešení na přijímací straně a především požadavek na mnohem větší šíři pásma vysílané vlny.

#### 2.2.3 Optická vedení pro přenos analogového signálu

Optická vedení se při přenosu analogového signálu moc neuplatňují, avšak existují určité situace, kdy je vhodné optické vlákno použít i pro přenos analogového signálu. Obecně platí, že optické vedení se používá všude tam, kde je potřeba spolehlivě a bez velkého útlumu přenášet signál



na velké vzdálenosti. Ze všech typů vedení má totiž optické vlákno nejmenší měrný útlum a největší odolnost proti rušení. Optické vedení můžeme pro přenos analogového signálu využít například v případech, kdy potřebujeme přenášet signál ze silně zarušeného prostředí nebo když chceme signál izolovat od zdrojů vysokého napětí. Optické vedení se hodí i tam, kde chceme mít jistotu, že nemohou vzniknout proudové zemní smyčky. Podrobněji se budu optickému vedení věnovat v části pojednávající o digitálním signálu (viz 3.3.3), protože jak jsem již uvedl, využití optiky u analogového provozu není v dnešní době nijak zvlášť rozšířeno.

### 3. DIGITÁLNÍ SIGNÁL

Každý přenos signálu můžeme prakticky v reálném světě považovat za analogový. Vždy totiž dochází k přenosu nějaké analogové složky. Ať už je to magnetické vlnění, elektrický proud nebo napětí, vždy se jedná o analogovou veličinu a zajímáme se o její momentální velikost (velikost proudu, napětí) nebo její časový průběh (frekvence, amplituda, fáze). Co tedy rozhoduje o tom, zda se jedná o analogový či digitální signál?

Zda se jedná o signál analogový nebo digitální rozhoduje to, jak dochází k vyhodnocení přijímaného signálu. Zda se zajímáme o momentální hodnoty signálu (např. hodnota elektrického proudu nebo napětí), pak mluvíme o signálu analogovém. O signál digitální se jedná v případě, kdy vyhodnocujeme příslušnost momentálních analogových hodnot do nějakých intervalů. V případě digitálního signálu se jedná o zařazení momentální hodnoty do dvou intervalů, kdy jeden interval analogových hodnot reprezentujeme logickou hodnotu 0, a do dalšího intervalu spadají hodnoty reprezentující logickou hodnotu 1. V případě elektrického napětí můžeme například uvažovat použití TTL úrovní, kdy logická hodnota 0 je reprezentována úrovní napětí od 0 V do 0,8 V a logická hodnota 1 bude reprezentována příslušností velikosti napětí do intervalu 2 V až 5 V.[4] Jednoduše řečeno, u digitálního přenosu se již nezajímáme o spojitý charakter signálu, ale zajímají nás pouze diskrétní hodnoty tohoto signálu.

#### 3.1 ZMĚNY DIGITÁLNÍHO SIGNÁLU

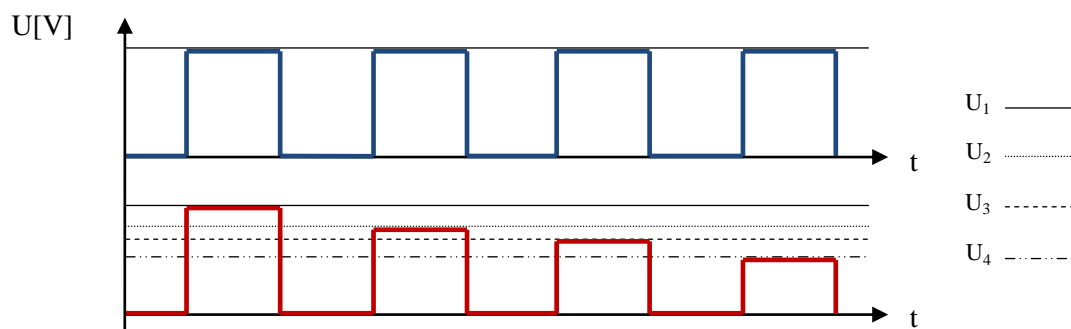
Stejně jako analogový signál, tak i signál digitální je ovlivňován různými vlivy, které signál tlumí nebo mění jeho průběh. Jak bylo řečeno v úvodní části této kapitoly, v případě vyhodnocování digitálního signálu se zajímáme pouze o příslušnost momentálních analogových hodnot do intervalů, které reprezentují buď hodnotu 0, nebo hodnotu 1. Z tohoto způsobu vyhodnocování signálu nám plyne jedna velice významná vlastnost digitálního signálu. Jedná se o jednoduchou reprodukovatelnost. U analogového přenosu můžeme mít sestrojen sebepřesnější obvod pro zpracování signálu, ale vždy zde bude docházet k určité změně signálu neboli zkreslení – minimalizace tohoto zkreslení u analogových obvodů je velice drahá. Z tohoto plyne, že analogový signál nemůže být nikdy zcela dokonalý. U digitálního signálu můžeme při dodržení několika podmínek dosáhnout dokonalé reprodukce. Zde nás totiž nezajímá momentální hodnota signálu, ale právě příslušnost této hodnoty do nějakého intervalu. To znamená, dojde-li při přenosu digitálního signálu k útlumu nebo působení šumu či zkreslení na tento signál, a hodnota napětí nám tímto klesne například z 5 V na 2,2 V, vůbec nám toto nevadí, protože obě hodnoty napětí nám stále spadají do stejného intervalu, neboli stále vyjadřují stejnou logickou hodnotu – v tomto případě logickou 1. Aby

byl přenos signálu dokonalý, stačí nám tedy po určité době tento signál pomocí opakovače obnovit (zesílit).

### 3.1.1 Útlum

Při průchodu digitálního signálu vedením dochází stejně jako v případě analogového signálu k působení útlumu, který digitální signál postupně zeslabuje. Jednotlivým útlumům a úrovním signálů jsem se podrobně věnoval v kapitole pojednávající o analogovém signálu a proto vás odkazuji na kapitolu 2.1.1. Zde jen tedy vše zrekapituluji a uvedu rozdíly.

Nejdříve opět uvedu obrázek průběhu ideálního digitálního signálu a signálu, který je ovlivněn působením útlumu. Na obrázku jsou vyznačeny hladiny jednotlivých úrovní napětí. Je tedy patrné, že zde dochází k útlumu. Platí tedy  $U_1 > U_2 > U_3 > U_4$ . Celkový útlum by se vypočítal podle vzorce č. 8 (viz 2.1.2.1).

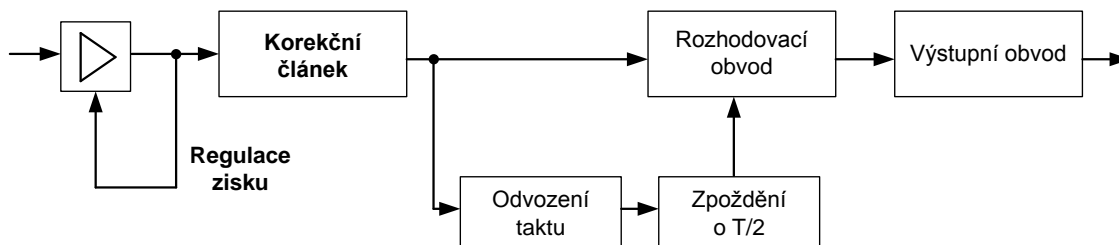


**Obr. 15: Digitální signál ovlivněný útlumem**

Útlum se u digitálního signálu projevuje snížením úrovně přenášeného signálu vlivem vlastního útlumu vedení, kdy s délkou vedení roste jeho hodnota, dále vlivem provozního útlumu, tedy impedančního nepřizpůsobení uzavírajících impedancí přenosové cesty. Další útlum, který digitální signál ovlivňuje je útlum odrazu, při kterém v případě nerovnosti vlnové impedance vedení  $Z_C$  a impedančního zakončení vedení  $Z_2$  (viz obr. 8) dochází ve vedení k šíření i vlny zpětné (odražené). I s přenosem digitálního signálu jsou spjaty fyzikální vlivy jako je povrchový jev a jev blízkosti (viz 2.1.1.2). V podstatě se dá říci, že digitální signál je postihován útlumem úplně stejně jako signál analogový. Jediný hlavní rozdíl je v možnosti regenerace digitálního signálu. V případě analogového signálu používáme pro zesílení signálu zesilovače. V případě signálu digitálního pro regeneraci signálu využíváme zařízení, která se nazývají opakovače a rozdělují nám přenosový řetězec na několik opakovacích úseků. Ve zbytku této části se proto budu věnovat právě opakovačům.

### 3.1.1.1 Opakovače

V důsledku útlumu vedení dochází k postupnému poklesu úrovně a k degeneraci přenášeného signálu. Proto je třeba po určité délce vedení signál regenerovat v opakovačích. Úkolem opakovače je došlý signál obnovit tak, aby bylo zajištěno bezchybné rozhodování, obnovit časovou polohu prvků a vytvořit nové signálové prvky s potřebnou velikostí a tvarem.



**Obr. 16: Princip opakovače digitálního signálu [4]**

Základní princip opakovače digitálního signálu pro metalické traktory a pro jeden směr přenosu ukazuje obr. 16. Na vstup opakovače je přiveden signál s nízkou úrovní poškozený zkreslením, útlumem a šumem. Díky samočinné regulaci zisku zesilovač udržuje signál na stabilní úrovni. Korekční článek v obvodu eliminuje část šumu a částečně správně tvar signálu. Pomocí rezonančního obvodu, který je naladěn na taktonosnou složku signálu nebo pomocí obvodu fázového závěsu je odvozen taktovací signál. Z obnoveného taktu se odvozují úzké impulzy v poloze odpovídající předpokládanému středu impulzu, čímž dochází k definici okamžiků, v nichž se rozhoduje, jak bude vypadat obnovený signál. V rozhodovacím okamžiku dochází k odečtení okamžité hodnoty příchozího signálu. Podle okamžité hodnoty signálu a použitého linkového kódu (viz 3.2) dojde k přiřazení hodnoty, reprezentující buď logickou 0 nebo 1.

### 3.1.2 Zkreslení

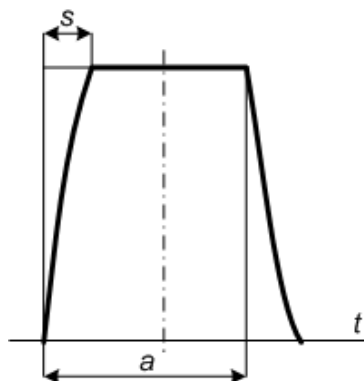
Jak již bylo řečeno, digitální signál může nabývat pouze dvou hodnot – logické hodnoty 1 a logické hodnoty 0. Z tohoto plyne větší odolnost proti zkreslení či jakémukoliv jinému rušení, než v případě analogového signálu. Jednoduše řečeno, přijímač na svém vstupu může očekávat pouze jednu z těchto hodnot, tedy, buď logickou 1, nebo logickou 0. Když je tvar impulzu po cestě přenosovým vedením lehce zkreslen, může být jeho tvar snadno opraven pomocí opakovače (viz 3.1.1.1). V této části se budu věnovat zkreslení tvaru impulzů, kvantizačnímu zkreslení, které je spojeno s digitalizací analogového signálu a fázovému chvění, které způsobuje ztrátu synchronizace. Zmíním se i o útlumovém zkreslení a disperzi, která je spojena s přenosem digitálního signálu optickým vláknem.

### 3.1.2.1 Zkreslení tvaru impulzů

Při průchodu elektrického proudu vedením dochází v okolí vedení k vytvoření magnetického pole. Vysílač a přijímač signálu má též určitou indukčnost. Vedení má také určitou kapacitu, stejně jako jednotlivá vedení mezi sebou (viz obr. 1).

Působením indukčnosti a hlavně kapacity nedochází při uzavření proudového okruhu k okamžitému zvednutí proudu na plnou velikost, ale trvá to určitou dobu. To samé platí i při přerušení proudového okruhu – opět nedojde k okamžitému snížení proudu na nulovou hodnotu, ale děje se tak po určitou dobu (velice krátkou). Následkem těchto jevů dochází ke zkreslení tvarů jednotlivých impulzů, které nám přenáší digitální informaci a ovlivňuje se tím správný příjem. Přesáhne-li toto zkreslení určitou mez, pak dochází k tomu, že přijímač může impulz přenášející logickou hodnotu 0 zachytit jako logickou hodnotu 1 a naopak. Ve výsledku pak dochází ke špatné interpretaci digitální informace.

Velikost zkreslení je udávána v procentech a je definována jako poměr deformace ke správné značce. Na následujícím obrázku můžeme vidět deformovaný impulz. [6]



**Obr. 17: Deformovaný impulz**

Označíme-li si  $s$  jako míru posunutí počátku přijaté značky k ideální značce,  $a$  jako délku ideálního impulzu, pak bude zkreslení  $\delta$  dáno následujícím poměrem [6]:

$$\delta = \frac{s}{a} \cdot 100 \quad (20)$$

Je-li např.  $s = 5 \mu s$ ,  $a = 20 \mu s$ , potom bude zkreslení vypočteno následujícím způsobem:

$$\delta = \frac{5}{20} \cdot 100 = 25\% \quad (21)$$

Jak velké zkreslení impulzů můžeme připustit, závisí na citlivosti použitého vysílače a přijímače.

V praxi mohou nastat následující situace zkreslení: [6]

1. Rovnoměrné zpoždění nebo předbíhání impulzů. V tomto případě nedochází ke zkreslení značky.
2. Impulzy nesoucí logickou hodnotu 1 jsou kratší a impulzy nesoucí logickou hodnotu 0 jsou delší, nebo naopak. Tyto jevy se pravidelně opakují – jedná se o tzv. jednostranné zkreslení.
3. Velikost impulzu se pravidelně mění v určitém rozmezí a má určitý pravidelný charakter, který závisí na vlastnostech vedení. Toto se zkreslení se označuje jako charakteristické.
4. Impulzy nesoucí logickou hodnotu 1 se mění nepravidelně a to bez určité zákonitosti. Tento druh se nazývá nepravidelné zkreslení.

### 3.1.2.2 Kvantizační zkreslení

Při digitalizaci analogového signálu dochází mj. k procesu kvantování. S tímto procesem je spojen problém s kvantizačním zkreslením. Procesem kvantování přiřazujeme nekonečnému počtu úrovní analogového signálu konečný počet, a tím pádem dochází ke vzniku rozdílu mezi skutečnou a kvantovanou hodnotou. Kvantizační zkreslení je rušivá složka u digitálních modulací. Následujícím vzorcem je definován odstup od kvantizačního zkreslení  $A_{S/Q}$  [4]:

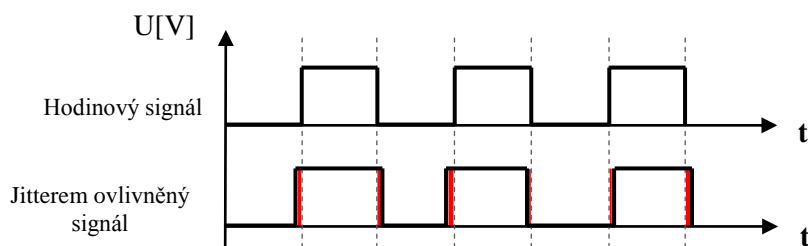
$$A_{S/Q} = 10 \log \left| \frac{P_S}{P_Q} \right| \quad (22)$$

kde  $P_S$  je střední výkon kódovaného signálu a  $P_Q$  je střední výkon kvantizačního šumu. Odstup od kvantizačního šumu  $A_{S/Q}$  můžeme ovlivnit volbou buď lineárního, nebo nelineárního kvantování (logaritmická funkce).

### 3.1.2.3 Fázové chvění

Fázové chvění si můžeme rozdělit na jitter a wander. Jsou to změny polohy signálových prvků u digitálního signálu. Projevují se jako chvění fáze. Jitter si můžeme přirovnat k následující situaci. Představme si vlakovou stanici, do které přijíždějí vlaky podle jízdního řádu. To je ovšem ideální představa. Všichni dobře víme, že v reálném světě dochází k určitému zpoždění jednotlivých vlaků. Jeden vlak může mít zpoždění jednu minutu, druhý třeba pět minut. Tyto odchylky mezi plánovaným a skutečným příjezdem vlaku můžeme chápat jako jitter. Toto platí i při zpracování digitálního signálu, ovšem v tomto případě neměříme odchylky v minutách, nýbrž v jednotkách řádově nižších (pikosekundy).

Jitter způsobuje zkreslení signálu, a proto zařízení zpracovávající signál musí mít schopnost tento jev eliminovat a nezvětšovat dále jeho hodnotu. Toto se většinou provádí pomocí vyrovnávací paměti (buffer).



**Obr. 18: Jitter**

Wander je nízkofrekvenční jitter vznikající postupnou akumulací jitterů jednotlivých zařízení v přenosové cestě. Kdybychom toto chtěli přirovnat k naší modelové situaci, tak by se to dalo vysvětlit následovně. Vlak vyjede ze startovní stanice. Po příjezdu do další stanice může mít malé zpoždění (pár minut). Jak vlak pokračuje postupně do dalších stanic, tak se zpoždění postupně zvětšuje a tím můžeme v konečné stanici nashromáždit zpoždění o velikosti např. 50 min. Toto je analogie k tomu, co se děje v reálných zařízeních zpracovávající digitální signál.

