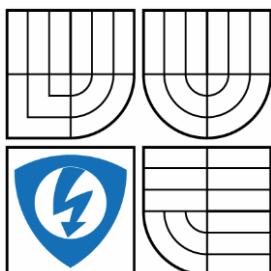


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SPEKTRÁLNÍ ANALYZÁTOR N1996A-503 A NEJISTOTY MĚŘENÍ

SPECTRUM ANALYSER N1996A-503 AND MEASUREMENT UNCERTAINTY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

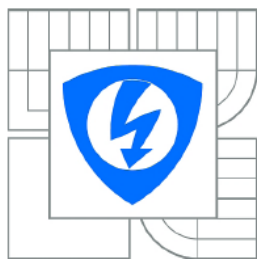
Bc. MARTIN TROJAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Trojan

ID: 77978

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Spektrální analyzátor N1996A-503 a nejistoty měření

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte technickou dokumentaci spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A a vypracujte popisný přehled měřících funkcí přístroje včetně technických parametrů.
2. Vypracujte pracovní postup pro vyhodnocování standardních nejistot přímého měření spektrálním analyzátozem Agilent CSA N1996A při měření útlumu a poruch na kabelu.
3. Realizujte zkušební měření vybraných parametrů na vzorcích kabelů včetně výpočtu nejistot měření.
4. Dbejte pokynů vedoucí práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Technická dokumentace přístroje Agilent CSA N1996A.
- [2] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: Nejistoty v měření I až V, soubor článků v časopise AUTOMA, č. 7-8/2001, č. 10/2001, č. 12/2001, č. 4/2002 a č. 5/2002

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Hlavním cílem této diplomové práce je seznámení čtenáře se spektrálním analyzátozem Agilent CSA N1996A. Práce vysvětluje všechny měřicí funkce tohoto přístroje, ovládací prvky a uvádí některé technické parametry. V další části se zabývá měřením na koaxiálních kabelech, proto je jedna celá kapitola věnována koaxiálním kabelům a vedení obecně.

Zbytek této diplomové práce se již zabývá problematikou nejistot měření. Nejprve je uveden obecný postup vyhodnocení nejistot, následuje praktická část. V praktické části proběhlo měření vzdálenosti k poruše a útlumu na koaxiálním kabelu. Celkem bylo měřeno na 4 vzorcích kabelu. V závěru praktické části jsou uvedeny naměřené hodnoty včetně nejistot měření a výsledky jsou shrnuty v závěrečném odstavci.

Klíčová slova

Spektrální analyzátor, Agilent CSA N1996A, nejistota, koaxiální kabel

Abstract

The main target of this master's thesis is to introduce the reader with the spectrum analyzer, Agilent N1996A CSA. This work explains all the functions of this measuring instrument, control elements and presents some technical parameters. The next part of this thesis deals with the measurement of coaxial cables, so that is why a whole chapter is devoted to coaxial cables and conductors in general.

The rest of this thesis deals with issues of measurement uncertainties. This part contains the general procedure for the evaluation of uncertainty, followed by a practical part. The practical part contains measurement of distance to fault and return loss. Measurements were made on 4 samples of coaxial cable. At the end of the practical parts the measured values including the uncertainties and results are summarized in the final paragraph.

Keywords

Spectrum analyzer, Agilent CSA N1996A, uncertainty, coaxial cable

Bibliografická citace:

TROJAN, M. *Spektrální analyzátor N1996A-503 a nejistoty měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 88s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Spektrální analyzátor N1996A-503 a nejistoty měření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

OBSAH

1.	ÚVOD	11
2.	CHYBY MĚŘENÍ.....	12
3.	NEJISTOTY MĚŘENÍ A LEGISLATIVA.....	14
4.	ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE	16
5.	NEJISTOTY	18
6.	SPEKTRÁLNÍ ANALYZÁTOR AGILENT CSA N1996A.....	38
6.1	Měřicí funkce přístroje	44
6.1.1	Funkce Spektrum analyzer	44
6.1.2	Funkce Channel Analyzer	45
6.1.3	Funkce Stimulus Response.....	45
7.	TEORIE PŘENOSOVÉHO VEDENÍ.....	53
7.1	Parametry vedení	54
7.2	Koaxiální kabely.....	56
8.	NEJISTOTY MĚŘENÍ PARAMETRŮ AGILENT CSA N1996A	64
8.1	Obecný postup výpočtu standardních nejistot	64
8.1.1	Nejistota měření vzdálenosti k poruše.....	65
8.1.2	Nejistota měření útlumu kabelu	67
8.2	Výpočet nejistoty měření na vzorcích koaxiálních kabelů	68
8.2.1	Kabely Belden	68
8.2.2	Kabel Draka.....	71
8.2.3	Kabel RG11.....	72
8.3	Zpracování naměřených hodnot	73
8.3.1	Měření vzdálenosti k poruše.....	75
8.3.2	Měření útlumu	79
8.4	Přehled výsledků.....	82
8.5	Shrnutí dosažených výsledků	83
9.	Závěr.....	85

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Čelní panel Agilent CSA N1996A	40
Obrázek 2: Zadní panel Agilent CSA N1996A	41
Obrázek 3: Měřeného zařízení při dvoukanálovém měření	47
Obrázek 4: Nastavení měřicího signálu spektrálního analyzátoru Agilent.....	50
Obrázek 5: Testovací signál spektrálního analyzátoru na osciloskopu s paměťovou obrazovkou.....	51
Obrázek 6: Zobrazení FFT testovacího signálu spektrálního analyzátoru Agilent	52
Obrázek 7: Šíření rovinných vln vedením	56
Obrázek 8: Průměr koaxiálního kabelu	60
Obrázek 9: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m.....	69
Obrázek 10: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m...	70
Obrázek 11: Naměřené parametry d a RL kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m	71
Obrázek 12: Naměřené parametry d a RL kabelu RG-11, délka 0,88 m.....	72

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Možný příklad použití bilanční tabulky nejistot.....	31
Tabulka 2: Další příklad použití bilanční tabulky nejistot.....	31
Tabulka 3: Závislost přesnosti měření útlumu kabelu	67
Tabulka 4: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m	73
Tabulka 5: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m	73
Tabulka 6: Naměřené parametry d a RL kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m	74
Tabulka 7: Naměřené parametry d a RL kabelu RG-11, délka 0,88 m	74
Tabulka 8: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m.....	75
Tabulka 9: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m.....	75
Tabulka 10: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m.....	76
Tabulka 11: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu RG-11, délka 0,88 m.....	76
Tabulka 12: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m.....	79
Tabulka 13: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m.....	79
Tabulka 14: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m	80
Tabulka 15: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu RG-11, délka 0,88 m	80
Tabulka 16: Naměřené hodnoty na kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m	82
Tabulka 17: Naměřené hodnoty na kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m	82
Tabulka 18: Naměřené hodnoty na kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m....	83
Tabulka 19: Naměřené hodnoty na kabelu RG-11, délka 0,88 m.....	83

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

u_A	nejistota typu A
u_B	nejistota typu B
$\bar{x}$	výběrový aritmetický průměr
σ	směrodatná odchylka výběrového průměru
k_R	koeficient rozšíření
u_C	kombinovaná nejistota
U	rozšířená nejistota
A	koeficient citlivosti
d	naměřená vzdálenost k poruše
V_{REL}	je přenosová rychlost kabelu (relativně k c), neboli činitel zkrácení
f_R	použitý frekvenční rozsah
P	počet bodů kalibrace frekvenčního pásma
R	rozlišení nejmenší možné vzdálenosti mezi dvěma poruchami kabelu
f_m	mezní kmitočet
v_f	fázová rychlost vlny
v_{sk}	skupinová rychlost
λ_g	délka vlny ve vedení
$u_B(d)$	standardní nejistota typu B vzdálenosti k poruše kabelu
f_{Rp}	přesnost frekvenčního rozsahu
A_f	frekvenční koeficient citlivosti
$u_B(RL)$	standardní nejistota typu B útlumu kabelu
δ_p	nepřesnost měření útlumu
δ_R	je rozlišení při měření útlumu

1. ÚVOD

Nedílnou součástí každého měření by mělo být zjištění, jak dalece koresponduje naměřená hodnota se skutečnou hodnotou. Tato skutečnost byla přibližně celé jedno století zohledňována pouze pomocí chyb měření. Nyní je tato metoda nahrazována novou koncepcí nejistot. Jedná se tedy o poměrně novou metodiku zpracování výsledků měření. V současné době je k dispozici dostatečné množství literárních zdrojů, které se touto problematikou zabývají.

První část této diplomové práce seznamuje čtenáře s problematikou při výpočtech nejistot měření a pro srovnání uvádí dříve používanou koncepci chyb měření.

Dále následuje seznámení s používaným přístrojem. Jedná se spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A. Tento přístroj nabízí mnoho kromě samotné spektrální analýzy i několik dalších funkcí, které popisuje tato diplomová práce. Jedná se o poměrně složitý přístroj, čemuž nasvědčuje i rozsah technické dokumentace poskytované výrobcem. Pro potřeby této diplomové práce byly použity 3 hlavní dokumenty, o celkovém rozsahu 824 stran. V této kapitole byl kladen důraz zejména na funkci měření vzdálenosti k poruše a útlumu na koaxiálním kabelu, jež byla předmětem dalšího zájmu této diplomové práce.

Dále následuje krátké seznámení se s problematikou vedení a koaxiálních kabelů.

Poslední kapitola se již zabývá problematikou nejistot měření vzdálenosti k poruše a útlumu na koaxiálním kabelu. Kapitola je rozdělena na dvě části, první část se zabývá obecným postupem a následuje část shrnující výsledky realizovaných měření. Před samotným určováním nejistot bylo nutné určit možné zdroje nejistot a posoudit jejich vliv na samotné měření. Pro zjištění možných zdrojů nejistot bylo opět čerpáno převážně z technické dokumentace spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A.

2. CHYBY MĚŘENÍ

Mnoho let, přibližně celé jedno století, bylo zvykem vyhodnocovat naměřené hodnoty pomocí chyb měření. Chyby měření se dělí do 3 základních skupin:

1. soustavné chyby (systematické),
2. nahodilé chyby (náhodné),
3. omyly.

Soustavné chyby při opakovaném měření mají stále stejnou polaritu i velikost. Protože jsou známy příčiny jejich vzniku, můžeme většinu těchto chyb alespoň zmenšit opravou. Soustavné chyby jsou způsobeny například vlivem teploty, kmitočtu, spotřebou přístrojů anebo nepřesností pozorování.

Příčina vzniku nahodilých chyb není známá, proto můžeme jejich vznik pouze zmenšit vícenásobným měřením nebo třeba lepším uspořádáním měření. Nahodilé chyby zapříčiňují při stejných podmínkách měření různé výsledky.

Dále je chyby možné dělit podle matematického vyjádření:

- absolutní chyba měření,
- relativní chyba měření.

Absolutní chyba měření je rozdíl mezi hodnotou naměřenou a hodnotou správnější. Uvádí v jednotkách měřené veličiny. Záporně vzatá absolutní chyba měření se nazývá korekce, která slouží k vyhodnocení přesnosti měřícího přístroje. Pokud je korekce přičtena k naměřené hodnotě, je získána konvenčně pravá hodnota.

Relativní chyba měření se uvádí v procentech a vypočítá se jako poměr absolutní chyby a naměřené hodnoty. Slouží k vyhodnocení přesnosti měřící metody.

Podle zdrojů chyb je možné chyby dělit na:

- chyby subjektivní,
- chyby objektivní.

Chyby subjektivní jsou způsobeny především chybou obsluhy, například špatným odečtením naměřené hodnoty z analogového přístroje.

Objektivní chyby zavinují objektivní příčiny, jako jsou například chyby použité metody, chyby měřících přístrojů, chyby způsobené použitými součástkami (přechodový odpor, odpor přívodů) nebo chyby způsobené rušivými vlivy (cizí magnetické pole, teplota).

3. NEJISTOTY MĚŘENÍ A LEGISLATIVA

Povinnost vyjadřování nejistot měření vyžaduje mnoho evropských zákonů a norem.

Organizace ISO v normě ISO 9000, článku 4.11 vyžaduje pro kontrolní, měřicí a zkušební zařízení povinnost používat zařízení způsobem, který zabezpečuje, že nejistota měření je známá a je ve shodě s požadovanou měřicí schopností.

Dále normy ISO stanoví vztahy mezi dodavateli a odběrateli. Doporučují několik postupů pro přejímku výrobků, zde ovšem nastává problém, který ze všech postupů zvolit. Norma ISO 10012-1 v článku 4.6 stanoví, že při vykonávání měření, uvádění výsledků a jejich využívání musí vzít dodavatel do úvahy všechny závažné nejistoty v procesu měření, včetně těch, které jsou znakem měřicího zařízení a těch, ke kterým přispívají individuální postupy pracovníků a okolního prostředí.

Tatáž norma v článku 4.3 doporučuje specifikovat charakteristiky měřicího procesu, které odpovídají jeho plánovanému použití. Tímto je myšleno například nejistoty při používání, stabilita nebo rozsah.

Mezinárodní elektrotechnická komise ve směrnici 25, článku 13.2 vyžaduje vydání prohlášení o odhadnuté nejistotě kalibrace anebo výsledku zkoušky. Dále v článku 13.2 uvádí, že laboratoř musí při všech kalibracích a zkouškách používat vhodných metod a postupů.

Evropská norma EN 45 001 v článku 5.4.3 stanoví, že zprávy o zkouškách musí obsahovat prohlášení o nejistotě měření a současně vyžaduje, aby byly výsledky kvantitativních zkoušek uvedeny společně s vypočtenou nebo odhadnutou nejistotou.

V České republice definuje požadavky na vyjadřování vlastností elektrických a elektronických měřicích zařízení a dále uvádí přechod od vyjadřování pomocí chyb na vyjadřování pomocí nejistot měření norma ČSN EN 60359 „Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností“. Tato norma nahrazuje předchozí normu ČSN IEC 359 (35 6564) „Vyjadřování vlastností elektrického a elektronického měřicího zařízení“. Nahrazením této normy je nutné uvádět přesnost pomocí nejistot.