Fázové chvění tedy dělíme na [12]:

1. **Wander** - pomalé chvění:  $f < 10$  Hz
2. **Jitter** – rychlé chvění:  $f \geq 10$  Hz

Fázové chvění je způsobováno hlavně kmitočtovou nestabilitou časových základů opakovačů a multiplexních zařízení, dále může být způsobováno rušivými procesy působícími na přenosový trakt.

Mezi hlavní důsledky fázového chvění patří následující:

- Zvýšená chybovost
- Skluzu
- Ztráta synchronizace
- Zvýšený celkový šum přenosového kanálu

#### 3.1.2.4 Útlumové zkreslení

Stejně jako u analogového signálu, tak i u digitálního signálu definujeme útlumovým zkreslením rozdílné provozní útlumy pro různé kmitočty. Jediným rozdílem oproti analogovému signálu je volba jiné referenční hodnoty  $A(f_R)$ , která je v případě digitálního systému rovna 1020 Hz.[9] Útlumové zkreslení  $\Delta A$  vypočítáme pomocí následujícího vztahu [9]:

$$\Delta A_f = A(f) - A(f_R) \quad (23)$$

kde  $A(f)$  je hodnota na příslušném kmitočtu a  $A(f_R)$  je výše zmiňovaný referenční kmitočet. Aby digitální systém vyhovoval standardu, tak musí vynesena závislost na vztažném kmitočtu procházet nulou a musí se vejít do toleranční masky (viz obr. 13).

V praxi se s útlumovým zkreslením vyskytuje i zkreslení skupinovým zpožděním, které je způsobováno různými rychlostmi šíření signálu různých kmitočtů. Obě tato zkreslení způsobují změnu tvaru digitálního signálu, a proto musíme obě tyto zkreslení korigovat pomocí útlumových a fázových korektorů.

### 3.1.2.5 Disperze

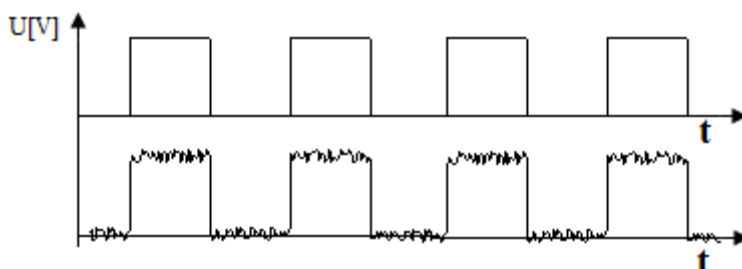
Disperze je druh zkreslení, které je spojeno s optickými přenosovými systémy (optickými vlákny). Vlivem disperze dochází ke zpoždění impulsů a změně jejich tvaru. Disperze bývá způsobena různým lomem světla v daném přenosovém prostředí. Disperzi v optických vláknech můžeme dále dělit [7]:

- materiálová disperze
- vidová disperze
- chromatická disperze

Vidová disperze je způsobena lomem světla, kdy při každém lomu dochází k nepatrné odchylce dráhy jednotlivých vlnových délek. Chromatická disperze je způsobena rozdílným indexem lomu dané látky pro různé vlnové.

### 3.1.3 Šum

Šum je další nežádoucí vliv, který ovlivňuje průběh digitálního signálu a narušuje tím integritu přenášené informace. Na následujícím obrázku je vidět, jak vypadá nerušený digitální signál a jak vypadá tento signál po vystavení působení šumu.



Obr. 19: Digitální signál ovlivněný šumem

Stejně jako u analogového signálu, můžeme i zde u signálu digitálního rozdělit šum do dvou kategorií. Do první kategorie patří vnitřní šum, který je spjat s fyzikálními vlastnostmi přenosového média (např. tepelný šum kabelu). Do druhé kategorie řadíme vnější šum, který vzniká při působení



vnějších fyzikálních vlivů (např. elektromagnetické pole). Z povahy digitálního signálu opět plyne fakt, že tento signál není, ve srovnání se signálem analogovým, šumem tolik poškozován, protože opět přijímač vyhodnocuje pouze dvě možné hodnoty signálu. Stačí signál po určité době regenerovat pomocí opakovače, který dokáže do určité míry obnovit i tvar signálu. Avšak v případě, že hladina šumu přesáhne přes rozhodovací úroveň, pak dochází k chybnému vyhodnocení symbolu a vzniku chyby a to způsobuje zvýšení bitové chybovosti BER (viz 3.1.5). Hladinu šumu, který na signál působí, vyjadřujeme odstupem signálu od šumu SNR, kterému jsem se podrobněji věnoval v kapitole pojednávající o analogovém signálu (viz 2.1.3). Jednoduše řečeno, čím je SNR vyšší, tím máme signál čistější a nedochází k nárůstu bitové chybovosti BER.

Vlivu působení šumu se můžeme do jisté míry vyvarovat volbou vhodného vedení a jejím stíněním a zemněním.

### 3.1.4 Přeslech

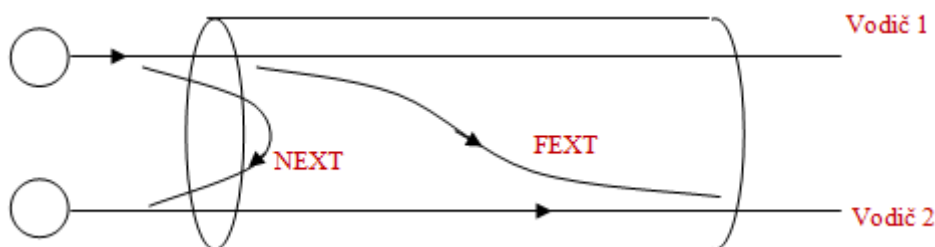
Pro přenos digitálního signálu jsou často využívány metalické symetrické kabely. To znamená, že zde často dochází k rušení z důvodu přeslechu mezi jednotlivými vodiči v kabelu. V případě vhodně navrženého přenosového systému je vliv přeslechu relativně malý. Nejčastěji se počítá s přeslechem na blízkém konci vedení (NEXT), který vzniká přenosem signálů z vysílače na ostatní páry ve stejném vícepárovém kabelu na vstup přijímače na stejném konci. [14] Následuje vzorec, podle kterého můžeme vypočítat hodnotu přeslechu NEXT:

$$A_{NEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \right) \quad (24)$$

Dalším typem přeslechu je přeslech na vzdáleném konci (FEXT), který se projevuje tím, že signály z vysílače v jiných párech ve stejném kabelu pronikají do vstupu přijímače na opačném konci vedení.

$$A_{FEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \right) \quad (25)$$

Vše znázorňuje následující obrázek [14].



**Obr. 20: Přeslechy NEXT a FEXT**

### 3.1.5 Bitová chybovost

Bitová chybovost BER je klíčový parametr v digitálních přenosových systémech. Mezi systémy, ve kterých má smysl počítat s bitovou chybovostí, můžeme zařadit rádiové datové spoje stejně tak jako optické datové spoje, Ethernetové sítě nebo jakékoliv jiné přenosové systémy, které jednoduše přenášejí digitální informaci z bodu A do bodu B a mohou být ovlivňovány útlumem, zkreslením a šumem, který způsobuje deformaci signálu. Přestože mezi těmito systémy, existují rozdíly, bitová chybovost se u nich dá vyjádřit stejným způsobem.

Při přenosu dat přenosovým systémem tedy dochází k narušení integrity přenášených dat. Proto je důležité nějakým vhodným způsobem ohodnotit výkon a chybovost přenosového systému. Bitová chybovost nám poskytuje ideální způsob, jak toto ohodnocení provést. Bitová chybovost BER je definována jako poměr chybně přijatých bitů  $n_E$  k celkovému počtu přijatých bitů  $n_T$ , vyslaných přenosovým systémem. Toto může být vyjádřeno jednoduchým vzorcem [12]:

$$BER = \frac{n_E}{n_T} \quad (26)$$

Jestliže se mezi vysílačem a přijímačem nachází vhodné přenosové médium a odstup signálu od šumu je dostatečně vysoký, pak bitová chybovost bude mít velmi nízkou hodnotu a bude možné ji zanedbat, protože pro celkový výkon přenosového systému nebude představovat velké ztráty. Avšak v případě, kdy v přenosovém systému dochází k většímu působení šumu, pak by se hodnota bitové chybovosti určitě neměla podceňovat. BER se obvykle pohybuje mezi hodnotou  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  [12].

Na chybovost přenosu má vliv mnoho faktorů, které zvyšují hodnotu BER. Mezi tyto faktory můžeme jmenovat následující vlivy:

1. Délka spoje
2. Členitost terénu
3. Provozní kmitočtové pásmo
4. Hydrometeorologické vlivy

Délka spoje hraje největší roli u metalického vedení, protože s jeho délkou roste útlum samotného vodiče daleko rychleji než např. u optického vedení. Členitost terénu nejvíce omezuje rádiové vedení a to z důvodu možných překážek mezi vysílačem a přijímačem, dalším problémem je vícestenné šíření. Provozní kmitočtové pásmo je opět problémem rádiového přenosu, kdy může při nesplnění nařízení ČTÚ docházet k interferenci mezi různými rádiovými spoji. Hydrometeorologické vlivy mohou ovlivňovat jak nadzemní metalické vedení, tak mohou neblaze působit i na rádiový

přenos. U metalického vedení se toto může projevat jako zkrat a u rádiového vedení se toto projevuje jako zvýšený útlum prostředí.

Z fyzikálních vlastností jakéhokoliv digitálního přenosového systému plyne, že nelze nikdy zaručit stoprocentní bezchybnost přenosu. Vždy se budeme potýkat s určitou chybovostí a v našich silách je pouze tuto hodnotu chybovosti udržovat v nějakém bezpečném intervalu pro daný přenosový systém a jeho aplikaci. Např. u optických přenosových systémů dochází ke zvýšení bitové chybovosti v důsledku nepřesností spojených se zařízeními zapojenými v přenosovém systému, jako jsou vysílače, konektory a vlákno samotné. U optických systémů se jedná také o optickou disperzi. Samozřejmě u optických přijímačů může zapůsobit i šum. Dalším faktorem přispívajícím ke zvýšení bitové chybovosti je fázový posun, který může být v přenosovém systému přítomen a může negativně ovlivnit vzorkování dat.

### 3.1.5.1 Vyhodnocování bitové chybovosti

Hlavním činitelem pro určení kvality přenosu v digitálním komunikačním systému je chybovost na fyzické vrstvě. Bitovou chybovost můžeme měřit způsobem bit po bitu. Měření probíhá tak, že přenosový trakt nejprve odpojíme z provozu a na jeho vstup začneme vysílat pseudonáhodnou posloupnost bitů. Na výstupu přenosového traktu potom porovnáme přijatý signál s vysílanou posloupností bitů. Neshody mezi těmito bity (špatně přijaté) počítáme.

V následující tabulce [12] uvádím, jak dlouhé testovací pseudonáhodné posloupnosti bitů se využívají u systémů s různou přenosovou rychlostí. Dále v tabulce uvádím, jaká je doporučená tolerance přenosové rychlosti.

Bitová chybovost [kbit/s]	Tolerance bitové chybovosti	Délka testovací posloupnosti bitů
1 544	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	$2^{15} - 1, 2^{20} - 1$
2 048	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	$2^{15} - 1$
6 312	$\pm 30 \cdot 10^{-6}$	$2^{15} - 1, 2^{20} - 1$
8 448	$\pm 30 \cdot 10^{-6}$	$2^{15} - 1$
32 064	$\pm 10 \cdot 10^{-6}$	$2^{15} - 1, 2^{20} - 1$
34 368	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$	$2^{23} - 1$
44 736	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$	$2^{15} - 1, 2^{20} - 1$
139 264	$\pm 25 \cdot 10^{-6}$	$2^{23} - 1$

**Tab. 1: Vztah mezi bitovou rychlostí a délkou testovací posloupnosti**

U dálkových metalických traktů se předpokládá chybovost pod  $10^{-6}$ . U traktů optických by chybovost neměla překročit hodnotu  $10^{-10}$ . V případě překročení určité meze chybovosti většinou dochází k podání poplachového hlášení a může následovat výběr alternativní přenosové cesty. V další tabulce uvádím hraniční hodnoty BER s jejich subjektivním hodnocením [12]:

Hraniční hodnota BER	$10^{-10}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	výtečná	akceptovatelná	zhoršená	neakceptovatelná

**Tab. 2: Hraniční hodnoty BER**

Prosté číselné vyjádření bitové chybovosti nám ale nestačí. Důležité je postihnout rozložení chyb v toku bitů (histogram). Rozložení chyb v toku bitů můžeme rozdělit do následujících skupin [12]:

- chyby se vyskytují jednotlivě a náhodně rozložené
- chyby se vyskytují ve shlucích, které jsou náhodně rozložené
- chyby se vyskytují ve shlucích v přímé souvislosti s vnějším rušením

### 3.1.5.2 Doporučení ITU-T pro vyhodnocování chybovosti

K vyhodnocování chybovosti bylo nejdříve využíváno doporučení G.821, které definovalo bitovou chybovost mezinárodních spojení ISDN s přenosovou rychlostí 64 kbit/s. Podle tohoto doporučení můžeme při vyhodnocení celkovou dobu měření rozdělit na vzájemně se doplňující intervaly:

- **použitelné** - začíná souvislými 10 s  $BER \leq 10^{-3}$
- **nepoužitelné** - začíná souvislými 10 s  $BER > 10^{-3}$

Tento vztah lze vyjádřit následující rovnicí:

$$S_{po} = S_C - S_N \quad (27)$$

Doporučení zavádí následující pojmy pro hodnocení bitové chybovosti:

- **Chybná sekunda** (Errored Second) - časový úsek jedné sekundy, ve kterém nastala alespoň jedna chyba. Doplněk k ES je FES.
- **Silně rušená sekunda** (Severely Errored Second) - interval délky jedné sekundy, během které chybovost překročila hodnotu  $10^{-3}$  (64 chyb/s).

Měřením výše uvedených chybových jednotek získáme absolutní hodnoty těchto veličin. Praktičtější je ovšem používat hodnoty relativní, které definuje doporučení G.826. Výsledky měření se podle tohoto doporučení vyjadřují v procentech a porovnávají se s limity, stanovenými pro hypotetický okruh délky 27500 km.

Dodatek D k doporučení G. 821 dále specifikoval proporcionální převod naměřeného počtu chyb na vyšší přenosové rychlosti na kanál 64 kbit/s. Například, když bylo měření prováděno na systému s přenosovou rychlostí 2 048 kbit/s, byl výsledek následně vydělen 32 a tím se získal počet chyb pro přenosovou rychlost 64 kbit/s. [12] Avšak chybné bity mohou být spolehlivě rozpoznány

pouze v případě, kdy přesně známe monitorovanou bitovou sekvenci. A proto měření systému za provozu je velice komplikované.

Pro vysokorychlostní systémy nebylo však doporučení G.821 optimální, a proto začaly vznikat nová doporučení, která by těmto systémům vyhovovala. Toto dalo vzniknout novějšímu doporučení G.826. Toto doporučení pro vyhodnocování chybovosti muselo splňovat nově vzniklé požadavky vysokorychlostních systémů. Mezi nejdůležitější z nich patří následující [12]:

- Vhodnost pro přenosové rychlosti vyšší než 1,5 Mbit/s bez nutnosti normalizace naměřeného výsledku (viz. kapitola 3.3.2).
- Měření parametrů chybovosti za provozu (dříve nutno odpojit měřený úsek z provozu).
- Nezávislost na přenosovém médiu a na přenosovém systému (podpora systému SDH, PDH, ATM).
- Náročnější kritéria na posuzování chybovosti z důvodu pokroku ve vývoji přenosových systémů.

Od začátku návrhu doporučení G.826 bylo cílem umožnit vyhodnocovat chybovost za provozu systému tak, aby bylo možné využít monitorovacích zařízení přenosových systémů. Toto si vyžádalo přechod od klasického měření bitové chybovosti podle staršího doporučení G.821 k měření blokové chybovosti, které zavádí doporučení G.826.

Tato metoda využívá vestavěných monitorovacích zařízení současných přenosových systémů. Používá se technika CRC a technika monitorování bitové parity. Podle doporučení G.826 musí být chyby detekovány minimálně s 90% pravděpodobností. Tento požadavek splňují např. metody CRC-4 a BIP-8. [12]

Měření blokové chybovosti definuje pojem blok. Blok je skupina po sobě jdoucích bitů, kdy každý bit spadá právě do jednoho bloku. Dále tato definice říká, že blok bitů nemusí být časově nepřerušovaný. Pro doplnění uvádím vzorec pro výpočet pravděpodobnosti  $p$  výskytu chybného bloku [4]:

$$p = 1 - (1 - BER)^{(vb+vh).k} \quad (28)$$

kde  $BER$  je bitová chybovost (vzorec výše),  $vb$  je počet bytů užitečné informace v bloku,  $vh$  je počet bytů hlavičky a  $k$  je počet bitů v bytu.

Doporučení dále zavádí nové chybové události:

- **Chybový blok** (Errored Block) – blok, ve kterém je jeden nebo více bitů chybných.
- **Chybová sekunda** (Errored Second) – časový interval jedné vteřiny, která obsahuje jeden nebo více chybných bloků.

- **Silně chybová sekunda** (Severely Errored Second) – časový interval jedné vteřiny, která obsahuje aspoň 30% chybných bloků.
- **Bloková chyba na pozadí** (Background Block Error) – chybový blok, který nepatří do silně chybové sekundy (SES).
- **Silně chybový interval** (Severely Errored Period) – časový interval, ve kterém se nachází nejméně tři a zároveň ne více než devět za sebou následujících silně chybových sekund (SES).