Dále tato norma uvádí princip vyjadřování přesností pomocí nejistot měření, pravidla pro tvorbu kalibračních diagramů, uvádí používané definice a předvádí způsob vyjadřování nejistot na praktických příkladech.

Související normy:

- IEC 60050 (300):2001 „Mezinárodní elektrotechnický slovník – Elektrická a elektronická měření a měřicí přístroje“
- ČSN ISO 31 (01 1300) „Veličiny a jednotky“
- ČSN 01 0115 „Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii“
- ČSN EN 61187 (35 6506) „Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Průvodní dokumentace“
- ČSN IEC 51 (35 6203) „Elektrické měřicí přístroje přímo působící ukazovací analogové a jejich příslušenství“

Toto je není samozřejmě úplný výčet všech norem vyžadujících vyjadřování přesnosti pomocí nejistot měření, těchto je mnohem víc. Zde jsou pouze uvedeny některé z nich. Cílem této kapitoly bylo naznačit, že v dnešní době je již vyjadřování nejistot pevně zakotveno v mnoha normách.

4. ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

Aritmetický průměr – součet hodnot vydělený jejich počtem

Koeficient citlivosti související se vstupním odhadem – změna hodnot výstupního odhadu jako důsledek změny hodnot vstupního odhadu podělená změnou hodnot tohoto vstupního odhadu

Koeficient pokrytí – číselný faktor, jímž se násobí standardní nejistota měření s cílem zjistit rozšířenou nejistotu měření

Konfidenční pravděpodobnost – Obvykle velký podíl hodnot z rozdělení, které je možné přiřadit veličině jako výsledek měření

Korelace – vztah mezi dvěma nebo více náhodnými veličinami v rámci rozdělení dvou nebo více náhodných veličin

Koeficient korelace – Míra relativní vzájemné závislosti dvou náhodných veličin rovnající se podílu jejich kovariance a kladné odmocniny součinu jejich rozptylů

Kovariance – míra vzájemné závislosti dvou náhodných proměnných, která se rovná očekávané hodnotě součinu odchylek dvou náhodných veličin od jejich očekávaných hodnot

Metoda vyhodnocení typu A – metoda vyhodnocení nejistoty měření pomocí statické analýzy série měření

Metoda vyhodnocení typu B – stanovení nejistoty metodou založené na jiném principu, než je statické vyhodnocení série pozorování

Měřená veličina – konkrétní veličina, která je předmětem měření

Náhodná veličina – veličina, která může nabývat jakékoliv hodnoty ze specifikované množiny hodnot a které je přiřazena hustota pravděpodobnosti

Nejistota měření – parametr související s výsledkem měření, který charakterizuje rozsah hodnot, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině. Často je používán pouze zkrácený název nejistota.

Nejlepší měřicí schopnost – nejmenší nejistota měření, které může laboratoř v rámci své akreditace dosáhnout při provádění více či méně rutinních kalibrací téměř ideálních měřicích etalonů s cílem definovat, realizovat, uchovat či reprodukovat jednu či více jednotek dané veličiny, nebo které může dosahovat při více či méně rutinně prováděných kalibracích téměř ideálních měřicích zařízení určených pro měření dané veličiny

Pravá hodnota veličiny – hodnota, která je ve shodě s definicí dané blíže určené veličiny

Průřezový odhad rozptylu – odhad výběrového rozptylu z dlouhé série měření té stejné měřené veličiny za nezměněných podmínek

Vstupní odhad – hodnota odhadu vstupní veličiny používaná při vyhodnocení výsledku měření

Vstupní veličiny – veličiny, na kterých vzhledem ke způsobu stanovení výsledku měření závisí měřená veličina

Výstupní odhad – hodnota odhadu vstupní veličiny používaná při vyhodnocení výsledku měření

Výstupní veličina – veličina, jenž při vyhodnocování měření reprezentuje měřenou veličinu

Relativní standardní nejistota měření – standardní nejistota veličiny vydělená odhadem této veličiny

Rozdělení pravděpodobnosti – funkce vyjadřující pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude určité hodnoty nebo hodnoty z určitého intervalu

Rozptyl – očekávaná hodnota druhých mocnin odchylek náhodné veličiny od její očekávané hodnoty

Rozšířená nejistota – veličina definující interval okolo výsledku měření, který může zahrnout velkou část rozdělení, které je možné přiřadit k měřené veličině

Směrodatná odchylka – druhá odmocnina rozptylu náhodné veličiny

Standardní nejistota měření – nejistota měření vyjádřená jako směrodatná odchylka

Výběrová směrodatná odchylka – druhá odmocnina výběrového rozptylu

Výběrový rozptyl – Veličina charakterizující rozptýlení výsledků série n pozorování stejné měřené veličiny získaná jako druhá odmocnina výběrové odchylky

5. NEJISTOTY

Jako nejistota měření je obvykle definován určitý parametr, který bezprostředně souvisí s výsledkem a charakterizuje rozpětí hodnot, v nichž se nachází výsledná naměřená hodnota vůči hodnotě pravé. Skutečný výsledek se tedy pohybuje v určitém intervalu okolo naměřené hodnoty. Snahou při měření je tedy „toleranční pole“ výsledku co nejvíce zmenšit. Je ovšem nemožné zajistit nulovou odchylku. Samotná nejistota se skládá z několika složek a uvádí všechny nedokonalosti výsledku měření.

Legislativa

Koncept nejistot souvisí mimo jiné s normami ISO i ostatními mezinárodními normami. Tyto předpisy většinou definují pojem nejistoty měření, uvádějí ho do širších souvislostí a vysvětlují i důvody použití koncepce nejistot v praxi. Normy EN i ISO vyžadují uvádění nejistoty měření v kalibračních certifikátech. Nejistoty uvedené u výsledku slouží zároveň jako ukazatel kvality měření a je nadále uvedenou hodnotu možné porovnávat s výsledky jiných laboratoří nebo s hodnotami uvedenými ve specifikacích. Pokud laboratoř žádá o akreditaci, musí se při vypracování zpráv řídit normami EAL. Laboratoře musí řádně zdokumentovat metodiku v oblasti hodnocení nejistoty při akreditovaných činnostech. Musí být schopny doložit kontrolnímu orgánu správnost vyhodnocení nejistoty, proto musí vést záznamy o hodnocení složek nejistot, dokumentaci jednotlivých výpočtů, přijatých předpokladů a je-li to možné doplnit materiály o výsledky mezilaboratorních porovnání.

Rozdělení nejistot

Nejistoty se skládají z několika jednotlivých nejistot, nebo-li složek nejistot. K nalezení velikosti složek nejistot jsou používány dvě metody:

- statické zpracování naměřených údajů (nejistota typu A u_A),
- jiné než statické zpracování naměřených údajů (nejistota typu B u_B).

Nejistoty, které byly získány metodou typu A jsou někdy také nazývány nejistoty typu A a nejistoty získané metodou typu B bývají označovány jako nejistoty typu B. Kombinovaná nejistota u_C se určí jako odmocnina součtu čtverců nejistot typu A i B.

Vyhodnocení nejistot metodou typu A

Metoda je založena na statické analýze opakované série měření, čímž se podobá náhodným chybám. Měření je opakováno více než jedenkrát, odhad výsledné hodnoty je reprezentován hodnotou výběrového aritmetického průměru $\bar{x}$ (5.2). Příslušná nejistota k odhadu se určí jako směrodatná odchylka σ výběrového průměru. Nejistoty typu A se značí u_A , její hodnota klesá s počtem měření, určí se podle rovnice (5.1).

$$u_A = \sigma_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \text{ kde} \quad (5.1)$$

u_A je standardní nejistota typu A,

σ_x je směrodatná odchylka,

n je počet naměřených hodnot,

x jsou naměřené hodnoty,

$\bar{x}$ je aritmetický průměr naměřených hodnot.

Při použití tohoto vztahu je vhodné provést více měření za stejných podmínek (více než 10), pro menší počet měření je tato metoda méně spolehlivá, odhad výsledné hodnoty se určí podle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \text{ kde} \quad (5.2)$$

$\bar{x}$ je aritmetický průměr naměřených hodnot,

n je počet naměřených hodnot,

x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty.

Standardní nejistota tohoto výsledku odpovídá směrodatné odchylce aritmetického průměru σ_x , značí se jako $u_A(x)$ a vypočítá se podle vztahu (5.1).

Tento vztah je použitelný pouze pro dostatečný počet měření n , předpokladem je, že $n > 10$. Pokud je měřicí proces statisticky řízen a je-li znám tzv. průřezový rozptyl σ_{pr} charakterizující rozptýlení řízeného měřicího procesu, je možné určit standardní nejistotu typu A podle vztahu (5.3).

$$u_A = \frac{\sigma_{pr}}{\sqrt{n}}, \text{ kde} \quad (5.3)$$

u_A je standardní nejistota typu A,

σ_{pr} průřezový rozptyl,

n je počet opakování měření.

Pokud měla série měření jiné vlastnosti, než je výše uvedeno je nutné použít jiných vzorců, než jsou zde uvedeny. Vzniklou situaci je poté vhodné řešit za pomoci statistika.

Vyhodnocení nejistot metodou typu B

Metoda vyhodnocování nejistot typu B u_B je založena, jak již bylo uvedeno, na jiných než statistických metodách analýzy série pozorování. Tato metoda je podobná systematickým chybám, ale lze ji použít i pro odhad vlivu náhodných chyb. Standardní nejistota typu B se určuje pomocí racionálního úsudku na základě všech dostupných informací, například pomocí údajů výrobce měřicí techniky, zkušeností z předchozích sérií měření, údajů získané kalibrací a z certifikátů nebo nejistot referenčních údajů převzatých z příruček.

Stanovení nejistot typu B je obtížnější než stanovení nejistot typu A a vychází hlavně ze zkušeností a praxe. Správným postupem je možné dojít ke stejné spolehlivé hodnotě nejistoty jako při použití nejistot typu A, zejména pokud bylo pro stanovení nejistot typu A použito relativně malého počtu statisticky nezávislých pozorování.

Pokud je známá pouze jedna naměřená hodnota, použije se tato hodnota k odhadu a standardní nejistota musí být převzata ze stejného zdroje. Pokud toto není možné, musí být hodnota převzata z důvěryhodných údajů nebo odhadnuta na základě zkušeností. Je-li možné na základě teorie předpokládat pro naměřenou veličinu určité pravděpodobnostní rozdělení, je třeba použít jako odhad příslušnou očekávanou hodnotu a za příslušnou standardní nejistotu odmocninu rozptylu tohoto rozdělení. V případech kdy je možné odhadnout pouze horní a dolní limit je třeba použít pro popis variability veličiny X rovnoměrného rozdělení. Za nejčastější zdroje nejistot jsou označovány nedokonalosti:

- použitých měřících přístrojů a systémů,
- použitých metod měření,
- použitých přepočtových konstant při nepřímém měření,
- použitých výpočtových vztahů (např. linearizace),
- podmínek měření.

Nejistoty typu B vyjadřují známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje, nezávisí na počtu měření. Samotný výpočet nejistot typu B se liší při různých měřeních, vychází z kvalifikovaného úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině i o všech jejích případných možných změnách. Pro určení nejistot typu B mohou posloužit jako zdroje informací například:

- předcházející měření včetně jejich výsledků,
- zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřících prostředcích, měřících metodách a podmínkách měření,
- údaje z dostupné dokumentace (například kalibrační listy nebo certifikáty),
- údaje o měřících prostředcích a jejich podmínkách použití získané od výrobců,
- nejistoty referenčních údajů z různých pramenů.

Vyjádření nejistot typu B neumožňuje vyjádřit jednotný všeobecný postup, využití veškerých získaných informací závisí především na zkušenosti a znalostech experimentátora.

Je možné pouze definovat rámcový postup určování nejistot typu B a to takto:

1. Vytipování možných zdrojů $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_P$ nejistot.
2. Určení standardní nejistoty vlivem každého zdroje (převzetím z certifikátů, technické dokumentace, kalibračních listů technických norem nebo odhady pomocí příslušných metod).
3. Posouzení korelace mezi jednotlivými zdroji.
4. Určení vztahu mezi naměřenou veličinou X a jednotlivými zdroji nejistot ($Z_1 \dots Z_P$)
5. Výpočet nejistoty typu B pomocí zákona šíření nejistot.

V některých případech není přímo známá standardní nejistota způsobená vlivem určitého zdroje, poté může nastat některá ze situací, které jsou popsány na další stránce.

Známé U a k_r

Rozšířená nejistota U a koeficient rozšíření k_R může být uveden v certifikátech, dokumentaci výrobců nebo i jiných pramenech. Pokud jsou obě hodnoty známé, určí se standardní nejistota typu B daná zdrojem nejistot Z_j podle vztahu (5.4).

$$u_B(Z_j) = \frac{U}{k_R}, \text{ kde} \quad (5.4)$$

u_B(z_j) je standardní nejistota B vlivem zdroje Z_j,

U je rozšířená nejistota,

k_R je koeficient rozšíření.

Známé rozpětí normálního rozdělení

Pokud známe délku intervalu 2U v němž se zřejmě nachází většina naměřených hodnot a předpokládáme-li, že k určení tohoto intervalu bylo použito normované normální rozdělení můžeme standardní nejistotu způsobenou vlivem daného zdroje určit ze vztahu (5.5).

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_p}, \text{ kde} \quad (5.5)$$

u_B(z_j) je standardní nejistota B vlivem zdroje z_j,

U je rozšířená nejistota,

k_p je koeficient rozšíření rovný kvantilu normovaného normálního rozdělení pro pravděpodobnost P:

k_p=1,96 pro P=95%

k_p=2,58 pro P=99%

k_p=3 pro P=99,73%

atd.