Následují chybové parametry odvozené od výše uvedených chybových událostí:

- **Poměr chybových sekund** (Errored Second Ratio) – poměr k celkovému počtu sekund v průběhu pevného intervalu měření.
- **Poměr silně chybových sekund** (Severely Errored Second Ratio) – poměr k celkovému počtu sekund v průběhu pevného intervalu měření.
- **Poměr blokových chyb v pozadí** (Background Block Error Ratio) – poměr k celkovému počtu bloků ve využitelném času v průběhu pevného intervalu měření.
- **Poměr událostí SEP k celkovému využitelnému času** (Severely Errored Period Intensity)

Doporučení G.826 specifikuje vyhodnocení měření, které se vztahuje k hypotetické referenční cestě (Hypothetical Reference Path) o délce 27 500 km.

### 3.1.5.3 Další doporučení

V následujícím výčtu uvádím další používaná doporučení pro měření chybovosti a jejich stručnou charakteristiku:

- **G.828** – upravené doporučení G.826, které klade přísnější cílové hodnoty pro SDH. Definiuje další chybové parametry a události.
- **G.829** – definuje chybové události pro SDH systémy pro sledování o délce jednoho měsíce.
- **I.356** – definuje kritéria přenosu ATM buněk.
- **M.2100** – definuje limity pro uvedení do provozu a údržbu mezinárodních cest a přenosových systémů PDH.

### 3.1.6 Zabezpečení digitálního přenosu

V následující části se budu věnovat základním mechanismům používaných pro detekci a případnou opravu chyb při přenosu digitálních dat. Popíši pár zástupců z obou kategorií a to jak mechanismy pro detekci chyb tak i mechanismy pro opravu chyb.

### 3.1.6.1 Algoritmy detekce chyb

Abychom byli schopni zajistit bezchybný přenos dat, potřebujeme nějaký mechanismus, který nám dokáže odhalit případné chyby při přenosu. Pro tento účel nám slouží speciální algoritmy, které tento problém dokážou vyřešit. Mezi nejpoužívanější patří zabezpečení dat pomocí parity, kontrolního součtu či cyklických kódů.

#### ▪ Parita

Zabezpečení pomocí parity patří mezi nejjednodušší a současně nejméně účinné způsoby zabezpečení zpráv, které umožňují pouze detekci výskytu chyby. Funguje na principu doplnění datových bitů jedním dalším bitem tak, aby celkový počet jedniček ve zprávě byl při odesílání lichý (lichá parita) nebo sudý (sudá parita). Paritní bit lze zasílat například za každým znakem. Odesílatel a příjemce zprávy musí být dopředu domluven, s jakou paritou jsou zprávy odesílány. Jestliže počet přijatých jedničkových bitů nesouhlasí s očekávanou paritou, došlo jistě při přenosu k chybě alespoň jednoho bitu (obecně lichého počtu bitů). Naopak má-li přijatý znak očekávanou paritu, nezaručuje to bezchybnost zprávy, protože nelze odhalit chybu v sudém počtu bitů použitím jednoho paritního bitu. Parita se dělí kromě na lichou a sudou také na paritu podélnou a příčnou. To nám určuje, zda se paritní bit počítá ze sloupců bloku či z řádků bloku. [15]

#### ▪ Kontrolní součet

Dalším jednoduchým detekčním mechanismem na bloku dat je použití kontrolního součtu. Podstatou kontrolního součtu je součet všech znaků zprávy v binární reprezentaci v aritmetice modulo  $2^8$  nebo  $2^{16}$ . To znamená, že výsledkem kontrolního součtu je výsledek o délce buď jednoho, nebo dvou bajtů.

H	e	l	l	o		w	o	r	l	d	.
48	65	6C	6C	6F	20	77	6F	72	6C	64	2E

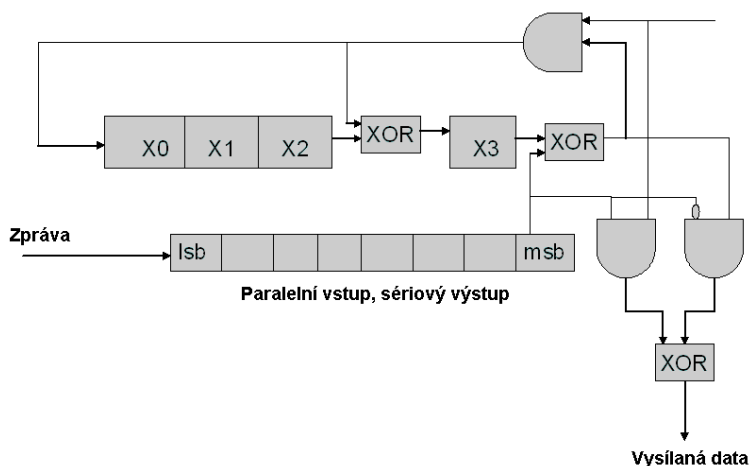
$$4865 + 6C6C + 6F20 + 776F + 726C + 642E + \text{carry} = 71FC$$

Obr. 21: Kontrolní součet

#### ▪ CRC

Velice účinnou formou pro zabezpečení bloku dat je použití tzv. cyklických kódů – CRC. Stejně jako u výpočtu parity či kontrolního součtu, tak i u CRC se průběžně vypočítává zabezpečovací údaj na základě bitů jednotlivých znaků bloku. Tento údaj se na konci celého bloku dat porovná se zabezpečovacím údajem, který podle stejných pravidel vypočítal odesílatel a přidal k odesílanému bloku dat. Když se oba údaje shodují, dá se s vysokou pravděpodobností považovat tento blok za správně přenesený. Pomocí 16bitového CRC můžeme spolehlivě odhalit všechny chyby až v šestnácti za sebou následujících bitech.

Pro realizaci cyklického kódu nám stačí jednoduchý posuvný registr, který umí provést logickou operaci exkluzivní disjunkce (XOR) s pevně určenou maskou. Hodnota této masky bývá jednoznačně určena tzv. generujícím polynomem, na kterém však musí být jak odesílatel, tak i příjemce dohodnuti. V oblasti datové komunikace se nejčastěji používá polynom  $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$  (je doporučen organizací ITU-T). [15]



Obr. 22: Schéma realizace CRC

### 3.1.6.2 Samoopravné kódy

Samoopravné algoritmy jsou na rozdíl od algoritmů detekčních mnohem chytřejší. Mají schopnost chyby odhalit a do jisté míry je dokážou i opravit. Obecně se dá říci, že tyto algoritmy k užitečným informacím přidávají dodatečné informace, podle kterých se dá případně chyba opravit. Tyto algoritmy najdou využití zejména a v oblasti satelitních spojů, kde máme k dispozici dostatečně široké přenosové pásmo a naopak poměrně vysokou latenci. Pro přenos je v tomto případě totiž výhodnější odeslat více dat, než při chybném příjmu žádat o znovu přeposlání celého bloku zprávy (z důvodu latence). Zde jsem jako vhodného zástupce vybral Hammingův kód.

- **Hammingův kód**

Tento kód přidává ke každému osmibitovému slovu dalších pět kontrolních bitů. Vzhledem k tomu, že data se téměř vždy přenášejí po větších blocích, tak při praktickém použití bezpečnostních kódů se zabezpečují vždy bloky dat a nezabezpečujeme každé slovo. V případě detekované chyby ve zprávě se totiž stejně bude přenášet znovu celý blok, ve kterém se zpráva nachází.

Nyní blíže rozvedeme jednu z možných strategií bezpečnostního kódování. Nejdříve si však nadefinujeme některé důležité pojmy. Délka kódu  $L$  – je to počet všech různých kódových slov. Tuto délku je nutno odlišit od délky kódového slova. Z předchozího vyplývá vztah mezi délkou kódu a počtem informačních bitů  $L = 2^k$ . Hammingova váha  $w(v)$  kódového slova  $v$  je počet jedniček  $v$  kódovém slovu. Hammingova vzdálenost  $d(v1, v2)$  dvou kódových slov  $v1$  a  $v2$  je počet bitů, v nichž



se kódová slova liší. Minimální vzdálenost kódu  $d_{min}$  je minimální možná vzdálenost všech dvojic značek v kódu.

Nyní se vraťme k tomu, jak tento algoritmus detekce chyb funguje. Nejdříve přijaté slovo porovnáme s množinou kódových slov. Nejistíme-li shodu s žádným kódovým slovem, pak jsme detekovali chybu. Je jasné, že pokud  $d_{min} = 1$ , pak nemůže být zaručena stoprocentní detekce chyby, protože vlivem chyby může dojít k tomu, že kódové slovo přejde v jiné kódové slovo. Pakliže platí  $d_{min} = 2$ , je zaručena stoprocentní detekce všech dvojitých chyb. Přijaté slovo se v důsledku  $n$ -násobné chyby vzdálí od vyslaného kódového slova o vzdálenost rovnou  $n$ . Podmínkou toho, aby chyba mohla být detekovatelná, je to, že vzdálenost přijatého slova od každého kódového slova musí být větší než nula. Obecně je zaručena stoprocentní detekce všech  $n$ -násobných chyb, jestliže platí  $d \geq n + 1$ . [15]

## 3.2 LINKOVÉ KÓDY

V této části bych se chtěl zmínit o používaných linkových kódech, které se používají při přenosu digitálního signálu. Použití vhodného linkového kódu nám umožňuje zefektivnit digitální přenos.

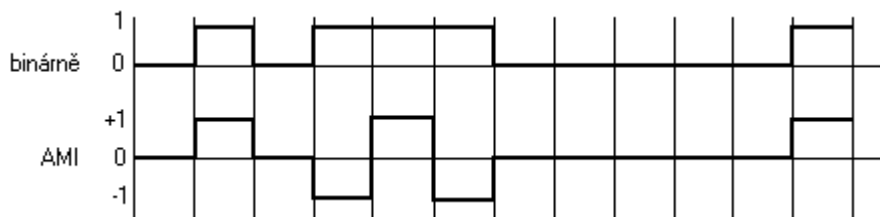
Klasický dvojkový kód není vhodný pro přenos signálu digitálním traktem, z toho důvodu, že obsahuje stejnosměrnou složku, která neprojde přes transformátory. Dále stejnosměrná složka neumožňuje snadné obnovení taktu a má nevhodné frekvenční spektrum. Proto se využívají linkové kódy, které musí umožňovat využití co nejužšího kmitočtového pásma a které mají dostatek časových impulsů, aby umožnili snadné obnovení taktu v opakovacích a přijímačích.

Mezi nejjednodušší linkové kódy patří NRZ, RZ a Manchester, ty ovšem obsahují výše zmíněnou stejnosměrnou složku, která je pro přenos nevhodná, a proto jsou v metalických traktech nepoužitelné. Pro přenos na symetrických kabelech se využívají pseudotrojkové kódy, které mají tři rozhodovací úrovně. Ty jsou vytvořeny na výstupních obvodech v linkových zakončeních.

V následujícím textu se budu věnovat nejpoužívanějším linkovým kódům, které se využívají v metalických a optických traktech.

### 3.2.1 Linkový kód AMI

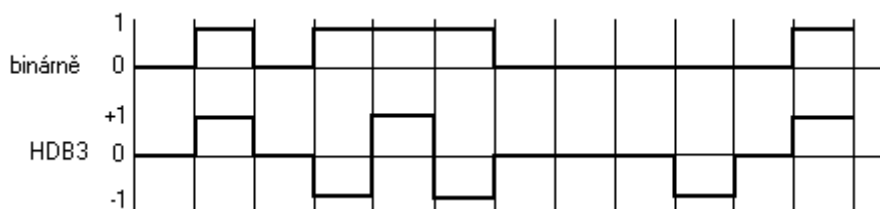
Tento linkový kód definuje tři úrovně, kterých signál může nabývat. Tyto úrovně jsou 0, +1 a -1. Nula se vždy přenáší jako logická 0, kdežto symbol jedna se střídavě kóduje jako +1 a -1, čímž dochází k potlačení stejnosměrné složky signálu. Zároveň tento kód řeší problém posloupnosti jedniček z hlediska taktování. Naopak při výskytu delší posloupnosti nul, dochází ke ztrátě taktu. Tento způsob se dříve používal u PCM 1. řádu. [3]



Obr. 23: AMI kód

### 3.2.2 Linkový kód HDB3

Tento kód odstraňuje nevýhodu delších posloupností nul. Zajišťuje tedy dobré taktování i pro dlouhé posloupnosti nul. Logická hodnota 1 je opět vyjádřena buď symbolem +1 nebo -1. Logická hodnota 0 se přenáší jako nula, pokud ovšem přijde skupina čtyř nul (0000), pak je vyjádřena jako 000V nebo B00V. Za V se dosadí buď +1 nebo -1 podle toho jakou polaritu měla poslední použitá jednička. Následují za sebou tedy dvě jeničky stejné polarity což vede ke ztrátě bipolarity a druhá jednička je na přijímací straně správně vyhodnocena na původní symbol 0. Za B se dosazuje buď +1 nebo -1, vždy ale opačná polarita než předchozí impuls, to slouží k doplnění celkového počtu impulsů mezi posledním V na lichý počet. Skupinu B00V tedy použijeme v případě, že za předchozím V následuje sudý počet impulsů a skupinu 000V, jestliže následuje lichý počet impulsů. Kód HDB3 je využíván v digitálních traktech se symetrickými kabely s provozem PCM 1. řádu, ADM a ale i v zařízeních 2. a 3. řádu.

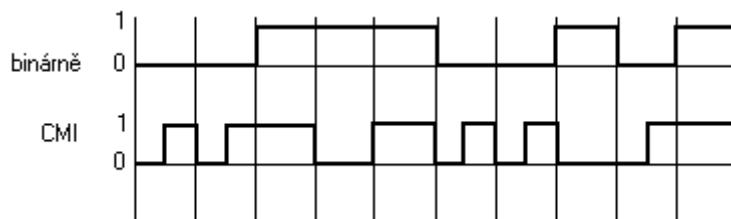


Obr. 24: Kód HDB3

### 3.2.3 Linkový kód MCMI

Světlo neumožňuje vyjádřit kladné a záporné hodnoty signálu tak jako elektrický signál. To vylučuje všechny používané linkové kódy metalického traktu pro využití na traktu optickém, a proto je nutné při optickém přenosu vyjadřovat kladné a záporné prvky unipolárním linkovým signálem.

Linkový kód MCMI je nejpoužívanější pro přenos optickým traktem. Kód ke každému ze tří prvků kódu HDB3 přiřadí dvojici signálových prvků. Prvky linkového signálu MCMI mají poloviční šířku, a přenosová rychlost je tedy dvojnásobná. Detekci chyb u tohoto kódu je možné zajistit redundancí kódu. [3]



Obr. 25: Kód MCM

### 3.3 POUŽÍVANÁ VEDENÍ PRO PŘENOS DIGITÁLNÍHO SIGNÁLU

Pro přenos digitálního signálu používáme různé typy vedení. Každý typ se vyznačuje určitými vlastnostmi, které jsou vhodné pro daný typ přenosu. Z těchto vlastností jsou podle mého názoru nejdůležitější následující dvě. Za prvé to je odolnost vůči rušení. Tato vlastnost nám umožňuje uskutečnit více či méně rušený přenos dat. Další vlastností bude maximální možná přenosová kapacita vedení. Když budeme potřebovat přenášet velké množství dat, bude pro nás jistě vhodnější zvolit jako přenosové médium koaxiální kabel či optické vlákno. Naopak požadujeme-li přenos např. pouze hlasu, bude nám jistě postačovat klasická metalická dvojlinka. Požadujeme-li přenos dat do oblastí, do kterých je z různých důvodů (např. členitost terénu) nemožné dovést metalické či optické vedení, volíme jako přenosové médium rádiový spoj.

#### 3.3.1 Metalická vedení pro přenos digitálního signálu

Metalické vedení je v dnešní době asi nejrozšířenějším přenosovým médiem pro přenos digitálního signálu v přístupových sítích. Právě v těchto sítích se nejčastěji setkáme s klasickou kroucenou dvojlinkou, kterou řadíme mezi symetrickou kabeláž. Kroucení vodičů se provádí z důvodu zlepšení elektrických vlastností kabelu. Tímto dochází k minimalizaci přeslechů (viz 3.1.4) mezi jednotlivými vodiči kabelu, dále se kroucením dosahuje snížení interakce mezi dvojlinkou a jejím okolím, tzn., že je omezeno vyzařování a příjem elektromagnetického zařízení. Jak již bylo řečeno v analogové části, dva souběžně vedené vodiče se chovají jako anténa. Tedy pokud jimi přenášíme střídavý signál, pak do svého okolí vyzařují elektromagnetické vlny. K jak velkému vyzařování dochází, závisí hlavně na frekvenci signálu (tedy na přenosové rychlosti) a na fyzickém provedení souběžných vodičů. Právě tento efekt vyzařování elektromagnetického pole do okolí kabelu lze snížit právě jejím zkroucením. Vyzařování tímto postupem samozřejmě neodstraníme úplně, ale dojde k jeho snížení na takovou míru, která je již přijatelná, jak pro zdraví člověka, tak i pro ostatní přenosové cesty. Rozlišujeme základní dva druhy kroucené dvojlinky. První je tzv. nestíněná kroucená dvojlinka UTP a druhá je stíněná kroucená dvojlinka STP, která je, co se týče elektromagnetického vyzařování, ideálnější řešením.