Známé hranice vlivu zdroje

Pokud není možné odhadnout hranice intervalu, ve kterém se s téměř 100% jistotou nachází naměřená hodnota, je možné použít následující postup:

- odhadnou se hodnoty odchylek $\pm Z_{j\max}$ od nominální hodnoty měřené veličiny, příslušného zdroje Z_j , jejichž překročení je velice nepravděpodobné až nemožné,
- posoudí se pravděpodobnostní rozdělení v daném intervalu a určí se vhodná aproximace,
- vypočítá se standardní nejistota podle vztahu: $u_B(Z_j) = \frac{U}{k}$, kde k je hodnota příslušná ke zvolené aproximaci pravděpodobnostního rozdělení: ($k=\{2,3\}$ pro normální rozdělení, $\sqrt{6}$ pro trojúhelníkové rozdělení, $\sqrt{3}$ pro rovnoměrné rozdělení, $\sqrt{2}$ pro trojúhelníkové a 1 pro Diracovo).

Použití možných rozdělení při aproximaci:

Normální rozdělení

Aproximace pomocí tohoto rozdělení se používá tehdy, mohou-li se vyskytovat malé odchylky od jmenovité hodnoty a s rostoucí velikostí odchylky pravděpodobnost jejich výskytu klesá. Prakticky tomuto rozdělení může odpovídat použití měřicího přístroje od renomovaného výrobce a je velice pravděpodobné, že přístroj bude zdrojem pouze malých chyb.

Rovnoměrné rozdělení

V běžné praxi je tato aproximace používána nejčastěji. Používá se v případech kdy je stejná pravděpodobnost výskytu kterékoliv odchylky v daném intervalu anebo nemáme dostatečné poznatky o rozdělení výskytu odchylek.

Trojúhelníkové rozdělení

Používá se pro modelování případů podobných normálnímu rozdělení.

Bimodální rozdělení

Používá se při měření pomocí měřicího přístroje, pro který výrobce udává třídu přesnosti. Přístroj nemá menší chybu, než je uvedeno, protože by byl zařazen do přesnější třídy a ani nemůže mít větší chybu.

Použití číslicového měřicího přístroje

Specifickou nejistotou při použití číslicového měřicího přístroje je rozlišitelnost poslední platné číslice. Měření číslicových přístrojů v kvantech způsobí „zaokrouhlení“ výsledku. I při nezměněném zobrazování není nikdy nejistota nulová. Pro odhad nejistoty se používá model rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti v intervalu vymezeném rozlišovací schopností měřicího přístroje $\delta(Z_j)$. Tímto se ovšem předpokládá, že je přístroj jinak absolutně přesný. Reálné přístroje ale takto absolutně přesné nejsou. U většiny z nich se uvádí relativní chyba z měřené veličiny δ_C a chyba z rozsahu δ_R . Relativní chyba z měřené veličiny se zpravidla uvádí v procentech a chyba z rozsahu v „digitech“ nebo také v procentech. Chyba rozsahu zahrnuje také chybu rozlišení. Jeden digit odpovídá rozlišovací schopnosti přístroje. Pomocí těchto hodnot je možné stanovit absolutní chybu údaje $|\Delta_P|$ a z ní posléze určit standardní nejistotu typu B u_B . Potom se nejistota typu B určí podle vztahu (5.6.)

$$u_B(Z_j) = \frac{|\Delta_P|}{\sqrt{3}} = 0,29\Delta(Z_j), \text{ kde} \quad (5.6)$$

$u_B(z_j)$ je standardní nejistota B vlivem zdroje z_j ,

$|\Delta_P|$ je maximální odchylka přístroje, složená z chyby rozsahu a měřené hodnoty.

Použití analogového přístroje se stupnicí

Při použití analogového měřicího přístroje se stupnicí závisí schopnost odečítání na hodnotě dílku stupnice $\delta(z)$. Standardní nejistota způsobená čtením se následně určí ze vztahu (5.6).

U některých analogových měřicích přístrojů je velikost intervalu, který slouží jako předpokládaný zdroj nejistot, určený ve vztahu k dílku stupnice normou nebo jiným doporučujícím předpisem. Při návrhu analogové stupnice se předpokládá, že střední dílek stupnice má délku asi 1 mm a při čtení pouhým okem se předpokládá přesnost u laiků $\pm 0,5$ dílku a u zaškolené obsluhy $\pm 0,3$ až $0,25$ dílku. Některé stupnice mohou mít jeden dílek dlouhý asi 0,5mm, tyto stupnice se označují jako jemné, zde je odhad $\pm 0,5$ dílku vázán na patřičnou trénovanost obsluhy.

Kombinované a rozšířené nejistoty

V praxi není většinou dostačující použít pouze nejistoty typu A u_A nebo B u_B samostatně. Proto se využívá kombinovaných nejistot typu A i B. Výsledná kombinovaná nejistota se značí u_C , spočítá se jako odmocnina součtu čtverců nejistot typu A a B. Tímto je získána hodnota obsahující oba typy nejistot. Výpočet se provede podle vztahu (5.7).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \text{ kde} \quad (5.7)$$

u_C je kombinovaná nejistota,

u_A je nejistota typu A,

u_B je nejistota typu B.

Z výše uvedeného vzorce je patrné, že ne vždy je nutné sledovat oba typy nejistot. Je-li možné prokázat, že podíl některé složky je vůči druhé výrazně menší, je možné předpokládat, že se tato díky součtovému vztahu výrazně neprojeví. Tohoto lze například využít, liší-li se obě složky o řád. Některé národní předpisy Evropských států dokonce připouští vyloučení některé ze složek již při čtyřnásobném rozdílu.

Rozšířená nejistota U se používá tam, kde nestačí standardní kombinované nejistoty u_C , které udávají skutečnou hodnotu naměřené veličiny s pravděpodobností cca 60%. Stanovuje interval okolo naměřeného výsledku měření, v němž se s určitou pravděpodobností nalézá skutečný výsledek. Rozšířená nejistota měření U je kombinovaná nejistota u_C rozšířená koeficientem rozšíření k_R , který závisí na požadované úrovni konfidence a na efektivním počtu stupňů volnosti výstupní měřené veličiny. Rozšíření se určí podle vztahu (5.8).

$$U = k_R \cdot u_C, \text{ kde} \quad (5.8)$$

U je rozšířená nejistota,

k_R je koeficient rozšíření,

u_C je kombinovaná nejistota.

Velikost k_R se určí podle pravděpodobnostního rozdělení výsledku. Ve většině případů, kdy je možné usuzovat na Gausovo (normální) rozdělení měřené veličiny a standardní nejistota odhadu x je stanovena s dostatečnou spolehlivostí je třeba použít standardní koeficient rozšíření $k_R=2$. Potom stanovená rozšířená nejistota U odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%.

V některých případech nelze experimentálně potvrdit předpoklad normálního rozdělení. Ovšem pokud je několik ($N \geq 3$) složek nejistoty odvozených z nezávislých veličin, která mají normální nebo rovnoměrné rozdělení srovnatelně přispívají ke standardní nejistotě odhadu x výstupní veličiny, jsou splněny podmínky Centrální limitní věty. Potom je možné předpokládat, že rozdělení hodnot x je normální.

Spolehlivost standardní nejistoty měření, která je přiřazena k odhadu hodnoty výstupní veličiny, je určena jejími efektivními stupni volnosti. Kritérium spolehlivosti ovšem platí pouze tehdy, pokud žádný z příspěvků nejistoty nebyl stanoven z méně než deseti opakovaných pozorování.

Pokud nejsou splněny podmínky normality rozdělení nebo dostatečné spolehlivosti, může se stát, že při použití koeficientu rozšíření $k_R=2$ bude odpovídající pokrytí pravděpodobnosti menší než 95%. Potom je nutné použít jiné postupy a zajistit aby rozšířená nejistota U odpovídala stejné pravděpodobnosti pokrytí jako ve standardním případě. Použití přibližně stejné pravděpodobnosti je nezbytně nutné zejména v těch případech, kdy je zapotřebí porovnat mezilaboratorní výsledky, rozhodnout o shodě se zadanou hodnotou nebo zjištění zda je naměřená hodnota v souladu s určitými specifiky.

V případech, kdy není možné předpokládat normální rozdělení, je nutné stanovit velikost koeficientu k_R tak, aby jeho hodnota odpovídala pravděpodobnosti pokrytí asi 95%.

V případě normálního rozdělení je pro směrodatnou odchylku σ mírou spolehlivosti počet stupňů volnosti závisícího na počtu pozorování, ze kterého je stanovena velikost směrodatné odchylky σ .

Zdroje nejistot

Zdroji nejistot jsou veškeré jevy, které mohou nějakým způsobem ovlivnit neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření a tím zvětšují rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Velmi také záleží na tom, zda jde o měřicí metody přímé nebo nepřímé. Dále nejistoty měření ovlivňuje výběr měřících přístrojů analogových nebo číslicových, použití různých filtrů nebo vzorkovačů. Na měření působí mnoho rušivých vlivů, níže jsou uvedeny některé z nich:

- **Teplota**

Mezi veličiny ovlivňující naměřenou hodnotu patří teplota a její kolísání. Veškerá měření provedená v rámci této diplomové práce probíhaly ve školní laboratoři za konstantní teploty 23°C. Tato teplota splňuje požadavky na prostředí uváděných všemi výrobcí použitých měřících přístrojů. Změnou teploty dochází ke změnám odporu cívek, předradníků, bočníků a dalších použitých součástí, včetně měřeného prvku. Závislost odporu R rezistoru na teplotě T je možné popsat pomocí následujícího vzorce:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \text{ kde} \quad (5.9)$$

R_0 je odpor při teplotě T_0 [Ω],[K],

R je odpor při teplotě T [Ω],[K],

α je teplotní součinitel odporu [K⁻¹].

Dále je do této kategorie možné zařadit působení termoelektrického napětí na spojích různých vodičů o různé teplotě. Tento jev ovšem není nutné uvažovat vzhledem k použití měřícího napětí o střídavém průběhu.

- **Mechanické vlivy**

Nejkritičtější vlivem bývá tření otočného ústrojí. Vzhledem k použitým přístrojům, které jsou digitální, není vůbec nutné tření uvažovat.

Dalším možným mechanickým vlivem jsou otřesy. Tyto také není nutné uvažovat, protože veškerá měření probíhala v klidném prostředí ve školní laboratoři, kde otřesy na přístroje působily minimálně.

- ***Frekvenční závislost***

I při použití rezistoru tento obsahuje také parazitní kapacitu a indukci, jejichž velikost je závislá na frekvenci. Při měření kapacit se při změně frekvence změní i velikost naměřené impedance. Při měření kapacity pomocí měřícího přístroje TESLA BM507 je tedy nutné uvažovat možnou odchylku od požadované frekvence jako další složku nejistoty. U ostatních měření je tato uvažována již v chybě udávané výrobcem měřícího přístroje.

Některé z výše uvedených zdrojů se projevují zejména u nejistot typu B, některé u nejistot typu A. Mnohé z nich ovšem mohou být příčinou obou typů nejistot. Je důležité neopomenout žádnou ze složek, opomenutí by mohlo mít výrazný zkreslující účinek. Vliv na nejistoty má výběr měřících přístrojů analogových nebo číslicových, použití různých filtrů, vzorkovačů a dalších prostředků v celé trase přenosu a úpravy měřícího signálu.

Nezanedbatelné jsou také zdroje spojené s obsluhou a vyhodnocením. Tyto zdroje jsou celkem snadno ovlivnitelné především soustředěním a pozorností při měření. Také je důležité správné a důsledné dodržení správných algoritmů zpracování naměřených hodnot. Vliv osobních chyb a zjednodušení se může velmi výrazně projevit také ve skupině zdrojů souvisejících s nesprávnou volbou metody anebo jejím zjednodušením. Totéž platí i o modelu měřící úlohy. Zde všude je možné předpokládat, že zdroje nejistot ve značné míře souvisí s osobními chybami.

Při využití moderních metod využívajících současné elektronické a počítačové systémy, vzroste velmi výrazně podíl negativních vlivů nejrozumnějších elektrických napětí v obvodech a vlivů nejrozumnějších polí, v nichž se nacházejí měřící zařízení nebo skrze která je transportován měřící signál.

Zaokrouhlování výsledků měření

V mnoha případech je nutné správně zaokrouhlit výsledek. Výpočet pomocí kalkulačky nebo PC dodává výsledek s mnoha desetinnými místy, které jsou ovšem nepoužitelné. Reálně je možné výsledek měření zpřesnit o jeden až dva řády opakovaným měřením. Při zaokrouhlování se vybírá nejbližší celistvý násobek danému číslu. Celistvý násobek se volí podle přesnosti zaokrouhlování. Pro případ kdy při zaokrouhlování čísla jsou oba celistvé násobky stejně vzdáleny připadají v úvahu 2 možné varianty. Zvolí se buď nejbližší sudý celistvý násobek, nebo větší celistvý násobek. Druhá varianta je rozšířenější při použití výpočetní techniky. Je nutné zejména při opakovaném zaokrouhlování věnovat pozornost výsledku, který může být značně zkreslen.

Výše uvedené poznatky platí pro zaokrouhlování samotného výsledku. Nejistoty měření je vždy nutné zaokrouhlit na nejbližší větší celistvý násobek. Není možné tímto způsobem zkracovat interval hodnot uváděný nejistotou měření.

Uvádění výsledků měření

Doporučuje se použít uvádění výsledků s použitím kombinované nejistoty u_C nebo rozšířené nejistoty U . Lze také použít tzv. bilanční tabulku.

Standardní nejistota kombinovaná u_C

Při prezentaci výsledku se standardní nejistotou kombinovanou u_C je třeba řídit se těmito pravidly:

- uvést podrobnou definici měřené veličiny X ,
- uvést odhad x měřené veličiny X spolu s kombinovanou standardní nejistotou $u_C(x)$ a jejich jednotku,
- je-li to vhodné uvést relativní standardní kombinovanou nejistotu $u_C(x)/x$, $|x| \neq 0$,
- v případě potřeby uvést bilanční tabulku.

Příklad zápisu pro napětí o velikosti $U=24,005\text{V}$ a kombinované nejistotě $u_c=85\text{ mV}$:

- $U=24,005\text{ V s } u_c=85\text{ V}$,
- $U=24,005\text{ (85) V}$,
- $U=24,005\text{ (0,085) V}$,
- $U=(24,005 \pm 0,085)\text{ V}$ – tento zápis se používá především pro rozšířenou nejistotu.

Ve všech výše uvedených zápisech znamená symbol U napětí, nikoliv rozšířenou nejistotu.

Rozšířená nejistota U

Při zápisu výsledku s rozšířenou nejistotou U je třeba dodržet tyto zásady:

- uvést podrobnou definici měřené veličiny X ,
- uvést výsledek měření v podobě $X=x\pm U$ včetně jejich jednotek,
- pokud je to vhodné uvést relativní rozšířenou nejistotu $U|x|$, $|x|\neq 0$,
- uvést hodnotu koeficientu rozšíření k_R použitého k výpočtu U ,
- uvést konfidenční hladinu spjatou s intervalem $x \pm U$ a uvést, jak byla určena,
- v případě potřeby uvést bilanční tabulku.

Schéma požadovaného uspořádání veličin, odhadů, standardních nejistot, koeficientů citlivosti a příspěvků k nejistotě v rámci analýzy nejistot měření

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek k standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
X_a	x_a	$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$
Y	y			$u(y)$

Tabulka 1: Možný příklad použití bilanční tabulky nejistot

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Rozdělení pravděpodob- nosti	Citlivostní koeficient	Příspěvek k standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	normální	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	rovnoměrné	c_2	$u_2(y)$
.	.	.		.	.
.	.	.		.	.
.	.	.		.	.
X_a	x_a	$u(x_N)$	rovnoměrné	c_N	$u_N(y)$
Y	y				$u(y)$

Tabulka 2: Další příklad použití bilanční tabulky nejistot

Tyto tabulky (Tabulka 1 a Tabulka 2) je možné použít pro nekorelované vstupní veličiny. Standardní nejistota výsledku měření $u(y)$ uvedená v pravém dolním rohu tabulky, představuje odmocninu sumy čtverců všech složek nejistot uvedených v pravém krajním sloupci.

Zákon šíření nejistot

Při určování postupu výpočtu nejistot měření je nutné stanovit nejistotu odhadu hledané veličiny, která je funkcí jiných veličin, jejichž odhady i nejistoty jsou známy. V případě zájmu upřeném na jednu výstupní veličinu Y , která je funkcí m vstupních veličin X (X_1 až X_m), jejichž odhady a nejistoty jsou známy, lze zapsat vztah (5.10).

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_m), \text{ kde} \quad (5.10)$$

$x_1, x_2, \dots, x_m$ jsou odhady vstupních veličin $X_1, X_2, \dots, X_m$.

Nejistota odhadu y veličiny Y pro nekorelované $x_1, x_2, \dots, x_m$ se určí podle vztahu (5.11):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u_i^2(x_i), \text{ přičemž} \quad (5.11)$$

pro koeficienty citlivosti A_i platí vztah (5.12).

$$A_i = \left. \frac{\partial f(x_1, \dots, x_m)}{\partial x_i} \right|_{x_1=x_1, \dots, x_m=x_m}. \quad (5.12)$$

Jsou-li odhady $x_1, x_2, \dots, x_m$ korelované je nutné uvažovat také kovariance mezi jednotlivými odhady tvořící další složky výsledné nejistoty. Potom se pro korelované vstupní veličiny určí výstupní veličina ze vztahu (5.13).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u_i^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(x_i, x_j) \quad (5.13)$$

přičemž $u(x_i, x_j)$ je kovariance mezi korelovanými odhady x_i a x_j

Někdy se musí určit nejistoty odhadu y určit zvlášť metodou A a zvlášť metodou B. Celková standardní nejistota měření se poté určí ze vztahu (5.7)

Kovariance při určování výsledných nejistot

Kovariance mezi jednotlivými odhady vlivů zdrojů nejistot určují, jak jsou tyto zdroje vzájemně ovlivněny společnými zdroji nejistot. Navzájem závislé zdroje přispívají k výsledné nejistotě podle toho, jak se příslušné nejistoty slučují. Společné zdroje se berou v úvahu proto, aby bylo možné zohlednit jejich vliv ve výsledné nejistotě. Kovariance mohou výslednou nejistotu zvětšit, ale i zmenšit. Závisí to především na jejich charakteru (zda-li zdroje působí souhlasně nebo protichůdně) a také na tvaru funkce, kterou jsou vázány na výstupní veličinu. Kovariance mezi jednotlivými vstupními veličinami se určí podobně jako nejistoty metodou typu A nebo B.

Stanovení kovariance mezi odhady x_i a x_j metodou typu A

Tato metoda se pro stanovení kovariancí mezi dvěma odhady používá v těch případech, kdy je k dispozici n naměřených hodnot obou veličin. Kovariance určená metodou typu A, pro případ kdy x_i a x_j byly vypočteny aritmetickými průměry, se vypočítá podle vzorce (5.14)

$$u_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j), \text{ kde} \quad (5.14)$$

x_i a x_j jsou odhady dvou zdrojů nejistot určené pomocí aritmetického průměru

Stanovení kovariance mezi odhady x_i a x_j metodou typu B

Jedná se o kovarianci, která byla určena jiným způsobem než statickou analýzou. Může být určena například čtením z certifikátů přístrojů, literatury anebo výpočtem podle dále uvedeného postupu.

Postup výpočtu kovariance metodou typu B:

1. Vytipování zdrojů závislosti (zdroje korelací).
2. Odhadnutí korelačních koeficientů r , tyto vyjadřují míru závislosti mezi odhady. Mohou nabývat hodnot od -1 do 1. Hodnoty blízké nule odpovídají slabým závislostem, zatímco hodnoty ± 1 odpovídají silnějším závislostem. Příslušná hodnota kovariance se určí ze vztahu (5.15).

$$u_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u_B(x_i) u_B(x_j) \quad (5.15)$$

3. Jsou-li dvě vstupní veličiny X_1 a X_2 funkcemi nezávislých veličiny $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$, které lze vyjádřit pomocí vztahu (5.16) a (5.17).

$$X_1 = g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_m), \quad (5.16)$$

$$X_2 = g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m). \quad (5.17)$$

Určí se kovariance mezi odhady x_1, x_2 ze vztahu (5.18).

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) \quad (5.18)$$

koeficienty jsou koeficienty citlivosti pro funkce g_1 a g_2 určené podle vztahu (5.12)

Výpočtem pomocí této metody je možné obejít vhodným sestavením modelu měření odhadování hodnoty korelačního koeficientu.

4. Pokud jsou dvě vstupní veličiny X_1 a X_2 a jejich odhady x_1 a x_2 funkcemi závislých veličin $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$, které lze vyjádřit pomocí vztahů (5.16) a (5.17) určí se kovariance mezi odhady x_1 a x_2 ze vztahu (5.19).

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j) \quad (5.19)$$

přičemž $u_B(z_i, z_j)$ je známá kovariance mezi závislými veličinami z_i a z_j

5. Není-li možné určit korelační koeficient ani se vyhnout korelacím sestavením modelu, je vhodné určit maximální vliv korelace na výslednou nejistotu prostřednictvím horní hranice odhadu standardní nejistoty. Není-li tedy možné přesně ohodnotit kovarianci a tím výsledné nejistoty, lze uvést horní hranici nejistoty.

Příklady zdrojů korelací v návaznosti na zdroje nejistot

Opakované měření jedním měřidlem

Při opakovaném přímém měření za stejných podmínek stejným měřidlem se provede odhad měřené hodnoty $\bar{y}$ jako aritmetický průměr naměřených hodnot X , potom nejistota měření stanovená metodou typu A bude směrodatná odchylka aritmetického průměru σ . Chyby způsobené vlivem měřidla se zahrnou do nejistoty určené metodou typu B. Kovariance mezi jednotlivými měřeními je tvořena společnou chybou užitého měřidla při jednotlivých měřeních a má velikost čtverce nejistoty měřidla. V těchto případech je většinou možné kovarianci určenou metodou typu A zanedbat.

Opakované měření různými měřidly

Pokud probíhalo měření pomocí dvou různých měřidel jako například od různých výrobců nebo vyráběných jinou technologií je jasné, že mezi chybami měřidel nejsou

žádné souvislosti, potom se kovariance mezi měřeními zapříčiněné chybou použitých měřidel nebudou vyskytovat.

Není-li jisté, že chyby mezi použitými měřidly jsou nezávislé, je nutné tuto závislost při dalších výpočtech uvažovat pomocí kovariancí. Pokud nelze určit závislost chyb použitých měřidel uvažuje se kovarianční koeficient roven 1. Při použití měřidel od jednoho výrobce se stejnou třídou přesnosti, se postupuje stejně jako při měření jedním měřidlem.

Měření kalibrovanou sadou měřidel

tato metoda je použitelná například při měření pomocí sady měřidel, jako je například sada závaží pro laboratorní váhy. Každé z nich je schopné reprodukovat jednu hodnotu měřené veličiny, přičemž známe všechny odhady hodnot x_i . Podle způsobu kalibrace měřidel mohou být jednotlivé odhady mezi sebou nezávislé ale i závislé. Z kalibrace jsou známy hodnoty nejistot $u(x_1)=c_1$, $u(x_2)=c_2$, ... $u(x_p)=c_p$, c_1 , c_2 , ... c_p . Rovněž jsou známy kovariance $u(x_i, x_j)=c_{ij}$.

Měření pomocí měřícího přístroje s konstantní nejistotou

Pokud jsou známé naměřené hodnoty x a jejich nejistoty $u(x)=c$ pro všechny hodnoty x z celého rozsahu měřícího přístroje s konstantní nejistotou v celém měřícím rozsahu, musí být známy zároveň kovariance $u(x_i, x_j)$ pro všechny dvojice x_i, x_j z měřícího rozsahu přístroje. V praxi se ovšem nejčastěji používají krajní hodnoty intervalu kovariancí, kovariance mezi dvěma hodnotami x_i a x_j se uvažuje nulová pokud se odečítá od výsledné nejistoty a kovariance c^2 pokud se přičítá. Tímto jsou vystiženy nejméně příznivé případy.

Kalibrace a ověřování

Jedná se o jednu z nejdůležitějších úloh metrologie, která zajišťuje jednotnost měření (fungování návaznosti měřidel). Většina měřidel používaných ve výrobě musí mít ověřené metrologické charakteristiky.

Kalibrace se provádí metodou přímého nebo nepřímého porovnání. Jedná se o soubor úkonů, jejichž výsledkem je známá závislost mezi hodnotou indikovanou kalibrovaným měřicím přístrojem a hodnotou indikovanou referenčním měřidlem nebo hodnotou pracovního etalonu. Na základě úřední zkoušky, která bývá označována jako ověřování, je vydán patřičný certifikát nebo je měřicí přístroj označen značkou dokládající, že splňuje příslušné požadavky.

Z pohledu nejistot jde při kalibraci o zcela specifické úlohy. Navazování měřidla na etalon obnáší určité typické kombinace zdrojů nejistot a jejich vzájemné korelace, které se následně objevují v kovariancích. Stanovení nejistot při kalibracích je proto složitější než v běžných případech.

Při kalibracích je možné se nejčastěji setkat s těmito typy úloh:

- kalibrace měřidla s jednou nominální hodnotou,
- kalibrace několika měřidel se stejnou nominální hodnotou,
- kalibrace sady zhmotnělých měř,
- kalibrace měřidla se spojitou stupnicí.

Při posuzování nejistot u kalibrace je nutné uvažovat především složky, které mají rozhodující vliv na výslednou nejistotu. Mezi ně patří:

- nejistoty hodnoty poskytnuté etalonem,
- nejistota způsobená nedostatky při přenosu z etalonu na měřidlo,
- nejistota kalibrovaného měřidla způsobující problémy se stálostí a reprodukovatelností měření.

Během kalibrace je nutné neopomenout žádné korelace, které by mohly ovlivnit výsledek. Při kalibraci se projevují tyto dominantní projevy kovariancí:

- kovariance mezi hodnotami poskytovanými etalonem,
- kovariance způsobené přenosem hodnot z etalonu na kalibrované měřidlo,
- kovariance mezi hodnotami kalibrovaného měřidla,
- kovariance mezi hodnotami etalonu a kalibrovaného měřidla.

Nejistota a kovariance samotného etalonu se skládá ze dvou složek:

- složek uvedených v kalibračním listu a udávajících hodnoty nejistot a kovariancí veličiny měřené nebo reprodukované etalonem v podmínkách jeho kalibrace,
- složek představujících vliv odchylky od podmínek při kalibraci oproti podmínkám referenčním.

Ačkoliv by měly být v kalibračních listech uvedeny nejistoty i údaje o kovariancích, přesto mnohdy tyto údaje chybí i když tvoří také významnou složku celkové nejistoty. V kalibračních listech je nutné celkový výsledek měření uvádět ve tvaru $x \pm U$, kde x je odhad měřené veličiny a U je jemu náležící rozšířená nejistota.

6. SPEKTRÁLNÍ ANALYZÁTOR

AGILENT CSA N1996A

Tato kapitola se zabývá popisem výše uvedeného spektrálního analyzátoru, který je majetkem UAMT FEKT VUT v Brně. Veškerá měření popisovaná touto diplomovou prací probíhala na tomto přístroji v laboratoři Elektrických měření E607. Jako zdroj informací pro tuto kapitolu sloužily materiály poskytované výrobcem spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1966A [3], [4] a [5].