Dalším rozšířeným metalickým přenosovým vedením pro přenos digitálního signálu je koaxiální kabel. Koaxiální kabel řadíme mezi asymetrickou kabeláž. Tento kabel nám svou konstrukcí

umožňuje z kategorie metalických vedení nejlepší ochranu signálu proti vnějším interferencím. Jak koaxiální kabel vypadá, můžeme vidět na obr. 15. Ve stručnosti připomenu, že se skládá z jednoho válcového vnějšího vodiče a jednoho drátového nebo trubkového vodiče vnitřního. Vnější a vnitřní vodič je oddělen nevodivou vrstvou. Průměry vnitřního a vnějšího vodiče bývají v určitém poměru, čímž se dosahuje požadované charakteristické impedance pro přenos vysokých frekvencí.

Charakteristická impedance je u typických koaxiálních kabelů 50  $\Omega$  nebo 75  $\Omega$  [1]. Koaxiální kabel byl dříve využíván pro přenos dat v sítích Ethernet. Díky vysoké charakteristické impedanci je rychlost šíření signálu v koaxiálním kabelu o dost pomalejší a to byl také důvod, proč se od použití koaxiálního kabelu v Ethernetu postupně upustilo.

### 3.3.2 Rádiová vedení pro přenos digitálního signálu

Nejdůležitějším parametrem rádiového přenosového systému je odstup užitečného signálu od šumu SNR. S klesajícím SNR kvalita přenosu klesá a u digitálních systémů narůstá bitová chybovost BER. Z toho vyplývá, že dochází ke zhoršení propustnosti a vysílač musí poškozené bloky dat vysílat znovu. Mezi základní problémy šíření rádiového signálu patří následující [8]:

1. Vliv počasí a přímá viditelnost
2. Rušení jinými systémy, které se nacházejí ve stejném frekvenčním pásmu (viz nařízení Českého telekomunikačního úřadu)
3. Vícecestné šíření rádiového signálu
4. Útlum prostředí

Dále se budu věnovat každému z výše jmenovaných problémů podrobněji.

#### 3.3.2.1 Vliv počasí a přímá viditelnost

Rádiové systémy, které pracují v pásmech do 10 GHz, jsou schopné pracovat i na nepřímou viditelnost (např. GSM, Wi-Fi). Útlum signálu způsobený deštěm je při těchto frekvencích minimální – řádově se jedná o desetiny dB na kilometr. Situace je ovšem jiná u systémů, které komunikují v pásmech od 10 GHz do 60 GHz. Tady je totiž potřeba přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. Jakékoliv narušení přímé viditelnosti např. dešťovými kapkami nebo jakýmkoliv jinými elementy vede ke kritickým útlumům signálu a už se zde nebavíme o desetínách dB/km, ale o celých jednotkách dB. Na druhou stranu, velkou výhodou tohoto frekvenčního pásma je využití dost širokého přenosového pásma a tím pádem maximalizace přenosové rychlosti.

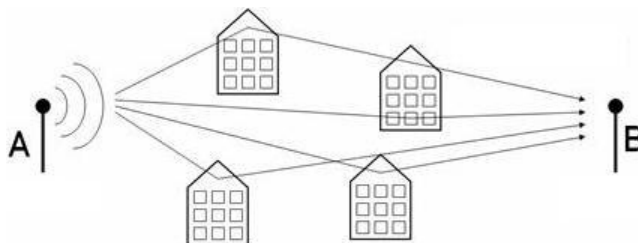
U systémů, kde není potřeba mít mezi vysílačem a přijímačem prostor bez překážek se zavádí pojem nLoS, který je synonymem k českému „komunikace na nepřímou viditelnost“. Takové systémy umí pracovat, i když je prostor mezi vysílačem a přijímačem nějakým způsobem zastíněn. Stupeň zastínění je definován Fresnelovou zónou [8]. Samozřejmě není možné použitím systému nLoS zaručit

komunikaci vždy a všude. Jako příklad můžeme uvést situaci, kdy máme na střeše umístěnu anténu, která, jak udává výrobce, má nLoS s dosahem několika stovek metrů. Uživatel, který se k ní snaží připojit, sedí v pokoji hned pod střechou. Jak je možné, že se zde nenachází dostatečně silný signál k připojení?

Přijímaná úroveň signálu RSSI a odstup signálu od šumu SNR jsou dva nejdůležitější parametry, které určují dosah rádiového spoje [8]. S každou překážkou v cestě se zvyšuje útlum signálu a jako důsledek se snižuje úroveň přijímaného signálu. Pokud v dosahu přijímače pracují na stejné frekvenci další přístroje, zvyšuje se úroveň šumu, a tím klesá odstup signálu od šumu SNR. Jestliže se mezi vysílačem a přijímačem nenachází žádná překážka, pak sílu signálu tlumí pouze útlum volného prostředí. Ovšem objeví-li se zde nějaká překážka, pak útlum signálu velice rychle vzrůstá a dosah signálu se naopak s každou překážkou velice rychle snižuje. Největším problémem z hlediska útlumu pro vlny v pásmu okolo 2,4 GHz (v tomto pásmu pracuje např. technologie Wi-Fi) jsou molekuly vody a logicky vše, co tyto molekuly obsahuje – i člověk se z větší části skládá z vody. [8]

### 3.3.2.2 Vícecestné šíření signálu

K tomuto efektu dochází, když se mezi vysílačem a přijímačem nachází překážky, od kterých se signál různě odráží. Tímto dochází na přijímači k příjmu několika signálů, které jsou fázově zpožděné a amplitudově deformované.



Obr. 26: Vícecestné šíření

### 3.3.2.3 Rušení jinými systémy ve stejném frekvenčním pásmu

Rádiové systémy, které používají modulaci FHSS dokážou razantně omezit komunikaci všech zařízení, které jsou v blízkosti. Tímto dochází k překrývání pásem a ke kolizím se zařízeními, která pracují ve stejném pásmu. Toto se projevuje velice výrazným poklesem SNR. Další, díky čemuž může docházet k rušení, je provoz zařízení, která nesplňují limity ČTÚ na maximální dovolený vyzářený výkon EIRP. Výše zmiňovaným problémům se můžeme vyhnout změnou vysílacího kanálu nebo výměnou antény. [8]

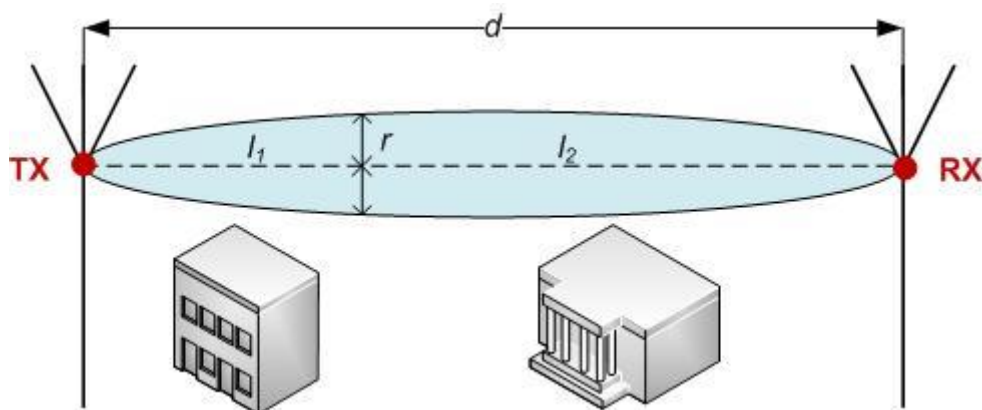
### 3.3.2.4 Útlum prostředí a Fresnelova zóna

U systémů, které mezi sebou komunikují bezdrátově, je nesmírně důležité počítat i s útlumem volného prostředí, které se nachází mezi vysílačem a přijímačem. Dále uvádím vzorec pro výpočet útlumu volného prostředí [8].

$$L_o = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (29)$$

Ze vzorce je vidět, že útlum prostředí závisí na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem  $d$  a na vlnové délce  $\lambda$ .

Další důležitá věc, kterou je nutné pro kvalitní přenos zaručit, je nenarušení Fresnelovy zóny. Fresnelova zóna je spojnice mezi vysílací a přijímací anténou (viz následující obrázek). Tato spojnice má tvar elipsoidu s nejširším průměrem uprostřed. Ve Fresnelově zóně je přenášeno 90% celkové energie signálu a tudíž, dojde-li k narušení této zóny, tak dochází k rapidnímu poklesu přijímaného signálu.



Obr. 27: Fresnelova zóna

Následuje vztah pro výpočet šířky Fresnelovy zóny v bodě  $r$  [8].

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2}} \quad (30)$$

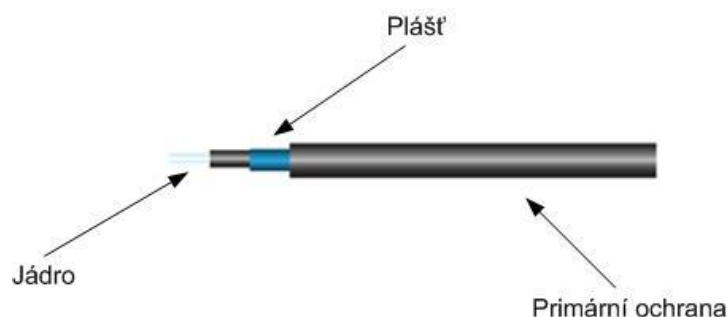
### 3.3.3 Optická vedení pro přenos digitálního signálu

Optické vlákno je elektricky nevodivý vlnovod, kterým se šíří elektromagnetické vlny ve směru osy vlákna. Tento přenos využívá principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Vnitřní částí vlákna je jádro a okolo jádra se nachází pláště a primární ochrana. U optických vláken používaných v datových sítích se udává průměr jádra a pláště v mikrometrech. Optická vlákna můžeme rozdělit na vlákna mnohavidová (Multi Mode) a jednovidová (Single Mode). [7]

Mnohavidová optická vlákna jsou v počítačových sítích nejčastěji používána pro komunikaci na krátké vzdálenosti, jako například uvnitř budovy nebo areálu. Rychlost přenosu u mnohavidových linek se pohybuje okolo 10 Mbit/s až 10 Gbit/s na vzdálenosti do 600 metrů [7], což je více než dostačující pro většinu lokálních sítí. Měrný útlum u mnohavidových optických vláken, která používají pro přenos vlnovou délku 850 nm, se pohybuje mezi 2,6 až 50 dB/km.

Jednovidová optická vlákna jsou používána pro přenos dat na větší vzdálenosti (např. mezi státy nebo kontinenty). Největší uplatnění našli tyto vlákna v telekomunikacích, kde se dnes výhradně používají jednovidová vlákna o průměru 9/125  $\mu\text{m}$ . Měrný útlum jednovidových optických vláken je pro vlnovou délku 1310 nm 0,35 dB/km, pro vlnovou délku 1550 nm dokonce jen 0,2 dB/km, což je velice nízká hodnota.

Na rozdíl od vedení metalického má optické vlákno mnoho výhod. Optická vlákna jsou vhodná převážně pro přenos dat na dlouhé vzdálenosti. Toto plyne z vlastnosti, že má optické vlákno velice malý útlum. Další výhodou je přenosová rychlost. Není problém dosáhnout přenosových rychlostí v řádech desítek gigabitů. Každé vlákno může přenášet více různých signálů. Stačí použít jinou vlnovou délku světla. Hlavní výhody optického vlákna jsou elektrická nevodivost, malý útlum a imunita vůči elektromagnetické interferenci. Toto může být dobrým řešením pro ochranu komunikačních zařízení, která jsou umístěna na vysokém napětí, jako mohou být sloupy vysokého napětí či kovové konstrukce náchylné na úder blesku. Dále je možné optické vlákno použít tam, kde hrozí nebezpečné vznícení, ke kterému může dojít v případě metalického vedení. Na druhou stranu je s přenosem signálu optickým vláknem spojen jiný problém. Jedná se o disperzi [7]. Disperze je druh zkrešení, které nám způsobuje změnu tvaru signálu a způsobuje jeho zpoždování (viz 3.1.5).



**Obr. 28: Optické vlákno**

## 4. ZMĚNY SIGNÁLŮ V RŮZNÝCH TYPECH SÍTÍ

V této kapitole nejdříve provedu rozdělení jednotlivých sítí podle několika kritérií a ve zbytku kapitoly se pokusím aplikovat teoretické poznatky z předchozích kapitol na jednotlivé typy sítí.

Sítě můžeme rozdělit podle mnoha kritérií. Na jedné straně můžeme mít sítě, které přenášejí digitální signál, na druhé straně máme sítě, které přenášejí signál analogový. Sítě můžeme také rozdělit na transportní a přístupové. Dále můžeme sítě rozdělit podle služeb, které poskytují, buď přenášejí hlasový, nebo datový signál. Další možné dělicí kritérium může být podle použitého vedení (metalické, optické, rádiové). Existuje mnoho způsobů, jak jednotlivé sítě rozdělit. Já v tomto textu použiji rozdělení nejdříve na sítě přístupové a transportní a poté rozdělení provedu na základě služeb, které tyto sítě poskytují. Samozřejmě se budu věnovat jak sítím, které přenášejí analogový signál, tak i sítím, které přenášejí signál digitální.

### 4.1 ROZDĚLENÍ SÍTÍ PODLE ÚROVNÍ

#### 4.1.1 Přístupové sítě

Přístupové sítě provádějí sběr provozu z koncových zařízení v dané oblasti k obslužnému uzlu. Z toho vyplývá, že přenášejí signály na malé a střední vzdálenosti. Přenosová rychlost se u digitálních přístupových sítí pohybuje v řádech kbit/s až po stovky Mbit/s. Přístupové sítě nám slouží k přístupu k transportní síti.

Co se týká fyzické realizace přístupové sítě, v síti najdeme všechna tři základní přenosová média - metalické, optické, rádiové. Symetrická metalická přípojná vedení jsou stále nejčastěji využívaná a používají se i k připojování nových účastníků. Zkombinujeme-li metalické vedení s optickým vláknem, pak hovoříme o tzv. hybridních přístupových sítích HFTP. Běžně slouží symetrické páry (místní smyčky) pro telefonní síť k analogovému přenosu a k realizaci základních digitálních přípojek ISDN či digitálních přípojek ADSL.

V přístupových sítích se ve většině případů používá jako přenosové médium metalická kroucená linka. Proto lze tedy obecně říci, že zde nemůžeme dosáhnout vysokých přenosových rychlostí. Toto omezení nám plyne ze samotné konstrukce a fyzikálních vlastností kroucené dvojlinky. Malý průřez jednotlivých vodičů v kabelu nám fyzicky neumožňuje dosáhnout takových přenosových rychlostí, jako lze dosáhnout např. u optického vlákna. U kroucené linky může rovněž docházet k uplatnění vlivu přeslechu (3.1.4). U ADSL přípojky může poměrně vysoký útlum metalického vodiče limitovat přenosovou rychlost. Z těchto vlastností kroucené linky plyne to, že je opravdu vhodná pouze pro přenos signálu na krátké vzdálenosti.



Přístupové sítě si můžeme rozdělit podle toho, jaký signál přenášejí – buď analogový, nebo digitální:

### 1. Analogová přístupová síť

- a. Účastnická telefonní linka
- b. Analogové televizní vysílání
- c. Rozhlasové vysílání (AM, FM)

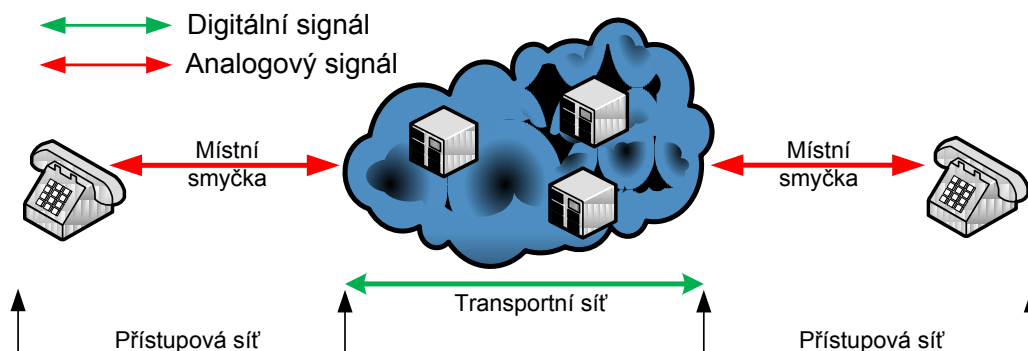
### 2. Digitální přístupová síť

- a. Síť integrovaných služeb ISDN
- b. Různé varianty DSL
- c. Technologie GSM
- d. Technologie GPRS
- e. Technologie Bluetooth

#### 4.1.1.1 Analogová přístupová síť

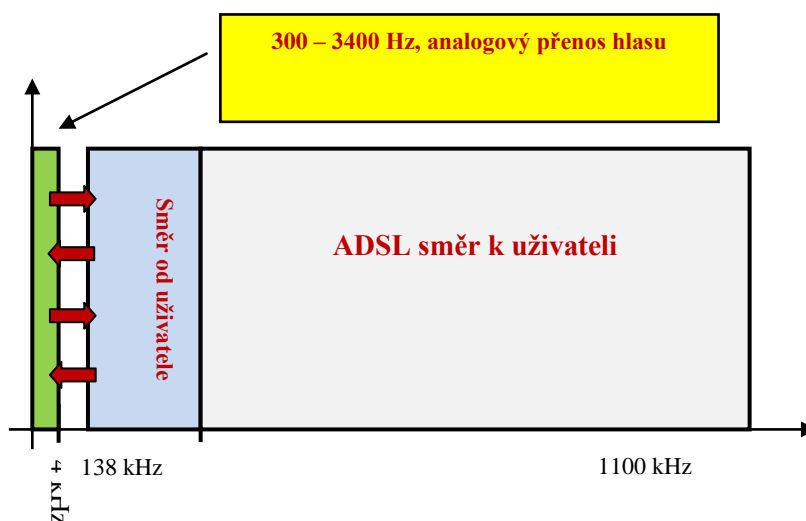
##### • Telefonní síť

Telefonní síť nám slouží pro přenos hlasu, pro který máme k dispozici přenosové pásmo o šířce 3100 Hz (300 – 3400 Hz). Přístupová část telefonní sítě využívá k připojení k místní ústředně místní smyčky, což jsou vedení, která vedou od koncových účastníků. Místní smyčky klasicky využívají jako vedení kroucenou dvojlinku UTP nebo stíněnou kroucenou dvojlinku STP (viz 2.2.1). Od účastníka do místní ústředny vede místní smyčka, která přenáší analogový signál. Z toho plynou problémy spojené s přenosem analogového signálu, které byly diskutovány v první části této práce. Ve stručnosti shrnu, co vše může signál ovlivňovat. Na následujícím obrázku uvádím schéma telefonní sítě.