Popis přístroje

Výše uvedený spektrometr je výrobkem společnosti Agilent. Pomocí mnoha automatizovaných funkcí slouží pro rychlé měření a analýzu signálů o frekvenci od 100kHz až do 3 případně 6 GHz. Horní mez je závislá na modelu spektrometru. Vlastní měření v této diplomové práci probíhala v laboratoři E607 Ústavu automatizace a měřicí techniky FEKT VUT v Brně, tato laboratoř je vybavena spektrálním analyzátozem Agilent CSA N1996A, jehož frekvenční pracovní rozsah je do 3 GHz. Měření usnadňuje mnoho vestavných funkcí přístroje a lze ho provádět na nejrůznějších místech díky kompaktní konstrukci analyzátoru. Přístroj bez baterií váží 7,5kg, pokud by byl vybaven bateriemi umožňujícími 2 hodiny provozu, došlo by ke zvýšení váhy přístroje o 1 kg.

Naměřená data jsou zobrazována na velkém světlém XGA displeji o úhlopříčce 21cm a rozlišení 1024x768. Tento displej je vhodný i pro venkovní použití. Naměřená data lze nejen zobrazit, ale také uložit na externí medium (např. flash disk) připojené pomocí USB 1.1 portu, umístěnému na čelním panelu spektrálního analyzátoru. Tento port lze použít také k aktualizaci firmwaru přístroje.

K ovládání přístroje lze použít jednoduché ovládací prvky na čelním panelu přístroje, popřípadě lze přístroj ovládat na dálku pomocí speciálních SCPI příkazů. V případě dálkového ovládání se lze s analyzátozem spojit přes připojení k síti 100 base-T LAN, jejíž konektor je umístěn na zadním panelu spektrálního analyzátoru Agilent.

Vlastní měření usnadňují výše zmíněné vestavné funkce spektrálního analyzátoru Agilent, mezi tyto funkce patří:

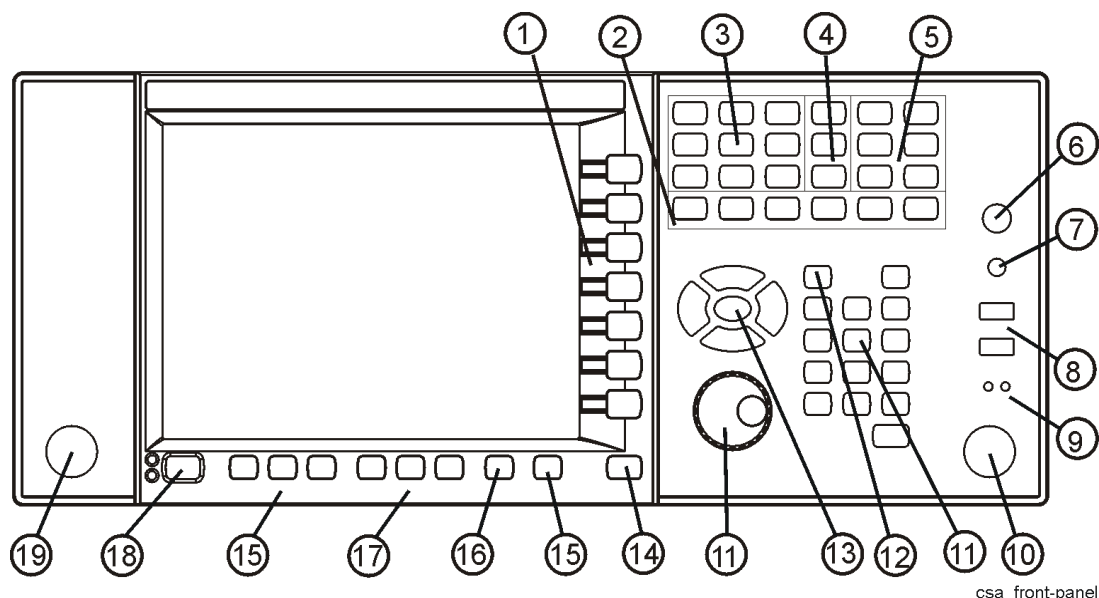
- vestavěná nápověda,
- automatická stupnice,
- automatické nastavení přístroje,
- automatický rozsah na výstupu zeslabovače.

Rozmístění prvků na čelním panelu

Jednotlivé prvky jsou na čelním panelu zobrazeny podle obrázku 1.

Celému panelu dominuje velký barevný displej XGA, který se nachází v levé části čelního panelu spektrálního analyzátoru. Na displeji se mimo jiné zobrazuje i aktuální nabídka funkcí, která se volí tlačítky 1. Tlačítky 2 se určuje režim měření. Pomocí tlačítek 3 se navolí požadované parametry měření. K odečítání parametrů analyzovaného signálu je spektrální analyzátor vybaven kurzory, které lze ovládat pomocí tlačítek 4. Tyto parametry nebo i průběh analyzovaného signálu je možné uložit na paměťové médium připojené k USB 1.1 portu 8. Ukládání se provádí prostřednictvím tlačítek 5. Případná změna numerických hodnot se provádí pomocí otočného ovladače nebo numerickými tlačítky. Obojí je v obrázku 1 označeno číslem 11. Potvrzení parametrů se provádí stiskem tlačítka ENTER, které se nachází ve středu tlačítek pro pohyb kurzorů 13. Navolenou hodnotu může uživatel zrušit stiskem tlačítka ESC, které je označeno číslem 12 na obrázku 1. Pro návrat do předchozí nabídky je třeba stisknout tlačítko RETURN, označené číslem 14. Orientaci ve funkcích přístroje usnadňuje vestavěná nápověda, kterou je možné vyvolat stiskem tlačítka 16. Vypínání a zapínání spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A se provádí stiskem tlačítka 18.

Dále je čelní panel spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A vybaven konektorem sloužícím pro napájení aktivních externích vysokofrekvenčních sond, který je v obrázku 1 označen číslem 6. Sluchátka se připojují ke konektoru typu JACK 3,5, označený číslem 7. Při provozu je stav baterií indikován indikátory pod číslem 9. Měřené signály se přivádějí na BNC konektor značeným číslem 10. Spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A je vybaven vestavěným generátorem, jehož signál je vyveden na konektor 19.



Obrázek 1: Čelní panel Agilent CSA N1996A

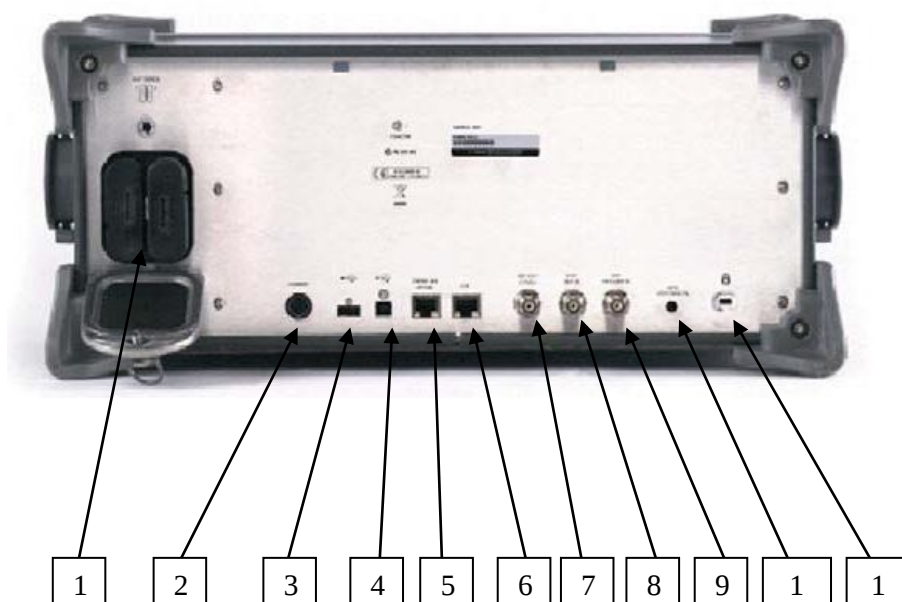
- 1 - Ovládací tlačítka pro volbu aktuální nabídky na displeji
- 2 - Volba režimu měření
- 3 - Volba parametrů měření
- 4 - Ovládání kurzorů
- 5 - Pomocné funkce
- 6 - Napájení aktivních externích vysokofrekvenčních sond
- 7 - Konektor typu Jack pro připojení sluchátek
- 8 - Port USB 1.1
- 9 - Indikátor stavu baterií
- 10 - Vstup externích signálů
- 11 - Změna numerických hodnot
- 12 - ESC (Cancel)
- 13 - Navigační klávesy pro pohyb kurzorových křížů
- 14 - RETURN – návrat do předchozí nabídky
- 15 - Ovládání hlasitosti při použití s volitelným modulem pro poslech

AM/FM

- 16 - Nápoředa
- 17 - Výběř aktivního okna
- 18 - Zapnutí přístroje
- 19 - Výstup vestavěného generátoru

Rozmístění prvků na zadním panelu

Pohled na zadní panel spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A je na obrázku 2. Číslem 1 je označena schránka na baterie, na obrázku 2 je kryt bateriového prostoru otevřen a naskýtá tedy pohled na baterie. Při provozu s napájením ze sítě se připojí napájecí adapter na konektor 2. Vstupní střídavé napětí adapteru se může pohybovat v rozmezí 100 – 240V. Výstupní napětí adapteru, které vstupuje do spektrálního analyzátoru je 15V se stejnosměrným průběhem. Vedle konektoru pro připojení napájecího napětí se nachází konektor USB 1.1, který je v obrázku 2 označen číslem 3. Porty USB 1.1 typu B označený číslem 4 a konektor Timing LAN (5) nejsou v používaném spektrálním analyzátoru implementovány. Při dálkovém řízení se lze spojit se spektrálním analyzátozem pomocí sítě LAN, ke které se přístroj připojí pomocí konektoru (6). Výstup referenčního signálu je vyveden na BNC konektor (7), vstup referenčního signálu je na konektoru (8). Konektor označený číslem (9) slouží k připojení externí synchronizace. Riziko zcizení spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A lze snížit pomocí bezpečnostního zámečku (11). Zdířka (10) umístěná mezi bezpečnostním zámečkem a konektorem pro připojení externí synchronizace není v použitém přístroji nijak implementována, výrobce si pouze rezervoval prostor pro případné budoucí použití.



Obrázek 2: Zadní panel Agilent CSA N1996A

- 1 - Schránka na baterie
- 2 - DC napájení
- 3 - Port USB 1.1 typ A
- 4 - Port USB 1.1 typ B (neimplementováno)
- 5 - Timing LAN (neimplementováno)
- 6 - Konektor pro připojení k síti LAN
- 7 - Výstup referenčního signálu
- 8 - Vstup referenčního signálu
- 9 - Externí synchronizace
- 10 - Dosud neimplementováno (rezervováno pro budoucí využití)
- 11 - Bezpečnostní zámek

Technická specifikace

V této části diplomové práce se nachází popis technických parametrů spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A. Jedná se o popis hardwaru tohoto přístroje a dále jsou zde uvedeny provozní podmínky.

Všeobecné informace

Kalibrační cyklus:	1 rok
Nadmořská výška:	3 000 m.n.m.
Rozsah provozní teploty:	0 až 40°C při napájení ze sítě 0 až 50°C při provozu na baterie
Skladování:	-20 až 60°C ≤80% relativní vlhkosti

Spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A používaný v rámci této diplomové práce slouží ke školním účelům, není tedy pravidelně kalibrován a nejsou k němu tudíž k dispozici platné kalibrační listy.

Frekvence

Rozsah:	100 kHz až 3 GHz
Přesnost:	± 5 ppm
Stárnutí:	± 2 ppm/rok
Teplotní stabilita:	± 1 ppm/rok (pro teploty 0 – 50°C)

RBW - Rozlišovací šířka pásma: 10 Hz až 200 kHz v 10% krocích, 250 kHz, 300 kHz, 510 kHz, 1, 3, 5 MHz

Přesnost je zde uváděna v jednotkách ppm, tyto jednotky pocházejí z anglické zkratky Parts per million, neboli česky dílů na jeden milion. Tato jednotka tedy udává jednu miliontinu celku.

Amplituda

Rozsah:	0 až 40 dB po 1 dB
Průměrný stálý výkon:	33 dBm
Špičkový pulzní výkon:	40 dB
Stejnoseměrné napětí:	50 V
1 dB zisk komprese:	+ 13 dBm nominální při vypnutém předzesilovači - 10 dBm nominální při zapnutém předzesilovači

Průměrný stálý výkon 33dBm představuje výkon signál 2W, před samotným měřením je třeba dát pozor, aby výkon zkoumaného signálu dlouhodobě nepřekračoval tuto hodnotu. Špičkově může mít signál výkon až 40dB.

Vstupní / výstupní konektory

RF vstup:	zásuvka (50Ω) typ N
Signálový výstup:	zásuvka (50Ω) typ N
USB-A:	USB 1.1
LAN 10/100:	Base-T, konektor RJ-45
Externí spouštění:	zásuvka BNC
Vstup referenčního signálu:	zásuvka BNC
Výstup:	zásuvka BNC

Pro potřeby této diplomové práce byly využívány zásuvky BNC, které se používají pro připojení koaxiálních kabelů.

6.1 Měřicí funkce přístroje

Měřicí funkce se volí pomocí menu, které se zobrazí na obrazovce po inicializaci softwaru. Spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A je vybaven třemi hlavními funkcemi. Jsou to *Spektrum analyzer*, *Chanel analyzer*, a *Stimulus response*. Tato kapitola se bude nadále zabývat jejich popisem.

6.1.1 Funkce Spektrum analyzer

Jak již název použitého přístroje napovídá, jedná se o hlavní funkci přístroje. Umožňuje zkoumání frekvenčního spektra signálu. Při využití této funkce lze provádět následující měření:

- zobrazení signálu,
- měření více signálů,
- měření signálů s nízkou úrovní amplitudy,
- měření zkreslení signálu,
- měření energie určitého kmitočtového pásma signálu,
- měření obsazenosti šířky kmitočtového pásma,
- měření pulsního signálu.

Dále je možné při zakoupení rozšiřujících modulů provádět následující měření:

- využití přístroje jako pevně frekvenčně laděného přijímače,
- zobrazení spektrogramu signálu,
- naladění a poslech AM nebo FM signálů.

Nastavení parametrů

Při popisu nastavení jednotlivých funkcí je použito popisu tlačítek čelního panelu spektrometru na obrázku 1. Před samotným použitím přístroje je třeba se ujistit, že celkový signál všech signálů na vstupu přístroje nepřesahuje +33 dBm (2 W).

Pro vkládání dat, jako jsou číselné hodnoty nebo nejrůznější parametry, lze využít několika cest. Patří mezi ně použití navigační kolečka (11), pro inkrementaci nebo dekrementaci lze použít šipky kurzorového kříže (13) případně lze využít numerickou klávesnici (11) pro přímé zadání číselných hodnot.

Pro přednastavení možných parametrů lze využít vlastní nastavení (*User preset*) což přináší zejména výhodu v tom, že uživatel má úplný přehled o startovním bodu měření, dokud uživatel toto nastavení neupraví je používáno tovární nastavení. Další typ nastavuje aktuálně navolený režim do továrního nastavení, tento režim se nazývá *Mode Preset*.

Zobrazení signálu

Pro využití této funkce se spektrometr nachází ve funkci *Spektrum Analyzer*. Zkoumaný signál se přivede na VF vstup spektrometru AGILENT CSA N1996A. Podle zkoumaného signálu a požadavku uživatele se pomocí tlačítka *FREQ Channel* navolí vhodný frekvenční rozsah pomocí parametrů *Start Freq* a *Stop Freq*. Případně lze navolit tzv. střední frekvenci, nebo-li *Center Frequency*. Dále je možné vstupní signál v případě potřeby nastavit zeslabení vstupního zeslabovače pomocí tlačítek *AMPTD Y Scale*, *Elec Atten*.

Pro odečet hodnot frekvencí a amplitudy zobrazených na displeji lze využít kurzorů tzv. *Markers* a pro odečtení špičkových hodnot je možné použít funkci vyhledávání špiček tzv. *Peak Search*.

6.1.2 Funkce Channel Analyzer

Spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A je vybaven několika měřicími komunikačními kanály, čímž lze měřit různé parametry signálů ve sdělovacím systému. Měřit lze úroveň zkreslení, výkon kanálu nebo výkon a šířku pásma signálů s komplexní modulací. Nastavení rozsahu lze nechat provést automaticky, stiskem jediného tlačítka. Tato funkce nastaví referenční úroveň a amplitudovou stupnici. Automatické ladění centruje největší signál na obrazovce a redukuje jeho kmitočtové rozpětí.

6.1.3 Funkce Stimulus Response

Tato funkce slouží k měření útlumu na kabelu a trasování poruch. Z vyhodnocení odezvy vrácené z měřeného prvku lze určit, zda se jedná o aktivní či pasivní prvek, zda je to jedno nebo dvojbran. Dále lze určit přechodové charakteristiky

obvodů a vlastnosti kabelů či antén. Pokud je zkoumaný kabel v určitém místě mechanicky poškozen, lze zjistit vzdálenost k poškozenému místu.

Tato funkce se používá k následujícím měřením:

- dvoukanálové měření útlumu,
- jednokanálové měření útlumu,
- měření vratných ztrát,
- měření vzdálenosti k poruše kabelu.

Dvoukanálové měření útlumu

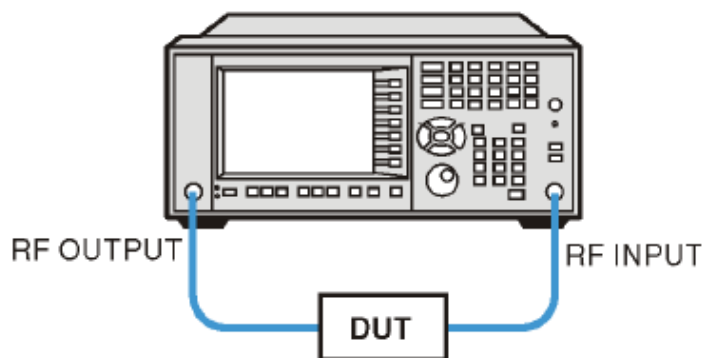
Tato měřicí funkce slouží k vyhodnocování útlumu či zesílení filtrů, zesilovačů, kabelů nebo dalších zařízení na nastaveném frekvenčním rozsahu.

V případě měření na dvojbranu, je zesílení či útlum průchozího signálu definováno jako parametr S_{21} . S-parametry dvojbranu definují jeho elektrické vlastnosti při průchodu signálu a jsou popsány čtvercovou maticí S-parametrů.

Před vlastním připojením měřeného kabelu nebo zařízení je třeba nastavit parametry měření. Nastavitelnými parametry jsou krajní meze frekvenčního pásma a úroveň měřicího signálu. Parametry je nutné volit s přihlédnutím k měřenému zařízení tak, aby nedošlo k jeho poškození. Úroveň měřicího signálu lze nastavit buď manuálně (rozsah -15 dBm až -30 dBm) nebo zvolit automatické nastavení. V případě použití automatického nastavení ztrácí uživatel možnost řídit výstupní výkon signálu a tento se může pohybovat v rozmezí 0 až -15 dBm.

Po nastavení parametrů ještě před připojením měřeného zařízení je třeba provést normalizaci spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A pro nastavený frekvenční rozsah. O nutnosti provedení normalizace je uživatel informován nápisem *UnNormalized* v levém horním rohu obrazovky přístroje. Před provedením normalizace se připojí namísto měřeného zařízení speciální kalibrační kabel, který je součástí dodávky spektrálního analyzátoru, podle obrázku 3. Po úspěšně provedené normalizaci se nápis v levém horním změni z *UnNormalized* na *Normalized*. V případě změny frekvenčního rozsahu je nutné provést normalizaci znovu.

Při dvoukanálovém měření se zkoumaný objekt připojí podle obrázku 3.



Obrázek 3: Měřeného zařízení při dvoukanálovém měření

Jednakanálové měření útlumu

Tato funkce slouží ke stejnému účelu, jako funkce dvoukanálového měření útlumu. Nespornou výhodou je možnost provádění měření s připojeným pouze jedním koncem kabelu nebo měřeného zařízení. V praxi lze tuto funkci využít k měření útlumu na vedení připojenému k anténě umístěné na stožáru. Metoda dává přesnější výsledky pro měření útlumu do velikosti 10 dB.

Výsledky tato metoda udává s nižší přesností než metoda dvoukanálového měření útlumu a proto by měla být používána pouze v případech kde je použití metody dvoukanálového měření útlumu nemožné nebo příliš komplikované.

V případě měření kabelu připojeného na anténu může dojít k interferenci měřicího signálu se signálem vysílaným jinou anténou. Je tedy třeba ověřit, zda signál použitý k testu nemůže interferovat s jinou anténou.

Obdobně jako v případě dvoukanálového měření útlumu bylo zapotřebí před začátkem měření provést normalizaci, je třeba v případě dvoukanálového měření provádět kalibraci. Tato kalibrace se používá také před měřením vratných ztrát nebo vzdálenosti k poruše kabelu. Pokud byla kalibrace pro dané frekvenční pásmo provedena před jedním z výše uvedených měření, není ji nutné provádět znovu. O potřebě provedení kalibrace je uživatel informován zobrazením *Factory Calibration* v levém horním rohu obrazovky. Není-li kalibrace nutná je v levém horním rohu obrazovky spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A zobrazen nápis *Calibrated* a údaj pro jaký frekvenční rozsah je momentálně kalibrace provedena. Při volbě frekvenčního rozsahu je třeba brát v úvahu, že velikost frekvenčního kroku by měla být menší než 2,926 MHz což je krok tovární kalibrace. Kalibrace daného frekvenčního pásma je složena z 255 kroků. Je-li velikost kroku větší, je použita tovární kalibrace a

v levém horním rohu je opět zobrazen nápis *Factory Calibration*. Přístroj zůstává kalibrován dokud:

- dojde ke změně nastavení volby frekvenčního rozsahu z manuální na automatickou,
- vypne-li se spektrální analyzátor,
- změní-li se frekvenční rozsah mimo rozsah použitý při kalibraci,
- změní-li se počáteční nebo koncová frekvence mimo kalibrační rozsah,
- změní-li se typ kabelu.

Měření vratných ztrát

Tato funkce se používá pro měření odrazové charakteristiky kabelu. Lze měřit například problém na anténě nebo na připojovacím vedení. Měří se poměr odraženého napětí k napětí vyslanému spektrálním analyzátozem, tento poměr se nazývá činitel odrazu a je ve formě komplexního čísla. Uživatel má tedy informaci nejen o velikosti, ale i o fázi. Vratné ztráty jsou definovány parametrem S_{11}

Měření vzdálenosti k poruše kabelu

Při měření vzdálenosti k poruše kabelu d je měřený kabel připojen přes BNC konektor RF Output k spektrálnímu analyzátoru Agilent CSA N1996A. Ze spektrálního analyzátoru je vyslán testovací signál, který se odrazí od případné poruchy zpět a interferuje s vyslaným signálem. Do spektrálního analyzátoru se vrací interferovaný signál, který se zde vyhodnocuje. Zobrazená vzdálenost k poruše je skutečná naměřená vzdálenost upravená o činitel zkrácení (*velocity factor*) a činitel ztrát. Proto je třeba správně navolit typ měřeného kabelu.

Měřená vzdálenost se vypočítá podle rovnice (6.1):

$$d = \frac{1}{4} \cdot \frac{P \cdot c \cdot V_{REL}}{f_R} [m], \text{ kde} \quad (6.1)$$

- d je měřená vzdálenost [m],
 P je počet bodů kalibrace frekvenčního pásma,
 c je rychlost světla, $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,
 V_{REL} je přenosová rychlost kabelu (relativně k c),
 f_R je použitý frekvenční rozsah.

Z rovnice (6.1) vyplývá, že pro zvýšení měřené vzdálenosti lze zvýšit počet bodů případně zmenšit frekvenční rozsah. Naopak ke zmenšení rozsahu lze počet bodů snížit nebo zvětšit frekvenční rozsah.

Nejmenší vzdálenost mezi dvěma poruchami, které lze pomocí spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A spolehlivě detekovat, se označuje jako rozlišení přístroje R a určí se podle rovnice (6.2):

$$R = \frac{d}{\frac{1}{2} \cdot P} [m], \text{ kde} \quad (6.2)$$

R je rozlišení [m],

d je měřená vzdálenost [m],

P je počet bodů.

Zvětšení rozlišení lze zvýšením počtu bodů případně snížením měřené délky. Jelikož je měřená délka závislá na počtu bodů P , platí vždy, že s rostoucím rozlišením klesá měřená délka a naopak.

Počet bodů lze volit z řady 256, 512 nebo 1024. Pokud uživatel naměřená data ukládá, tak jsou vždy uložena s 256 body. Toto ovšem neovlivňuje výpočet, ten je proveden ze zadaného počtu bodů.

Frekvenční rozsah lze zvolit manuálně, nebo použít automatický režim. Při navoleném automatickém režimu zadává uživatel vzdálenost, na které si přeje hledat poruchu. V tomto případě určuje frekvenční rozsah spektrální analyzátor, počet bodů je potom vždy roven 256. Při manuálním frekvenčním rozsahu volí uživatel přímo frekvenční rozsah. Hodnoty je třeba volit tak, aby měřená vzdálenost byla větší než zkoumaná oblast kabelu.

Spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A používá pro zjištění vzdálenosti k poruše reflektometrii ve frekvenční oblasti.

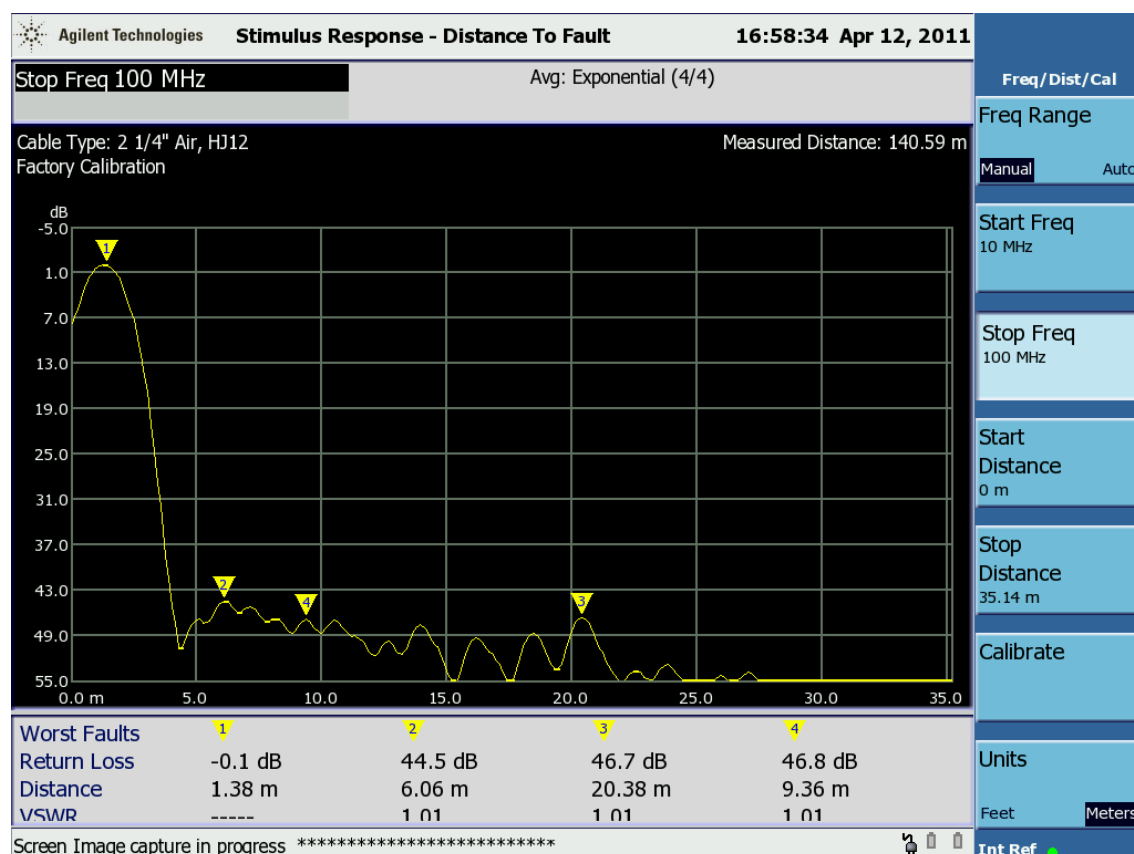
Reflektometrie ve frekvenční oblasti

V anglicky psané literatuře bývá tato metoda označována jako Frequency Domain Reflectometry (FDR). Tato metoda vysílá do zkoumaného vedení signály v určitém frekvenčním pásmu. Tyto signály se ve vedení odráží od různých poruch a vrací se zpět do spektrálního analyzátoru. Zde je odražený signál pomocí inverzní Fourierovy transformace převeden do časové oblasti a následně je vyhodnocena

vzdálenost k poruše. Takto získaná hodnota je elektrická vzdálenost k poruše, pomocí činitele zkrácení je tento údaj převeden na fyzickou vzdálenost k poruše d . Pomocí této metody nelze určit, zda odraz od poruchy je induktivního nebo kapacitního charakteru, ale pouze to, zda odraz existuje či nikoliv.