Obr. 29: Telefonní síť

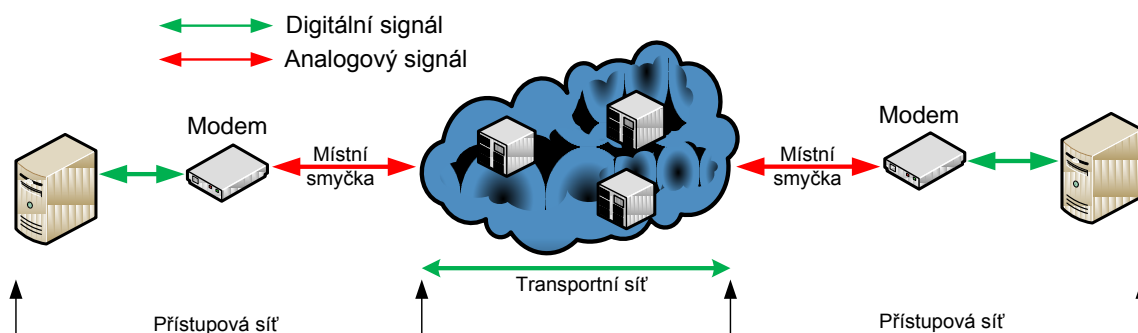
V první řadě se musíme zajímat o kvalitu samotné linky. Musíme si dát pozor na správnou instalaci přípojného vedení, jinak nám bude na signál působit šum a bude docházet ke snižování poměru odstupů signálu od šumu SNR (viz 2.1.3) a z toho důvodu bude docházet ke zhoršení kvality hovoru. Dalším vlivem je počasí. Při špatné instalaci může docházet k prosakování dešťové vody do vedení a tím může docházet k přerušení vedení signálu. I světlo může neblaze ovlivnit náš signál, protože světlo není nic jiného než forma elektromagnetického záření. Tímto jsem se dostal k elektromagnetické interferenci, ke které také dochází působením např. vedlejšího napájecího vedení, které je vedeno blízko naší místní smyčky. Rádiové, televizní vysílače a obecně jakákoliv elektrická zařízení mohou také způsobovat vznik elektromagnetické interference, která nám bude zvyšovat působení šumu na vedení. Hladinu šumu (viz 2.1.3) působící na naši linku mohou zvyšovat také takzvané rozbočovače (splittery), které slouží k připojení více zařízení na jednu linku. K rušení telefonního signálu může také docházet v důsledku působení ostatních služeb, které sdílí stejné vedení. Jako příklad můžeme uvést službu ADSL. Klasický telefonní signál má šířku přenosového pásma 3100 Hz. Na vyšší frekvence může být namodulováno právě ADSL, díky kterému může docházet k vzájemnému ovlivňování obou signálů. Na následujícím obrázku je toto znázorněno.



**Obr. 30: Sdílení společného média více službami**

Přístupová část analogové telefonní sítě nám umožňuje i přenos digitálních dat. Tomuto způsobu přenosu se říká vytáčená linka a dříve se používala k připojení k Internetu. Abychom mohli analogovým kanálem přenést digitální data, tak potřebujeme speciální zařízení, které se nazývá modem. Toto zařízení převádí digitální signál, který vystupuje z digitálního koncového zařízení (počítač) na signál analogový (modulace), který je dále přenášen k místní ústředně. Další funkcí tohoto zařízení je opačný postup převodu – tedy převod analogového signálu na signál digitální, který chceme koncovým zařízením přijmout (demodulace). Mezi modemem a místní ústřednou máme k dispozici

analogové přenosové pásmo o šířce 3100 Hz. Z tohoto nám plyne jasné omezení přenosové rychlosti, která může dosáhnout maximálně 56 kbit/s. Pro přenos mezi modemem a ústřednou se používá frekvenční modulace. Digitální hodnotu 0 a 1 tedy vyjadřujeme změnou frekvence analogového signálu. Logická hodnota 1 je při přenosu vyjádřena frekvencí 1300 Hz, logická hodnota 0 se vyjadřuje frekvencí 2100 Hz. Místní ústředna tyto frekvence vyhodnocuje a převádí je na digitální signál, který je poté pomocí PCM modulace přenášen dále přenosovým traktem. Mezi modemem a místní ústřednou tedy přenášíme analogový signál, který je oproti signálu digitálnímu více náchylný k různým rušením. Signál nám ovlivňují stejné vlivy, které byly popsány výše. Působením těchto vlivů může docházet mezi modemem a ústřednou ke komolení významu přenášených dat, která jsou frekvenčně modulována pro přenos analogovým kanálem. V důsledku tohoto může ústředna signál špatně vyhodnotit. Na následujícím obrázku uvádím znázornění přenosové cesty v případě nasazení vytáčené linky.



**Obr. 31: Teoretický model využití vytáčené linky v telefonní síti**

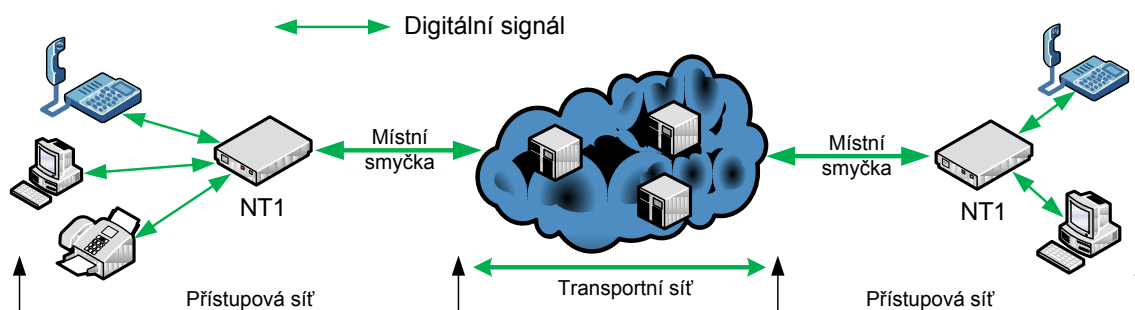
#### 4.1.1.2 Digitální přístupová síť

- **ISDN**

ISDN je zkratka ze slov Integrated Services Digital Network, což v překladu znamená Digitální síť integrovaných služeb. Co se týká digitalizace telefonní sítě, tak ta skončila u digitalizace spojení mezi ústřednami a od místních ústřed k účastníkovi proudí analogový signál. V tomto ohledu přineslo ISDN nový přístup. ISDN totiž protáhlo digitalizaci sítě až k samotnému účastníkovi. Z toho plyne jasná výhoda přenosu. Po celou dobu tedy komunikujeme skrz digitální kanál. V případě základní přípojky BRI máme k dispozici tyto kanály dva, každý s přenosovou rychlostí 64 kbit/s. Tyto kanály bývají značeny písmenem B. Základní přípojka má k dispozici ještě jeden kanál označovaný písmenem D, tento kanál slouží pro služební účely jako je např. signalizace.

Digitální signál nám poskytuje daleko lepší přenosové možnosti. Samozřejmě i tento signál je ovlivňován zkreslením a šumem, který je spojen s přenosovým řetězcem. Avšak výhoda digitálního signálu je v jeho vyhodnocování.

Přípojně vedení, které vede od účastníka k místní ústředně je budováno na stávajících místních smyčkách, stejně jako v případě klasické telefonní linky. V případě telefonního hovoru přes ISDN síť, dochází k převodu hlasu, který má povahu analogového signálu, přímo v koncovém zařízení. Dochází zde tedy k digitalizaci analogového signálu, s kterým je spojeno kvantizační zkreslení. Kvantizační zkreslení (viz 3.1.2.2) vzniká při procesu kvantování, kdy nekonečnému počtu úrovní analogového signálu přiřazujeme konečný počet úrovní, které jsou kódovány do digitálního signálu. Tento signál je poté přenášen do místní ústředny, kde již není potřeba signál digitalizovat, jako v případě klasické telefonní sítě. V místní ústředně dojde jen ke konverzi na jiný linkový kód (viz 3.2), který je vhodný pro přenos pomocí PCM, které se budu věnovat v části o transportní síti. Kvalita signálu, který dorazí k místní ústředně, závisí na kvalitě vedení, které spojuje koncového účastníka a ústřednu. Nejčastěji je toto vedení klasická kroucená dvojlinka, ve většině případů levnější nestíněná UTP varianta (viz 2.2.1). Takové vedení neposkytuje přenášenému signálu moc velkou ochranu a může tedy docházet k interferenci mezi přenášeným signálem a rušivým elektromagnetickým polem (viz 2.1.3). Tímto dochází k deformaci signálu a tento poté může být přijímacím obvodem špatně vyhodnocen. Mezi jednotlivými vodiči kroucené dvojlinky dochází k přeslechu, toto způsobuje vzájemné ovlivňování jednotlivých signálů, které jsou vedením přenášena (viz 2.1.4). Útlum v případě digitálního signálu není pro signál tak kritický, jak u analogu. Pokud nedojde k překlenutí rozhodovací úrovně signálu, tak nám lehce utlumený signál nezpůsobí žádné větší komplikace. Dojde-li ovšem k překlenutí rozhodovací úrovně, pak dochází ke zvyšování bitové chybovosti (viz 3.1.5). Ke zvyšování bitové chybovosti může docházet také z důvodu fázového chvění, které způsobuje ztrátu synchronizace v přijímacím obvodu. Jak jsem uvedl výše, tak k digitalizaci signálu dochází už v koncovém zařízení. Největší výhoda ISDN linky tedy spočívá ve využití digitálních koncových zařízení a ve využití plně digitálního spojení mezi nimi, které nám poskytuje kvalitní signál. Na následujícím obrázku uvádím ISDN síť.



Obr. 32: ISDN síť

## 4.1.2 Transportní síť

Transportní síť přenáší sesbírané příspěvky z přístupových sítí mezi jednotlivými uzly sítě. Tyto síť musí být dimenzovány pro přenos vysokých objemů dat, které činí řádově stovky Gbit/s. U transportních sítí je nemyslitelný jakýkoliv výpadek provozu. Tohoto se dosahuje použitím redundantních cest v síti, kdy při výpadku jedné trasy musí dojít k přesměrování provozu na jiný spoj. Toto je další rozdíl mezi sítí přístupovou a transportní. Když dojde k přerušení vedení v přístupové síti, je ve většině případů komunikující koncový účastník odstřižen od zbytku sítě. V případě transportní sítě je toto nemyslitelné a z toho důvodu se v síti budují redundantní (mnohačetné) spoje.

Transportní síť jsou v dnešní době jednoznačně budována na optickém vlákne, které nám jako jediné přenosové médium umožňuje přenášet data řádově ve stovkách Gbit/s. V případě potřeby bývají optické přenosové cesty doplňovány radioreléovými, případně družicovými spoji. Vzhledem ke značnému objemu přepravovaných dat z důvodu sdružení mnoha příspěvkových signálů na přenosových cestách, jsou pro transportní síť metalická vedení zcela nevyhovující.

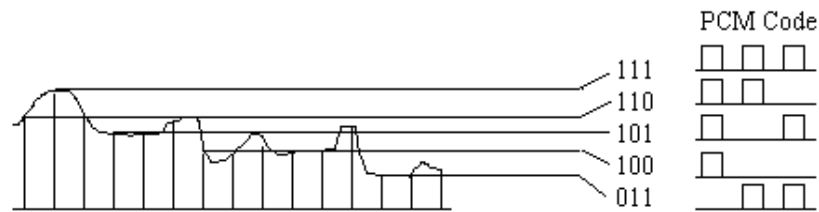
V této části textu se budu věnovat plesiochronní digitální hierarchii, která využívá pro přenos dat techniku PCM. Analogové transportní síť zde zmiňovat vůbec nebudu, protože se v dnešní době již žádné nevyžívají.

### 4.1.2.1 Digitální transportní síť

- **PCM a přenos mezi ústřednami**

Pro přenos dat (telefonní hovor, data) mezi telefonními ústřednami, se používá pulzní kódová modulace PCM. Pulsně kódová modulace je jedna z nejrozšířenějších technik pro převod analogového signálu na signál digitální.

Nejprve ve stručnosti popíši postup kódování PCM. Zařízení, které převádí analogový signál na signál digitální, bývá označováno jako Codec. Ve své podstatě se jedná o zařízení principiálně stejné jako modem. Převádí signál analogový na digitální. Proces převodu spočívá v pravidelném vzorkování stavu analogového signálu a následným kvantováním této hodnoty. Kvantování není nic jiného než aproximování hodnoty vzorku analogového signálu jednou ze 128 nebo 256 hodnot. [13] Tento vzorek je tedy následně vyjádřen jako jedno 7bitové nebo 8bitové číslo (podle použitého standardu). S kvantováním je spojeno kvantizační zkreslení (viz 3.1.2.2). Jelikož pro analogový telefonní signál využíváme šířku pásma 4000 Hz, musíme tento signál vzorkovat 8000x za vteřinu, tedy každých 125 mikrosekund. Na následujícím obrázku je vyobrazen postup kódování analogového signálu pomocí PCM.



**Obr. 33: PCM kódování**

Z tohoto nám tedy plyne, že pro přenos jednoho digitálního telefonního hovoru máme k dispozici digitální kanál s přenosovou rychlostí 64 kbit/s označovaný E0. Tyto signály jsou hierarchicky sdružovány do přenosových systémů vyšších řádů označovaných E1, E2, E3 a E4, které tvoří plesiochronní digitální hierarchii [11].

Technika PCM kódování je využívána v plesiochronní síti právě k přenosu digitalizovaného telefonního hovoru (dat) mezi ústřednami. Plesiochronní digitální síť je budována buď na metalických, nebo optických vedeních. Pro přenosové systémy nižších řádů (E1 – E3) je využíváno metalické vedení [11]. Data jsou metalickým vedením přenášena pomocí linkového kódu HDB3 (viz 3.3.2), který zajišťuje dobré taktování i pro dlouhé sekvence nul. S metalickým vedením je spojen větší útlum (viz 2.1.1) vedení než u vedení optického. Když tedy signál přenášíme na delší vzdálenosti, měli bychom ho po určité době obnovovat pomocí opakovaců (viz 3.1.1.1). Signál může být také ovlivňován přeslechem mezi jednotlivými páry vodiče (viz 3.1.4). S přenosem je spojeno také zkreslení skupinovým zpožděním (viz 2.1.2.6), které vzniká z důvodu rozdílných rychlostí šíření signálů o různých kmitočtech. Tento problém bývá řešen pomocí útlumových a fázových článků, které rychleji se šířící složky signálu utlumí. Všechny tyto vlivy nám ve výsledku zvyšují bitovou chybovost BER (viz 3.1.5) a v důsledku toho, dochází ke snížení přenosové rychlosti, protože musí docházet k přeposílání poškozených dat.

Přenosový systém E4, který vzniká sloučením čtyř signálů E3 bývá již budován na optickém vedení. Pro přenos se využívá jak mnohavidových, tak i jednovidových vláken. Pro mnohavidová vlákna (viz 3.3.3) jsou určeny vlnové délky 850 a 1310 nm [11] a jako zdroj záření se používá LED dioda nebo laserová dioda. Pro přenos jednovidovými vlákny (viz 3.3.3) se používají vlnové délky 1310 a 1550 nm a jako zdroj záření je využita laserová dioda. Linkový kód HDB3 není možné pro přenos optickým vláknem použít. Optické vedení nám totiž neumožňuje rozlišit a zakódovat bipolární signál. Je třeba tedy použít jiný linkový kód. V případě plesiochronní digitální hierarchie se využívá nejčastěji linkového kódu MCMI (viz 3.2.3). Protože je mezi ústřednami nutno překonat značné vzdálenosti, je z hlediska přenosových vlastností optické vlákno nejlepší variantou. Optické vlákno má totiž nejnižší měrný útlum a dovoluje nám tedy přepravovat data na velké vzdálenosti bez větších změn signálu z důvodu útlumu (viz 3.1.1). Optické vlákno je také vhodné pro přenos dat z toho důvodu, že poskytuje největší ochranu proti elektromagnetické interferenci (viz 3.1.3). S optickým

vláknem je spojen problém s disperzí (viz 3.1.2.5). Disperze nám způsobuje zkreslení signálu, jehož vlivem dochází ke změně tvaru impulzů a způsobuje i jejich zpoždování. Disperze je u optických přenosových systémů jedním z největších zdrojů zvýšené bitové chybovosti BER (viz 3.1.5). U plesiochronní digitální hierarchie je nejvyšší přípustná bitová chybovost  $BER = 10^{-10}$  [11].