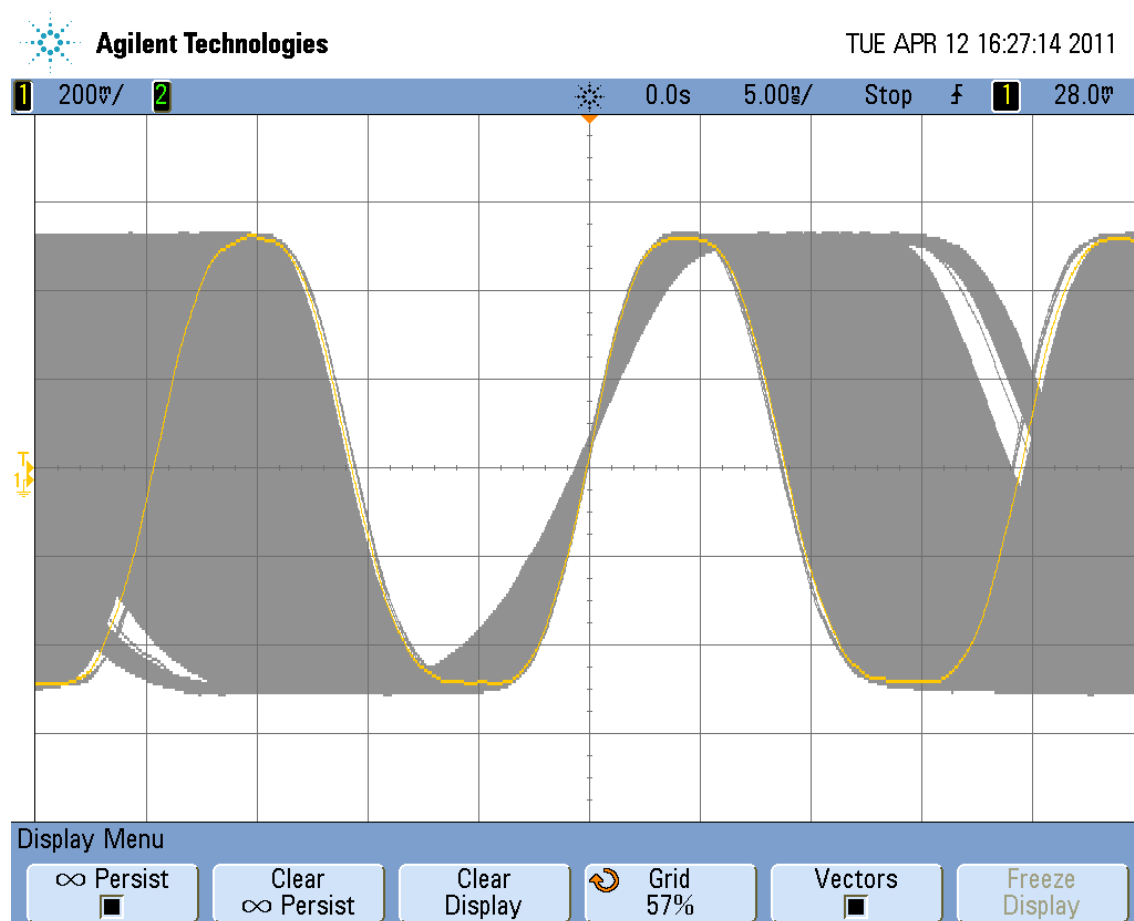
U této měřicí metody je možné nastavit rozsah frekvenčního pásma měřicího signálu, což přináší některé výhody. Umožňuje například použití v zařízeních, kde je možné použít pouze určitou šířku pásma nebo umožňuje vyhledat, kde se ztrácí signál v anténních rozvodech při určitém multiplexu. Výhodou této měřicí metody je i fakt, že lze její pomocí nalézt nejen zkratované nebo přerušené vedení, ale rovněž RF poruchy a mírné zhoršení signálu.

Tvar měřicího signálu spektrometru Agilent CSA N1996A je uveden na následujících příkladech a zachycen pomocí digitálního osciloskopu. Obrázek 4 zobrazuje nastavení spektrálního analyzátoru. Měřicí frekvence byla nastavena manuálně v rozsahu 10 MHz až 100 MHz.



Obrázek 4: Nastavení měřicího signálu spektrálního analyzátoru Agilent

Na obrázku 5 je potom zobrazen testovací signál vyslaný spektrálním analyzáteorem Agilent CSA N1996A pomocí digitálního osciloskopu Agilent DSO 3062A s aktivovanou funkcí paměťové obrazovky.



Obrázek 5: Testovací signál spektrálního analyzátoru na osciloskopu s paměťovou obrazovkou

Pro větší názornost byla na digitálním osciloskopu aktivována matematická funkce FFT a aktivován režim paměťové obrazovky. Pro zviditelnění rozptylu frekvencí měřeného signálu byly *markery* nastaveny na spodní a horní mezní frekvenci testovacího signálu a zvýrazněny červenou šipkou. Testovací signál se tedy nachází ve frekvenčním pásmu mezi těmito označeními. Celá situace je zachycena na obrázku 6.

Informace o reflektometrii ve frekvenční oblasti byly čerpány z [6] a [7].



Obrázek 6: Zobrazení FFT testovacího signálu spektrálního analyzátoru Agilent

7. TEORIE PŘENOSOVÉHO VEDENÍ

Vedením je označováno přenosové zařízení, které slouží k přenosu elmag. vln od zdroje ke spotřebiči. Délka vedení bývá srovnatelná nebo větší než vlnová délka přenášeného signálu. Při tvorbě této kapitoly bylo čerpáno z [8], [9], [10], [11] a [12].

Vedením se tedy označuje zařízení, jehož příčné rozměry jsou několikanásobně menší než délka přenášené vlny. Elmag. pole má potom v příčné rovině stacionární charakter. V opačném případě, tj. příčné rozměry jsou alespoň srovnatelné nebo větší než vlnová délka, má rozložení elmag. pole vlnový charakter v podélném i příčném směru. Takové zařízení je označováno jako vlnovod. Vlnovodem se může šířit pouze elektromagnetická vlna o kmitočtu vyšším, než je tzv. mezní kmitočet. Pojem mezní kmitočet vlnovodu je definován jako nejnižší kmitočet, který se již může vlnovodem šířit – ideálně bez útlumu. Mezní kmitočet tedy leží na přechodu mezi pásmem propustnosti a nepropustnosti vlnovodu. Tento přechod bývá velmi příkrý - měrný útlum reálného vlnovodu na kmitočtech těsně pod mezním kmitočtem je několik desítek dB/m, těsně nad mezním kmitočtem jeho velikost klesá na několika desetin dB/m. Ve většině literatury jsou vlnovody zahrnuty pod obecný pojem vedení.

Vedení se rozlišují homogenní a nehomogenní. Nehomogenost může být příčná nebo podélná. Podélně homogenní vedení je takové, které má příčné geometrické rozměry konstantní a jeho materiálové prostředí, jímž je vedení vyplněno, je po celé jeho délce homogenní (stejnorodé). Příčně homogenní vedení je takové vedení, u něž je materiálové prostředí stejnorodé v příčné rovině. Vedení, které je homogenní podélně i příčně, se označuje pouze jako homogenní vedení. Naopak příčné geometrické rozměry nehomogenního vedení nejsou podél jeho délky stejné anebo se mění v podélném směru parametry prostředí vyplňujícího vedení. Příčně nehomogenní vedení se v příčném průřezu skládá z několika různých prostředí, tj. prostředí s různými parametry μ a ϵ .

Podle délky přenášené vlny se používají následující typy vedení:

- *Otevřené dvouvodičové vedení* (používá se k přenosu metrových vln)
- *Koaxiální (souosé) vedení* (přenos decimetrových vln)
- *Kovový vlnovod* (přenos centi- a milimetrových vln)

7.1 Parametry vedení

V této části diplomové práce jsou objasněny některé parametry definující parametry vedení. Některé z těchto parametrů slouží k lepšímu pochopení přenosu signálu na vedení.

Mezní kmitočet f_m

Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly, mezní kmitočet definuje nejnižší možnou frekvenci se kterou je ještě signál schopen šířit se vedením. Případně může být uvedena *mezní vlnová délka* λ_m . Signál o kmitočtu nižším než je mezní kmitočet je daným vedením intenzivně tlumen. Pro kmitočet f , případně vlnovou délku λ přenášeného signálu by tedy mělo platit:

$$f > f_m, \text{ případně } \lambda < \lambda_m.$$

Fázová rychlost vlny v_f

Je rychlost, kterou se šíří vedením místa konstantní fáze signálu.

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}}, \text{ kde} \quad (7.1)$$

v je rychlost rovinné vlny v neomezeném prostoru, při pohybu ve vzduchu odpovídá rychlosti světla ve vakuu, tj. $v=c=3 \cdot 10^8$ m/s,

f_m je mezní kmitočet,

f je kmitočet přenášeného signálu,

λ vlnová délka přenášeného signálu,

λ_m mezní vlnová délka.

Skupinová rychlost v_{sk}

Někdy je označována jako grupová rychlost. Je definována pro jednoduchou harmonickou vlnu nekonečně probíhající. Z předchozí věty vyplývá, že se jedná spíše o teoretický parametr, protože všechny reálné signály jsou omezeny prostorově i časově.

Jako skupinová rychlost je definována rychlost modulační obálky signálu ve vedení a také rychlost přenosu energie vlny.

$$v_{sk} = v \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2} = v \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}, \text{ kde} \quad (7.2)$$

v_{sk} je skupinová rychlost,

v je rychlost rovinné vlny v neomezeném prostoru, při pohybu ve vzduchu odpovídá rychlosti světla ve vakuu, tj. $v=c=3 \cdot 10^8$ m/s,

f_m je mezní kmitočet,

f je kmitočet přenášeného signálu,

λ vlnová délka přenášeného signálu,

λ_m mezní vlnová délka.

Délka vlny ve vedení λ_g

Definuje vzdálenost, kterou urazí vlna přenášeného signálu za dobu jedné periody T přenášeného signálu, tj $T=1/f$.

$$\lambda_g = v_f \cdot T = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}}, \text{ kde} \quad (7.3)$$

λ_g je délka vlny ve vedení,

v_f je rychlost rovinné vlny přenášeného signálu,

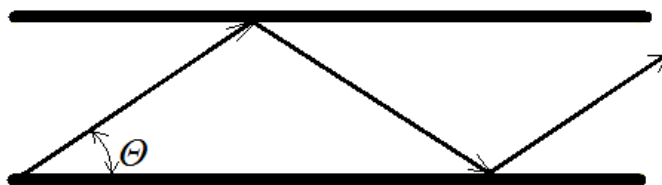
λ vlnová délka přenášeného signálu,

λ_m mezní vlnová délka.

Z výše uvedené rovnice vyplývá následující fakt: V pásmu propustnosti vlnovodu (tj. $\lambda < \lambda_m$) je $\lambda_g < \lambda$. Toto je způsobeno zvětšením fázové rychlosti vlny v_f ve vedení nad rychlost světla c . S klesajícím kmitočtem signálu, neboli s rostoucí vlnovou délkou λ , roste i délka vlny ve vedení λ_g . Pro vlnovou délku přenášeného signálu limitně se blížící k λ_m se λ_g limitně blíží k nekonečnu.

Úhel Θ , pod kterým se šíří vlny vedením

Celková vlna šířící se vedením je složena z nekonečně mnoha dílčích rovinných vln. Tyto dílčí vlny se dále šíří vedením pod určitým úhlem Θ , na vodivém plášti se odráží a dále se šíří vlnovodem po dráze lomené čáry. Tato situace je zobrazena na obrázku 7.



Obrázek 7: Šíření rovinných vln vedením

Pro úhel Θ platí následující rovnice:

$$\cos \Theta = \sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}, \text{ kde} \quad (7.4)$$

Θ je úhel pod kterým se šíří vlny vedením,

f_m je mezní kmitočet,

f je kmitočet přenášeného signálu.