## **4.2 ROZDĚLENÍ SÍTÍ PODLE SLUŽEB**

V předchozí části jsme se bavili o sítích rozdělených podle úrovní. Zabývali jsme se tedy sítěmi přístupovými a sítěmi transportními. Jednotlivé sítě, které byli diskutované v předchozí části, můžeme rozdělit i podle služeb, které poskytují. Tedy zda poskytují hlasové či datové služby.

### **4.2.1 Hlasové sítě**

Hlasové sítě jsou z hlediska historického vývoje starší než sítě datové. Tyto sítě z počátku přenášeli hlas pomocí analogového signálu. Postupně však docházelo i v hlasových sítích k digitalizaci. Nejdříve došlo k výměně manuálně ovládaných analogových ústředen za ústředny automatické a digitální. Došlo tedy k digitalizaci spojení mezi jednotlivými ústřednami. V této fázi digitalizace se v současné době nachází klasická telefonní síť. S příchodem ISDN došlo k digitalizaci i poslední části sítě, došlo tedy i k digitalizaci spojení mezi koncovým uživatelem a místní ústřednou. Takto tedy probíhal vývoj hlasových sítí, stručně řečeno.

Pro přenos hlasu v analogové formě se využívá pásmo v rozmezí 300 Hz až 3400 Hz (šířka pásma je tedy 3,1 kHz). Pro přenos digitalizovaného hlasu již potřebujeme pásmo daleko širší. Z Nyquist – Shannonova teorému o vzorkování vyplývá, že pro přenos hlasu v digitální podobě potřebujeme pásmo o minimálně dvojnásobné šířce. V případě digitálních hlasových sítí se tedy používá pro přenos hlasu šířka pásma 8000 Hz. Digitální hlasová síť si tedy klade větší nárok na šířku pásma než analogová hlasová síť. Na druhou stranu nám digitální síť poskytuje kvalitnější přenos hlasu. Toto plyne z vlastností digitálního signálu. Digitální signál je totiž méně náchylný k poškození přenášeného signálu – je více odolný proti působení útlumu i různým rušením, protože se dá lehce obnovovat v opakovačích (viz 3.1.1.1).

V minulé kapitole jsem se podrobněji věnoval klasické telefonní síti a digitální síti integrovaných služeb ISDN. V této části tedy provedu jen patřičné rozdělení hlasových sítí.

#### **1. Analogová hlasová síť**

- a. Přístupová část klasické telefonní sítě
- b. Rozhlasové vysílání (AM, FM)

#### **2. Digitální hlasová síť**

- a. Digitální síť integrovaných služeb ISDN

- b. Transportní část klasické telefonní sítě
- c. Digitální rozhlasové vysílání
- d. Technologie GSM

#### 4.2.2 Datové sítě

V případě datových sítí se dnes můžeme zabývat pouze sítěmi digitálními, protože žádná analogová datová síť neexistuje (snad jen možnost využití vytáčené linky, což je podle mého názoru „hybridní“ způsob přenosu dat). Dalo by se říci, že datové sítě jsou nástupci sítí hlasových. V dnešní době jsou již i tyto sítě schopny efektivněji nahradit sítě hlasové (např. VoIP, VoFR). Dochází tedy k jakési konvergenci dvou různých druhů sítí. Dříve datové sítě využívali přenosových schopností hlasové sítě. Tohoto využívalo např. spojení pomocí vytáčené linky (viz část kapitoly 4.1.1.1), kdy docházelo k využití analogového pásma o šířce 3,1 kHz mezi koncovým účastníkem a místní telefonní ústřednou pro přenos dat. V dnešní době jsou již datové sítě budovány zvlášť vedle sítí hlasových.

Pro přenos dat v datových sítích používáme digitální signál. Ten nám umožňuje uskutečnit spolehlivý přenos dat. Transportní část datových sítí bývá budována na optickém vedení. Použití optického vedení plyne z potřeby přenášet data na velké vzdálenosti s co nejmenším poškozením. Proto je optika v tomto případě jasná volba. Optické vlákno (viz 3.3.3) disponuje minimálním útlumem, je minimálně náchylné proti vnější interferenci a poskytuje dostatečnou šířku pásma pro přenos velkých objemů dat. Přístupová část datové sítě je nejčastěji tvořena místní smyčkou, která vede k zařízení, které je nazýváno DSLAM. Úlohou tohoto zařízení je propojení koncového účastníka s páteří (transportní) sítí datové sítě. Místní smyčky jsou vedení, která byla dříve využívána pouze pro spojení koncového účastníka s telefonní ústřednou. Tato vedení byla dimenzovaná pro přenos analogového signálu s šířkou pásma 3,1 kHz. Z tohoto důvodu plyne, že každá místní smyčka má určitý limit, co se týká šířky přenosového pásma a tedy i přenosové rychlosti. V případě datových přenosů, totiž používáme daleko větší šířku pásma, která se pohybuje v řádu stovek MHz. Maximální přenosová rychlost tedy závisí na kvalitě místní smyčky a na vzdálenosti koncového uživatele od DSLAMu. Než dorazí signál k DSLAMu může být ovlivněn několika vlivy. Jistě bude nějak utlumen (viz 3.1.1) – jak moc, závisí na vzdálenosti od DSLAMu. Dále tento signál může být různě zkreslen, jak již z důvodu fázového posunu (viz 2.1.2.2) či přeslechu mezi jednotlivými páry vedení (viz 3.1.4). Vzhledem k tomu, že datové služby a služby klasické telefonní sítě či sítě ISDN často sdílejí jedno přenosové vedení, může docházet i k interferenci mezi těmito systémy. Toto vše povede ke zvýšení bitové chybovosti BER a nutnosti poškozená data znovu přeposílat.

V části o přístupových sítích jsem se podrobněji zabýval přenosem dat pomocí technologie ISDN. Proto Vás pro více podrobností o tomto přenosu odkazuji právě tam (viz 4.1.1). Nakonec této kapitoly tedy jen vyjmenuji zástupce digitálních datových sítí.



## **1. Digitální datová síť**

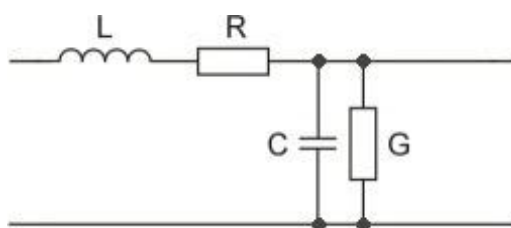
- a. Digitální síť integrovaných služeb ISDN
- b. Různé varianty DSL
- c. Digitální televizní vysílání

## 5. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

V poslední části této práce bych chtěl uvést a popsat měření, která jsem provedl, abych si ověřil teoretické poznatky, které jsem nabyt při psaní této bakalářské práce.

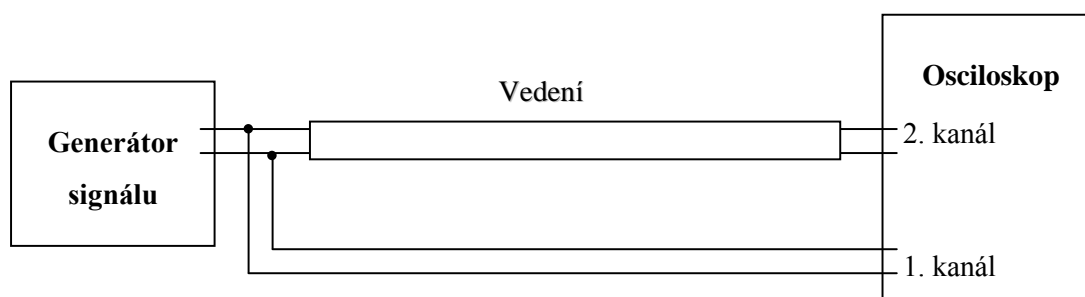
### 5.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Účelem měření bylo namodelovat různé průběhy signálů, jak analogových tak digitálních. Postup měření spočíval nejdříve v sestavení obvodu pro měření průběhů signálů na metalickém vedení. K dispozici jsem neměl reálné vedení, a proto jsem se pro účely měření musel spokojit s náhradním zapojením vedení. Schéma tohoto zapojení uvádím na následujícím obrázku.



Obr. 34: Náhradní schéma vedení

Tento obvod svými vlastnostmi zastoupil reálné vedení. Celkové zapojení pro měření vypadalo následovně.



Obr. 35: Schéma zapojení pro měření

Úsek označený „Vedení“ byl při měření nahrazen schématem z obrázku č. 34. Jak vyplývá z obrázku, k měření bylo potřeba generátoru signálu a osciloskopu. První kanál osciloskopu byl připojen na vstup vedení a druhý kanál byl připojen na výstup z tohoto vedení. Měl jsem tedy možnost porovnat vstupní signál, který vstupoval do vedení se signálem výstupním, který z vedení vystupoval.

Měřením jsem se snažil zjistit, jak se bude měnit výstupní signál vůči analogovému i digitálnímu signálu vstupnímu. Pro měření průběhů analogového signálu jsem na generátoru signálu nastavil frekvenci 1 kHz a amplitudu signálu 1,55 V. Pro měření digitálního signálu byl postup obdobný – nastavena amplituda signálu 1,55 V (5 V) a modulační rychlost signálu byla  $v_m = 2000$  Bd.

Pro měření byly použity následující přístroje:

1. Generátor signálu Agilent 33220A
2. Osciloskop Tektronix TDS 1002B

Nejdříve ještě uvedu fotografii pracoviště, ve kterém měření probíhalo a poté se již budu věnovat jednotlivým průběhům signálů, které byly při měření zachyceny.



Obr. 36: Fotografie pracoviště

## 5.1.1 Analogový signál

### 5.1.1.1 Útlum na vedení

Cílem prvního měření bylo nasimulovat vliv útlumu vedení na přenášený analogový signál. Pro měření jsem k dispozici neměl reálné vedení, a proto jsem si musel vystačit pouze s náhradním zapojením vedení (viz obr. 34). Do tohoto obvodu byl zapojen pouze odpor  $R$ . Dosazené hodnoty pro měření tedy byly následující:

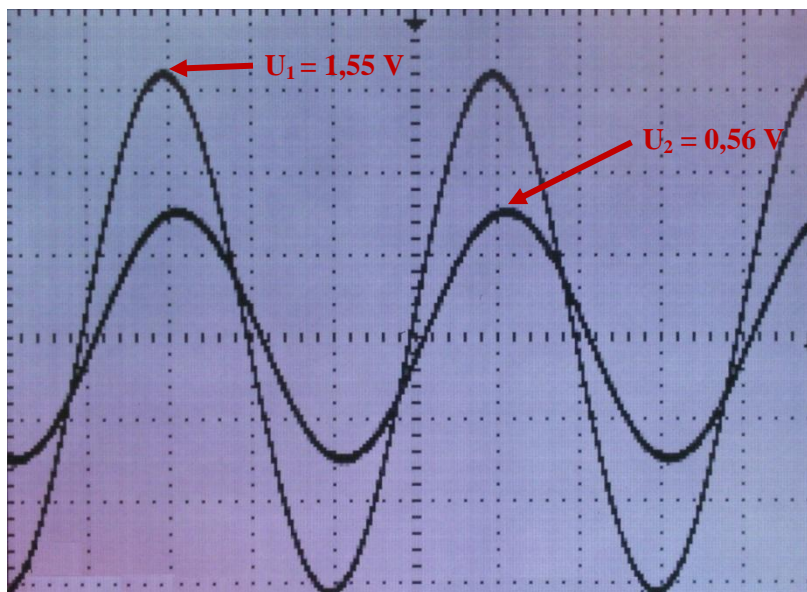
$$R = 1 \text{ M}\Omega$$

$$C = 0 \text{ F}$$

$$G = 0 \text{ }\Omega$$

$$L = 0 \text{ H}$$

Těmito hodnotami jsem docílil vytvoření ideálního vedení pro simulaci útlumu.



**Obr. 37: Útlum na vedení**

Dosazením naměřených hodnot do vzorce č. 8 jsem spočítal výsledný útlum na vedení:

$$A_U = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log \frac{1,55}{0,56} = 8,84 \text{ dBu} \quad (31)$$

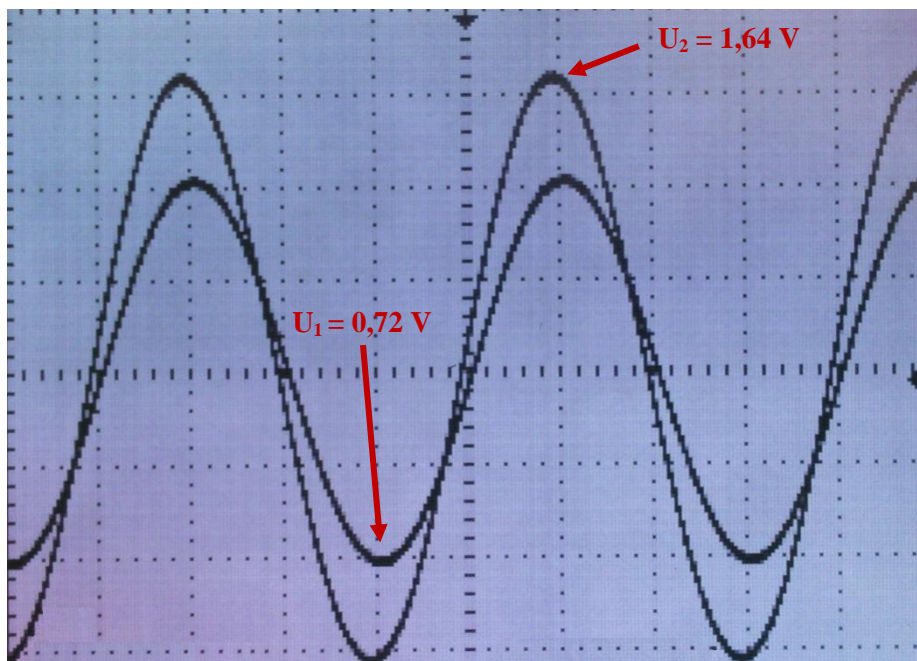
Výpočtem bylo zjištěno, že na vedení došlo k útlumu o velikosti 8,84 dBu.

	U [V]	A [dBu]
<b>U<sub>1</sub></b>	1,55	<b>0</b>
<b>U<sub>2</sub></b>	0,56	<b>8,84</b>

**Tab. 3: Tabulka hodnot**

### 5.1.1.2 Zisk na zesilovači

V druhém měření jsem simuloval průběh signálu po zesílení zesilovačem. Byl tedy měřen napěťový zisk  $S_U$ . Naměřené průběhy vypadají následovně:



**Obr. 38: Zisk na vedení**

Výpočet napěťového zisku se provedl podle vzorce č. 8 následovně:

$$S_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{1,64}{0,72} = 7,15 \text{ dBu} \quad (32)$$

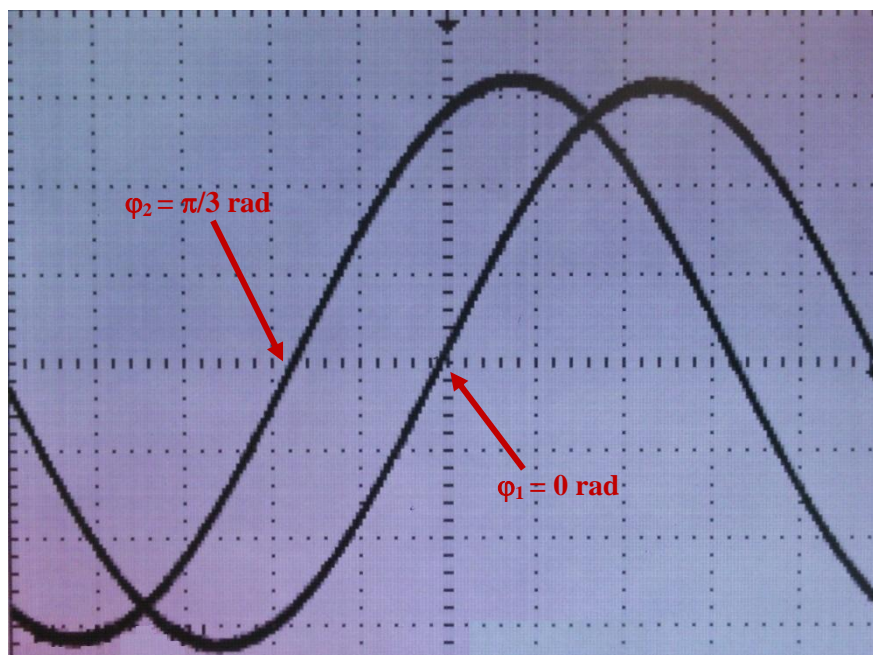
Výpočtem a z naměřených hodnot jsem zjistil, že vlivem zesílení zesilovače na trase vedení, došlo k zisku napětí o velikosti 7,15 dBu.

	U [V]	S [dBu]
<b>U<sub>1</sub></b>	0,72	<b>0</b>
<b>U<sub>2</sub></b>	1,64	<b>7,15</b>

**Tab. 4: Naměřené hodnoty**

### 5.1.1.3 Fázový posuv

Smyslem třetího měření bylo demonstrovat fázový posuv, který v tomto případě nastal vlivem působení kapacity  $C = 1,36 \text{ nF}$ . Do schématu náhradního vedení z obrázku č. 34, byla tedy zapojena kapacita o této hodnotě. Hodnoty  $R$ ,  $L$ ,  $G$  zůstali při tomto měření nulové. Oba průběhy signálu můžeme vidět na následujícím obrázku:



**Obr. 39: Fázový posuv**

Rozdílem hodnot fáze obou signálů jsem zjistil fázový posuv  $\Delta\varphi$ . Výpočet tedy proběhl následovně:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{3} - 0 = \frac{\pi}{3} \quad (33)$$

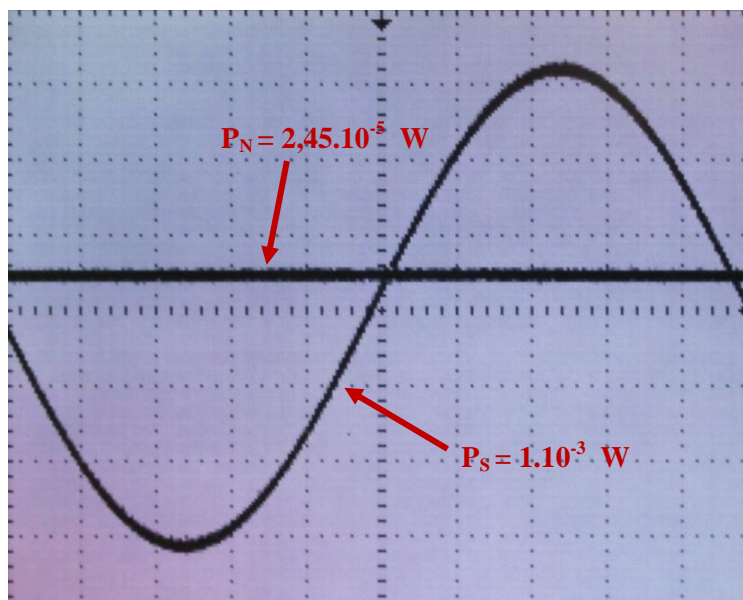
Tímto jednoduchým výpočtem jsem zjistil hodnotu fázového posuvu, která je  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ .

$\varphi_1$ [rad]	$\varphi_2$ [rad]	$\Delta\varphi$ [rad]
0	$\pi/3$	$\pi/3$

**Tab. 5: Tabulka hodnot**

#### 5.1.1.4 Šum

Následující měření mělo za cíl demonstrovat vliv působení šumu na přenášený signál. Prvním měřením jsem simuloval průběh signálu, který byl ovlivněn neaditivním šumem. Tento rušivý signál byl pro účely simulace generován druhým generátorem signálu. Na následujícím obrázku je zachycený průběh.



Obr. 40: Neaditivní šum

Dosažením hodnot výkonu signálů do následujícího vzorce získáme hodnotu SNR:

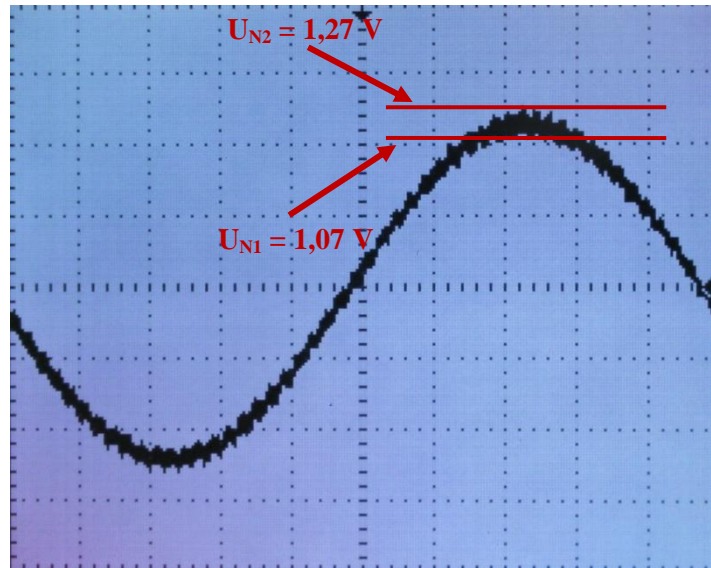
$$SNR = 10 \log \left| \frac{P_S}{P_N} \right| = 10 \log \left| \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2,45 \cdot 10^{-6}} \right| = 26,1 \text{ dB} \quad (34)$$

Výpočtem bylo zjištěno, že odstup signálu od šumu je  $SNR = 26,1 \text{ dB}$ .

$P_S$ [W]	$P_N$ [W]	SNR [dB]
$1 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-6}$	26,1

Tab. 6: Tabulka hodnot

V druhém měření jsem simuloval průběh stejného signálu, avšak v tomto případě došlo k sečtení rušivého a rušeného signálu. Měřením jsem tedy nasimuloval vliv aditivního šumu (viz následující obrázek).



**Obr. 41: Aditivní šum**

U tohoto obrázku můžeme provést výpočet kolísání napětí  $\Delta U$ :

$$\Delta U = U_{N2} - U_{N1} = 1,27 - 1,07 = 0,2V \quad (35)$$

Výpočtem bylo zjištěno, že napětí kolísá v intervalu 0 – 0,2 V.

$U_{N1}$ [V]	$U_{N2}$ [V]	$\Delta U$ [V]
1,07	1,27	<b>0,2</b>

**Tab. 7: Tabulka hodnot**

#### 5.1.1.5 Přeslech na vedení

Pro měření přeslechů jsem neměl k dispozici reálné vedení, a proto jsem pro simulaci těchto jevů použil následující zapojení, které svými fyzikálními vlastnostmi zastoupilo vedení reálné.

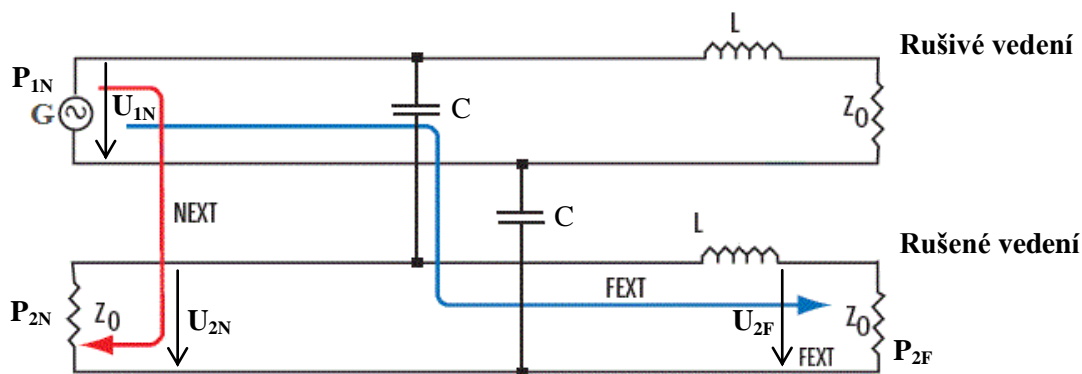
Hodnoty dosazené do tohoto zapojení byli následující:

$$C = 22 \text{ pF}$$

$$L = 33 \text{ mH}$$

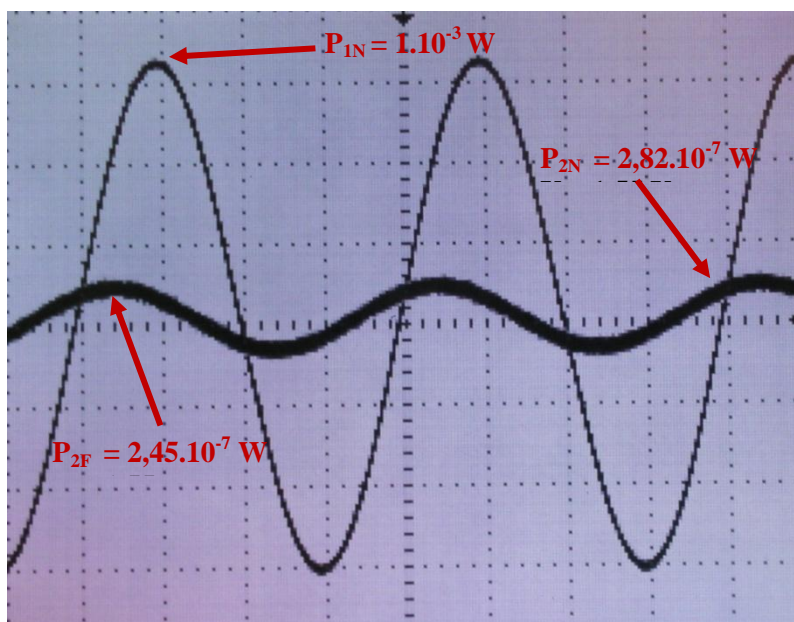
$$Z_0 = 82 \text{ k}\Omega$$





Obr. 42: Schéma zapojení pro měření přeslechů

Na následujícím obrázku uvádím průběh naměřených signálů. V tomto případě mi hodnoty přeslechů NEXT a FEXT vyšli téměř stejné, proto zde uvedu jen jeden obrázek průběhu signálu.



Obr. 43: Přeslech NEXT a FEXT

Z obrázku je patrné, že vlivem kmitočtově závislých prvků došlo k fázovému posuvu. Nejprve provedu výpočet přeslechu na blízkém konci NEXT. Pro tento výpočet použiji následující vzorec (24):

$$A_{NEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \right) = 10 \log \left( \frac{1 \cdot 10^{-03}}{2,82 \cdot 10^{-07}} \right) = 35,5 dB \quad (36)$$

Výpočet přeslechu na vzdáleném konci FEXT provedu obdobně. Následuje vzorec, podle kterého jsem výpočet provedl (25):

$$A_{FEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \right) = 10 \log \left( \frac{1 \cdot 10^{-03}}{2,45 \cdot 10^{-07}} \right) = 36,1 dB \quad (37)$$

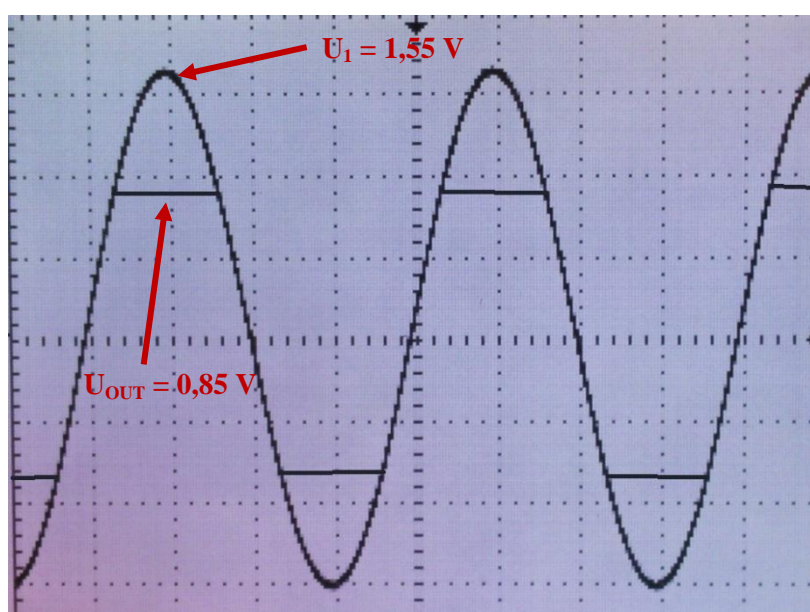
V následující tabulce uvádím tabulku naměřených a vypočítaných hodnot:

$P_{IN}$ [W]	$P_{2N}$ [W]	$P_{2F}$ [W]	$A_{NEXT}$ [dB]	$A_{FEXT}$ [dB]
$1 \cdot 10^{-3}$	$2,82 \cdot 10^{-7}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	<b>35,5</b>	<b>36,1</b>

**Tab. 8: Tabulka hodnot**

### 5.1.1.6 Oříznutí

Tímto měřením jsem chtěl demonstrovat jev zvaný oříznutí (viz kapitola 2.1.3.4). Tohoto jevu jsem při měření docílil přebuzením zesilovače, který již nemohl více zesílit vstupní signál, a došlo tedy k oříznutí. Na následujícím obrázku je zachycen průběh výstupního (oříznutého) signálu.



**Obr. 44: Oříznutý výstupní signál**

Zde pro úplnost spočítám rozdíl vstupního a výstupního signálu. Tímto zjistím, o kolik byl signál oříznut:

$$\Delta U = U_1 - U_{OUT} = 0,7V$$

Hladina výstupního signálu byla snížena o 0,7 V.

$U_1$ [V]	$U_{OUT}$ [V]	$\Delta U$ [V]
1,55	0,85	<b>0,7</b>

**Tab. 9: Tabulka hodnot**

## 5.1.2 Digitální signál

### 5.1.2.1 Útlum na vedení

Cílem tohoto měření bylo demonstrovat vliv útlumu vedení na přenášený digitální signál. Do náhradního zapojení vedení (viz obr. 34) byly dosazeny následující hodnoty:

$$R = 500 \text{ k}\Omega$$

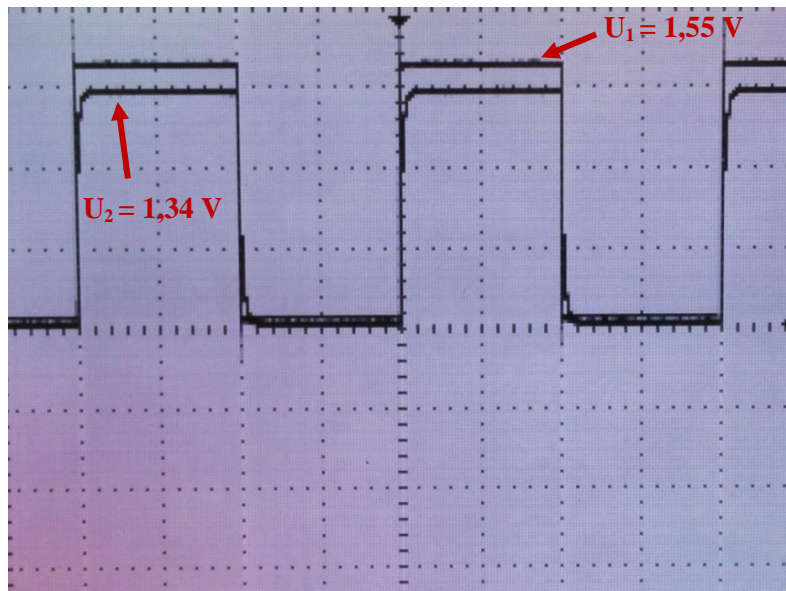
$$C = 0 \text{ F}$$

$$G = 0 \text{ }\Omega$$

$$L = 0 \text{ H}$$

Těmito hodnotami jsem se snažil vytvořit ideální vedení pro simulaci útlumu signálu. To se mi ovšem nepodařilo, protože zapojený odpor R nebyl ideální. Z toho důvodu došlo i k určitému zkreslení.

Následuje obrázek zachycených průběhů.



Obr. 45: Útlum na vedení

Dosazením naměřených hodnot do vzorce č. 8 jsem spočítal výsledný útlum na vedení:

$$A_v = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log \frac{1,55}{1,34} = 1,26 \text{ dBu} \quad (38)$$

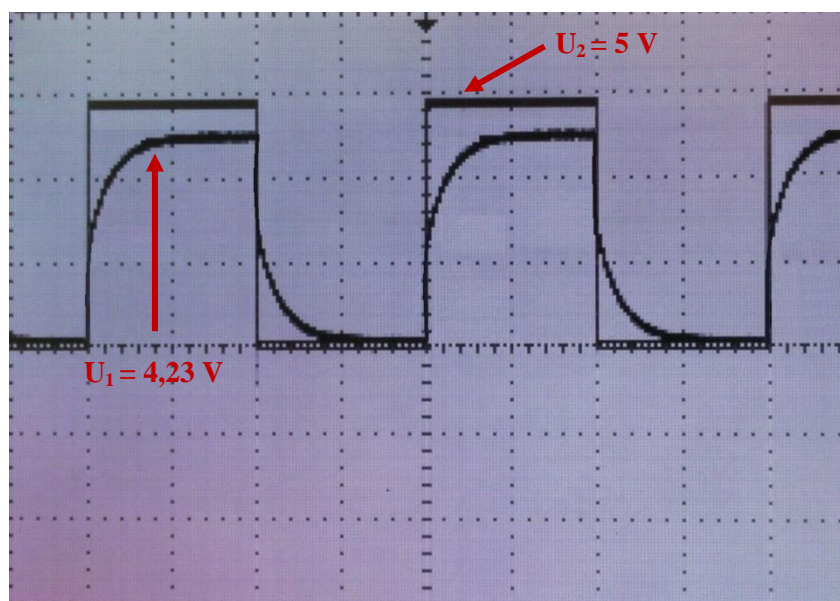
Výpočtem bylo zjištěno, že na vedení došlo k útlumu o velikosti 1,26 dBu.

	U [V]	A [dBu]
U <sub>1</sub>	1,55	0
U <sub>2</sub>	1,34	1,26

Tab. 10: Tabulka hodnot

### 5.1.2.2 Obnovení úrovně signálu na opakovači

Tímto měřením jsem simuloval situaci, kdy došlo k obnovení úrovně signálu na opakovači.



**Obr. 46: Obnovení úrovně signálu na opakovači**

Z předchozího průběhu je patrné, že došlo k obnovení hladiny i tvaru vstupního signálu. Výpočet hodnoty, o kolik byla hladina signálu obnovena (zesílena) proběhl pomocí následujícího vzorce (8):

$$S_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{5}{4,23} = 1,45 \text{ dBu} \quad (39)$$

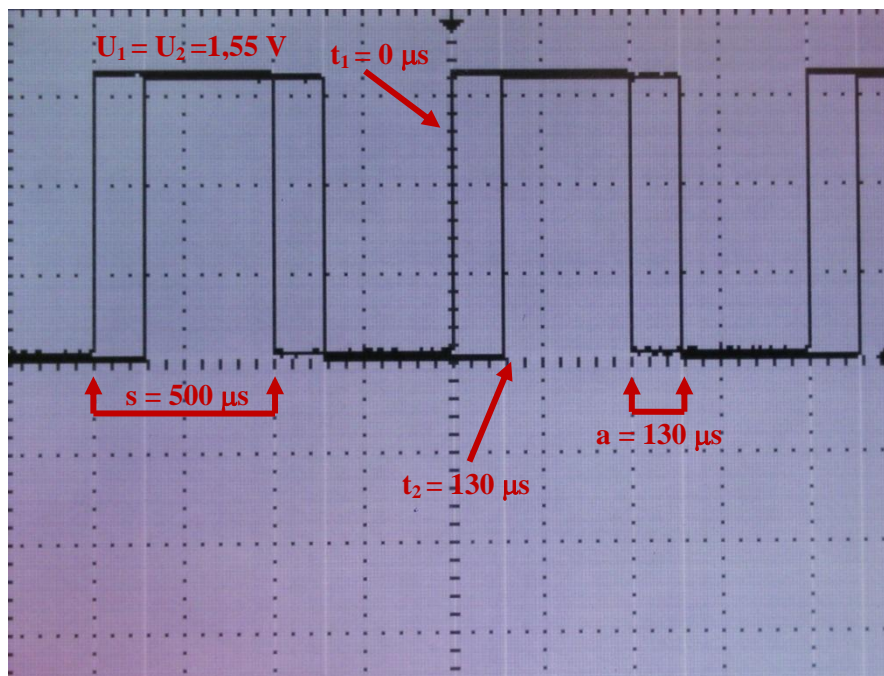
Výpočtem a z naměřených hodnot bylo zjištěno, že opakovač obnovil (zesílil) hladinu signálu o 1,45 dBu.

	U [V]	S [dBu]
<b>U<sub>1</sub></b>	4,23	<b>0</b>
<b>U<sub>2</sub></b>	5	<b>1,45</b>

**Tab. 11: Tabulka hodnot**

### 5.1.2.3 Zkreslení tvaru impulzu

Smyslem tohoto měření bylo poukázat na fázové posunutí (jitter) u digitálního signálu. Na následujícím obrázku je tento stav znázorněn.



Obr. 47: Jitter

Ze znalosti naměřených časů si můžeme jednoduše vypočítat míru posunutí impulzu. K tomuto využijí následující vzorec (20):

$$\delta = \frac{s}{a} = \frac{\Delta t}{a} = \frac{130 - 0}{500} = 0,26 \quad (40)$$

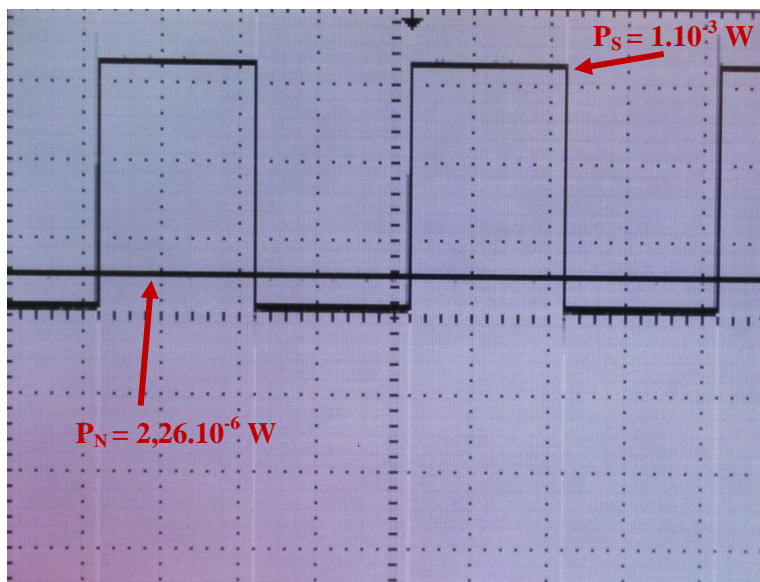
Tímto jsem vypočítal hodnotu míry posunutí  $\delta$ . Tato hodnota bývá nejčastěji vyjádřena v procentech. V našem případě tedy vyšla míra posunutí  $\delta = 26 \%$ .

$t_1$ [s]	$t_2$ [s]	$a = \Delta t$ [s]	$s$ [s]	$\delta$ [-]
0	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0,26

Tab. 12: Tabulka hodnot

#### 5.1.2.4 Šum

Následujícím měřením jsem simuloval vliv šumu na přenášený digitální signál. Zachytil jsem dva snímky průběhů. První snímek znázorňuje signál, který byl ovlivněn neaditivním šumem. Na následujícím obrázku je tento průběh zachycen.



Obr. 48: Neaditivní šum

Dosažením výkonu signálů do následujícího vzorce můžeme vypočítat hodnotu SNR:

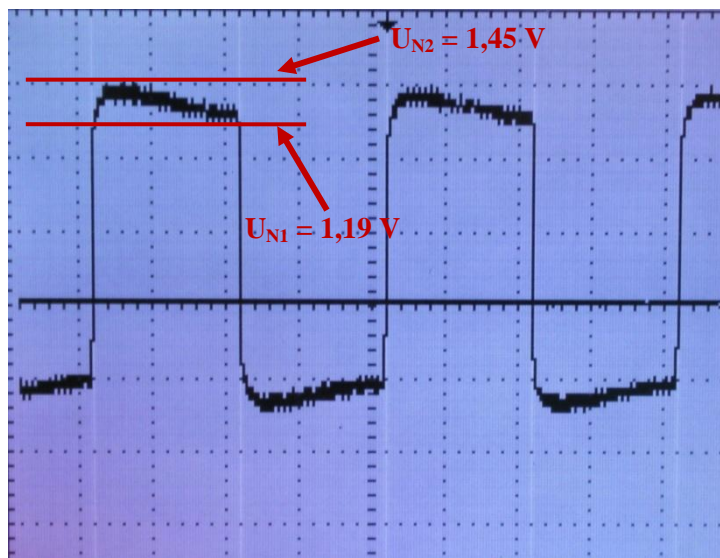
$$SNR = 10 \log \left| \frac{P_S}{P_N} \right| = 10 \log \left| \frac{1.10^{-3}}{2,26.10^{-6}} \right| = 26,5 \text{ dB} \quad (41)$$

Výpočtem byla zjištěna hodnota SNR, která je 9,47 dB.

$P_S$ [W]	$P_N$ [W]	SNR [dB]
$1.10^{-3}$	$2,26.10^{-6}$	26,5

Tab. 13: Tabulka hodnot

Na následujícím snímku je znázorněn další průběh signálu. V tomto případě došlo k součtu obou signálů, jak rušeného, tak i rušivého. Na následujícím průběhu je tedy znázorněn vliv aditivního šumu na digitální signál. Na obrázku je kurzorem vyznačena osa x. Je vyznačena z toho důvodu, aby bylo patrné, že vlivem šumu došlo i k posunutí signálu podél osy y.



**Obr. 49: Aditivní šum**

U tohoto obrázku můžeme provést výpočet kolísání napětí  $\Delta U$ :

$$\Delta U = U_{N2} - U_{N1} = 1,45 - 1,19 = 0,26V \quad (42)$$

$U_{N1}$ [V]	$U_{N2}$ [V]	$\Delta U$ [V]
1,19	1,45	<b>0,26</b>

**Tab. 14: Tabulka hodnot**

#### 5.1.2.5 Přeslech na vedení

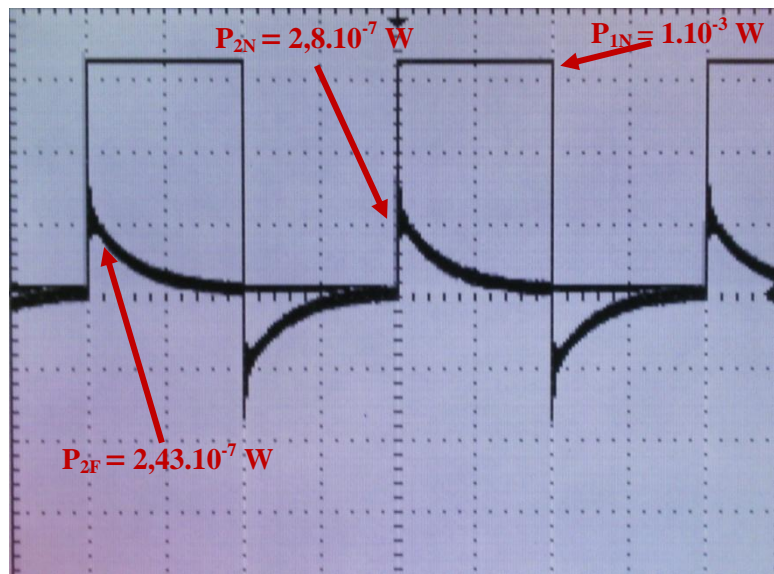
Pro měření jsem využil náhradního zapojení z obrázku č. 42. Toto vedení svými fyzikálními vlastnostmi zastoupilo reálné vedení. Hodnoty, které byly v tomto zapojení použity, byly následující:

$$C = 22 \text{ pF}$$

$$L = 33 \text{ mH}$$

$$Z_0 = 82 \text{ k}\Omega$$

Uvedu zde pouze jeden snímek průběhů, protože průběhy signálů jak na blízkém konci, tak i na vzdáleném konci rušeného vedení vypadaly v tomto případě téměř identicky.



**Obr. 50: Přeslech NEXT a FEXT**

Nejdříve spočítám přeslech NEXT na blízkém konci vedení. Výpočet provedu podle následujícího vzorce (24):

$$A_{NEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \right) = 10 \log \left( \frac{1 \cdot 10^{-03}}{2,8 \cdot 10^{-07}} \right) = 35,5 \text{ dB} \quad (43)$$

Následuje výpočet přeslechu FEXT na vzdáleném konci vedení (25):

$$A_{FEXT} = 10 \log \left( \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \right) = 10 \log \left( \frac{1 \cdot 10^{-03}}{2,43 \cdot 10^{-07}} \right) = 36,1 \text{ dB} \quad (44)$$

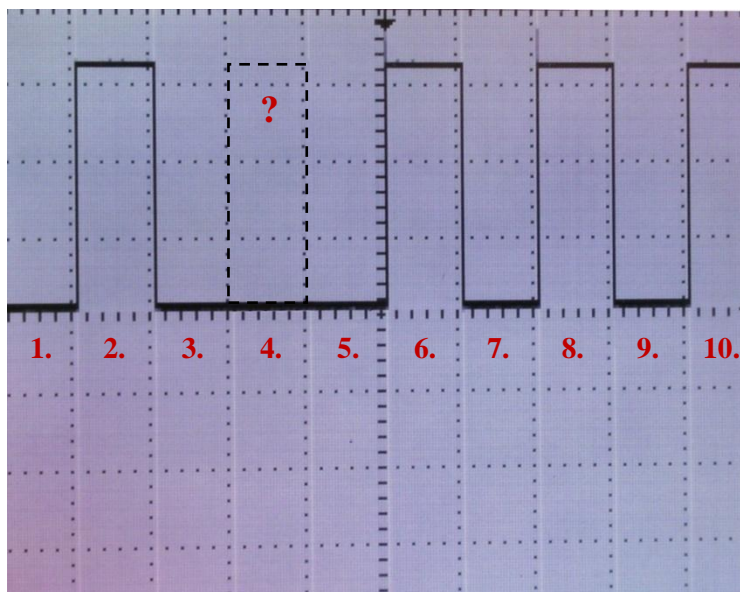
$P_{1N}$ [W]	$P_{2N}$ [W]	$P_{2F}$ [W]	$A_{NEXT}$ [dB]	$A_{FEXT}$ [dB]
$1 \cdot 10^{-3}$	$2,82 \cdot 10^{-7}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	<b>35,5</b>	<b>36,1</b>

**Tab. 15: Tabulka hodnot**

### 5.1.2.6 Měření bitové chybovosti

Toto měření spočívalo ve vygenerování a zachycení posloupnosti několika digitálních symbolů. Konkrétně tato posloupnost byla následující: 0100010101.





**Obr. 51: Posloupnost symbolů**

Nyní můžeme pro demonstrativní účely předpokládat, že při přenosu tohoto signálu byl tento ovlivněn deformačním vlivem, který způsobil změnu hodnoty jednoho z vysílaných symbolů. V přijímači došlo k příjmu následující posloupnosti: 0101010101. Třetí symbol vyslané posloupnosti byl tedy v přijímači vyhodnocen jako hodnota 1. Vyslán však byl symbol 0. Nyní mohou spočítat hodnotu bitové chybovosti BER. Výpočet provedu podle následujícího vzorce (26):

$$BER = \frac{n_E}{n_T} = \frac{1}{10} = 0,1 \quad (45)$$

Výpočtem byla zjištěna hodnota bitové chybovosti BER = 0,1. Vyjádřeno v procentech, došlo k příjmu 10 % chybných symbolů.

$n_E$ [-]	$n_T$ [-]	BER [-]
1	10	0,1

**Tab. 16: Tabulka hodnot**

## 5.2 PREZENTACE PRAKTICKÝCH MĚŘENÍ

Viz příložené CD.

## 6. ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval problematikou spojenou s přenosem analogových a digitálních signálů a vlivy, kterými mohou být tyto přenášené signály různě deformovány.

První kapitoly této práce jsem věnoval teoretickému úvodu do této problematiky. Nejdříve jsem se zabýval vlivy, které jsou spjaty s přenosem analogového signálu. V další kapitole jsem rozebral vlivy, které ovlivňují přenos signálu digitálního.

V další části této práce jsem se snažil aplikovat nabyté teoretické poznatky, které jsem získal při psaní bakalářské práce, abych popsal přenosy signálů ve vybraných konkrétních sítích. Zde jsem se podrobněji věnoval některým zástupcům z přístupových i transportních sítí. Jako příklad mohu vzpomenout klasickou telefonní síť a integrovanou síť digitálních služeb ISDN.

V poslední části práce jsem provedl rozbor a prezentoval výsledky měření, které jsem provedl jako praktický výstup plynoucí z bakalářské práce. Měření spočívalo v simulaci různě deformovaných signálů.

Vypracováním této práce jsem si vytvořil souhrnnou představu o rozdílech při přenosu analogového a digitálního signálu. Praktickým měřením jsem si ověřil získané teoretické poznatky.

## 7. LITERATURA

- [1] Václav Sobotka, *Přenosové systémy I. Přednášky*, ČVUT Praha, 1991
- [2] Karol Blunár, Martin Vaculík, Tatiana Kováčiková, *Telekomunikační technika I.*, Praha, 1990, ISBN 80-7100-024-8
- [3] Karol Blunár, Zdeněk Diviš, *Telekomunikační sítě, 2. Díl*, VŠB-TU Ostrava, 2006, ISBN 80-248-0391-7
- [4] K. V. Prasad, *Principles of Digital Communication Systems and Computer Networks*, Charles River Media, 2003, ISBN 15-8450-329-7
- [5] Arie F. Arbel, *Analog signal processing and instrumentation*, Cambridge University Press, 1980, ISBN: 05-2122-469-1
- [6] František Smola, *Telegrafní technika*, SNTL 1959
- [7] Leoš Maršálek. *Optická vlákna* [online]. 2006. Dostupné z WWW: <<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>.
- [8] Katedra telekomunikační techniky ČVUT Praha. *Bezdrátové sítě v telekomunikacích* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=2803>>.
- [9] Katedra telekomunikační techniky ČVUT Praha. *Veličiny a jednotky I.* [online]. Dostupné z WWW: <[http://www.comtel.cz/cz/?s=vyuka&l=pred\\_vyber&select=laborky&kod=107](http://www.comtel.cz/cz/?s=vyuka&l=pred_vyber&select=laborky&kod=107)>.
- [10] Katedra elektrotechnické fakulty ČVUT Praha. *Jevy ovlivňující útlum symetrických kabelových vedení* [online]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004120201>>.
- [11] Martin Havlan, *Multiplexní hierarchie PDH* [online]. Dostupné z WWW: <[www.comtel.cz/files/download.php?id=4525](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4525)>.
- [12] Martin Havlan, *Měření v telekomunikačních sítích - 2. část* [online]. Dostupné z WWW: <[www.comtel.cz/files/download.php?id=4596](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4596)>.
- [13] Jiří Vodrážka, *PCM I. Řádu* [online]. Dostupné z WWW: <[www.comtel.cz/files/download.php?id=600](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=600)>.
- [14] J. Vodrážka, *Modelování přeslechů* [online]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004072911>>.
- [15] AIS spol. s.r.o., Antonín Popelka. *Metody zabezpečení dat ze sběrové centrály a koncových zařízení*, [online]. 2006. Dostupné z WWW: <[www.ais-brno.cz/vyvoj/zprava\\_10.pdf](http://www.ais-brno.cz/vyvoj/zprava_10.pdf)>.

## **8. OBSAH CD**

- Bakalářská práce ve formátu PDF
- Prezentace praktických měření ve formátu Powerpoint