Z čehož je patrné, že úhel Θ je kmitočtově závislý. Pokud se kmitočet přenášeného signálu f limitně blíží meznímu kmitočtu f_m , blíží se úhel Θ 90° a vlnění nemůže postupovat v podélném směru. Naopak blíží-li se kmitočet přenášeného signálu nekonečnu tak se úhel Θ limitně blíží 0. Z čehož vyplývá, že se signál šíří v ose vedení.

Útlum na vedení

Útlum na vedení vlivem nedokonale vodivých stěn vzniká v důsledku výrazného povrchového jevu ve stěnách vedení na uvažovaných velmi vysokých kmitočtech přenášených signálů.

Další útlum přenášeného signálu způsobuje vliv ztrátového dielektrika, přesněji nenulovou svodovou měrnou vodivostí dielektrického prostředí vyplňujícího vnitřní objem vedení.

V pásmu nepropustnosti vedení vzniká útlum vlivem odrazu od vstupu vedení.

7.2 Koaxiální kabely

Tato diplomová práce se zabývá především koaxiálními kabely. Po všeobecném úvodu do problematiky vedení se zbytek této kapitoly věnuje této problematice. Označení těchto kabelů vychází z jejich uspořádání, ko-axiální neboli souosý kabel.

Informace o koaxiálních kabelech byly čerpány z [13], [14] a [15].

Koaxiální kabely se používají pro přenos širších frekvenčních pásem, než jaké jsou schopny přenést standardní symetrické kabely. Koaxiální kabely jsou složeny ze dvou soustředně uspořádaných vodičů, tvořících koaxiální trubku s vodičem uprostřed. Nutnost zachování dokonalé souososti patří k nevýhodám těchto kabelů, protože vyžaduje přesnou výrobu.

V praxi jsou tyto kabely složeny z vnitřního vodiče, který je měděný nebo posříbřený. Kolem vnitřního vodiče je nanесena izolační vrstva (dielektrikum). Na vrstvě dielektrika je nanесena další vodivá vrstva, nejčastěji ve formě opletení. Opletení je překryto další izolující vrstvou tvořící vnější plášť kabelu.

Vzniklé elektromagnetické pole zůstává uvnitř trubky. Při přenosu signálu o vysokých kmitočtech proud prochází povrchem vnitřního vodiče a vnitřním povrchem trubky. Rozmezí nízkého a vysokého kmitočtu si lze představit řádově v desítkách kHz. Stínící účinek vnějšího vodiče je pro nízké frekvence nedostatečný, proto se pro tuto frekvenční oblast používá zvláštní stínění, které je tvořeno dvěma poměděnými ocelovými pásky, navinutými na vnější trubku. Touto úpravou dochází rovněž ke zpevnění vnějšího vodiče.

Použití

Jednou z aplikací, ve které byly koaxiální kabely používány, byl přenos dat. Ještě v první polovině devadesátých let minulého století je bylo možné nalézt např. v sítích Ethernet. Koaxiální kabel je nejstarším typem kabelu používaným v počítačových sítích. Základní kabel pro tuto aplikaci používaný byl označován jako RG-11. Někdy též označován jako *Yellow Cable* nebo *Thick Ethernet*. Toto označení si vysloužil pro svůj průměr a pro svoji charakteristickou barvu. Vnější průměr tohoto kabelu je 10 mm, barva vrchního pláště je žlutá. Impedance tohoto kabelu je 50Ω. Kabel má čtyřnásobné opletení. Souvislý segment tohoto kabelu může mít délku až 500 metrů, na větší vzdálenosti je pak nutné vzájemně spojovat více segmentů pomocí opakovačů. Výhodou tohoto kabelu byla především jeho odolnost vůči vnějšímu rušení, naopak nevýhodou byla jeho vysoká cena a nízká ohebnost.

Dalším kabelem využívaným v sítích Ethernet byl kabel s označením RG-58. Tento kabel bývá také označován jako tzv. *Thin Ethernet* pro jeho vnější průměr, který je 4,9 mm. Má stejnou impedanci jako kabel RG-11, tj. 50Ω. Tento kabel má pouze

dvojité opletení, v některých aplikacích je možné se setkat i s kabelem, který má jednoduché opletení. Tento kabel se potom nazývá *Cheapernet*. Pro jejich nižší odolnost vůči rušení a vyšší útlum dovolovali tyto kabely použití na vzdálenost do 185 metrů. Všechny tři výše uvedené typy koaxiálních kabelů umožňovali použití pro přenosové rychlosti do 10MBitů/s.

Pro síť Arcnet se používal koaxiální kabel o impedanci 93Ω , který byl označován jako RG-62. Tento kabel byl používán rovněž u sálových počítačů IBM.

V některých případech bylo možné nalézt síť využívající koaxiální kabel s impedancí 75Ω . Tento kabel bývá označován jako CATV kabel a byl převzat z televizní techniky.

Kolem roku 1990 začal být koaxiální kabel používáný pro přenos dat nahrazován levnějším osmi žilovým telefonním kabelem. Mezi další nevýhody koaxiálního kabelu patří nízká přenosová rychlost, a tedy ho nelze použít v současných vysokorychlostních sítích. Naopak jeho výhoda je ve schopnosti odolávat elektrickému rušení.

Pravděpodobně nejširší využití koaxiálních kabelů v současné době je pro vedení televizních a radiových z antény do přijímacího zařízení. V této oblasti koaxiální kabely nahradily symetrickou dvoulinku. Kabely pro toto využití mají impedanci 75Ω , průměr bývá mezi 5 až 7 mm a barva pláště bývá nejčastěji bílá, ale je možné se setkat i s kabely s černým pláštěm. Stínění těchto kabelů je nejčastěji dvojitě, toto je provedeno hliníkovou fólií a opletením. Dražší kabely mohou mít stínění z měděných drátků a fólie bývá v tomto případě poměděná. Takové kabely jsou potom označovány přídomkem Cu. Některé kabely mají stínění hned trojitě, složení stínění takového kabelu je potom následující: Dielektrikum je obaleno fólií, která je opletena a přes toto opletení je druhá fólie. Využití kabelu s takovým stíněním je především v případech, kdy toto vedení prochází kolem silných zdrojů rušení jako například WiFi router, počítač, ale také například elektrické rozvody. Odstínění je udáváno v dB. Vyšší hodnota je v tomto případě lepší než nižší. Útlum kabelu je rovněž udáván v dB, zde je žádoucí co možná nejnižší hodnota. Velikost útlumu ovlivňuje délka a průměr kabelu, ale rovněž frekvence přenášeného signálu. Čím vyšší frekvence, tím vyšší útlum. Frekvence televizních multiplexů vysílaných na území ČR se pohybuje v řádu stovek MHz. Horší situace je při použití v satelitní technice. Například družice Astra vysílá běžné české

programy s modulační frekvencí od 11 do 13 GHz. Útlum signálu s takovou frekvencí je potom vyšší, je proto třeba použít kvalitnější kabel o větším průměru. Frekvenčně modulované radiové vysílání v ČR se pohybuje v pásmu okolo 100 MHz. Pro představu útlum koaxiálního kabelu Draka AD 11A použitého jako vzorek kabelu v této diplomové práci má útlum 5,6 dB/100m při frekvenci přenášeného signálu 100MHz [17] (pásmo rozhlasu), ale pokud je frekvence přenášeného signálu 3 GHz útlum je 34,7 dB/100m. V praxi je dále třeba se zabývat materiálem pláště koaxiálního kabelu. Plášť většiny používaných kabelů bývá vyroben z PVC. Materiál pláště může činit problémy, je-li kabel použit k venkovní montáži. Kvalitnější kabely s materiálem pláště schopným odolávat povětrnostním vlivům a slunečnímu záření se vyznačují přídomkem UV. Životnost takového kabelu ve venkovním prostředí je potom mnohem vyšší než při použití konvenčního typu kabelu. Životnost nevhodně zvoleného ve venkovním prostředí je několik málo let, poté dochází ke znehodnocení vlastností kabelu a útlum kabelu se prudce zvyšuje. Nakonec je třeba kabel vyměnit.

Mezi televizní rozvody lze z určitého úhlu pohledu počítat i rozvody kabelové televize. Tyto rozvody byly původně prováděny ryze koaxiálními kabely. Od devadesátých let minulého století bývají nejčastěji používány hybridní opticko-koaxiální rozvody. Tyto sítě se potom skládají z optické a koaxiální kabeláže. Optické kabely bývají použity na páteřní část rozvodu a připojení jednotlivých domácností bývá pomocí koaxiálního kabelu. Používáním hybridních opticko-koaxiálních rozvodů HFC (*Hybrid Fiber Coax*) došlo k rozšíření šířky pásma z maximálních 450 MHz při použití ryze koaxiálních kabelových rozvodů na 750 MHz i více při použití hybridních kabelových rozvodů. Rozdělení frekvenčního pásma je následující: Pásmo 5-42MHz je vyčleněno pro *upstream*, čili pro data odesílaná uživatelem. Zbytek pásma, tedy pásmo od přibližně 50 MHz výše, je vyčleněno pro *downstream*, neboli pro přenos dat směrem k uživateli. Každý televizní kanál potom zabírá 6 MHz. Pro přenos dat bývá vyčleněn jeden kanál z *down* i *upstreamu*. Rozvody kabelové televize jsou koncipovány pro přenos signálů do frekvence 1 GHz.

Další využití koaxiální kabelů je pro přenos dat v kamerových systémech. Konkrétně zde slouží koaxiální kabel ke spojení kamery s ovládací místností. Po koaxiálních kabelech je potom možné vést nejen videosignál, ale také řídicí signály. Zde se vliv útlumu kabelu projevuje ve zhoršení rozlišovací schopnosti systému. Tento

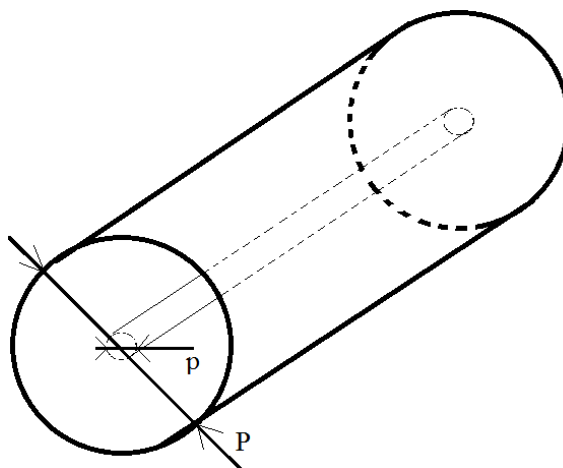
potom ztrácí schopnost zobrazení jemných detailů. Při použití koaxiálních kabelů je maximální přenosová vzdálenost řádově ve stovkách metrů. Pokud jsou po koaxiálním kabelu přenášeny pouze videosignály, je možné použít korekční zesilovače videosignálu, tím je možné docílit propojení prvků na vzdálenost v řádu kilometrů. V této oblasti se dále kromě koaxiálního kabelu jako přenosové médium využívají symetrické vedení (kroucený pár) a dále potom se signál může přenášet po IP síti nebo bezdrátově.

Přenos signálu po koaxiálním kabelu sebou nese nevýhodu v podobě galvanického propojení i poměrně vzdálených prvků systému. Potom hrozí problémy s vyrovnávacími proudy a nezanedbatelné je i riziko přenosu přepětových pulzů mezi jednotlivými prvky propojených systémů.

Parametry

Vlastnosti koaxiálních kabelů jsou popisovány mnoha parametry, některé z nich jsou zmiňovány již na jiných místech této diplomové práce. Tato kapitola se zabývá jejich detailnějším přehledem a jejich jednotlivým popisem.

Fyzikální a mechanické parametry



Obrázek 8: Průměr koaxiálního kabelu

Na obrázku 8 jsou znázorněny *průměr vnitřního vodiče p a vnitřní průměr stínění kabelu P* .

Mezi stíněním a vnitřním vodičem je izolační vrstva. O použitém materiálu vypovídá *permitivita izolační vrstvy ϵ* . Tato hodnota může být rovněž vyjádřena jako

relativní permitivita ϵ_r . Její hodnota potom udává podíl permitivity materiálu izolační vrstvy a permitivity vakua $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.

Magnetická permeabilita μ izolační vrstvy udává chování izolační vrstvy v magnetickém poli, neboli schopnost odolávat rušení. Rovněž může být udávána jako relativní permeabilita μ_r , tedy jako podíl permeability izolační vrstvy a permeability vakua $\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

Dále bývá uváděn *vnější průměr kabelu* neboli vnější průměr pláště. Rovněž jsou podstatné údaje o *jednorázovém* a *opakovaném poloměru ohybu*. Tato hodnota bývá uváděna v násobcích vnějšího průměru kabelu. Dalšími mechanickými parametry jsou *hmotnost kabelu*, *pevnost v tahu* a *pevnost v tlaku*.

Parametry prostředí

Do této kategorie patří parametry popisující prostředí, ve kterém může být kabel používán. Případně mohou popisovat prostředí, při kterém je definována životnost kabelu. Prostředí bývá většinou definováno teplotním rozsahem, maximální vlhkostí a případně odolností proti UV záření.

Elektrické parametry

Kapacita na jednotku délky je udávána ve $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ a vypočte se podle následujícího vzorce:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln \frac{P}{p}} \quad [\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Vnější indukčnost na jednotku délky se vypočítá podle vzorce:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \times \ln \frac{P}{p} \quad [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Pro nízké frekvence je v některých případech uváděna *vodivost na jednotku délky* [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$] popřípadě *odpor na jednotku délky* [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$].

Charakteristická impedance Z_0 je rovna poměru napětí a proudu postupné vlny. U reálných koaxiálních kabelů má malou imaginární složku, na bezztrátovém vedení by byla její hodnota čistě reálná. Její hodnota je důležitá k určení vhodné zakončovací impedance. Není-li zakončovací impedance komplexně sdružená s charakteristickou impedancí, spotřebuje se v ní pouze část energie a zbytek se vrací zpět ke zdroji ve formě odražené vlny. Tato vlna se potom skládá s vlnou přímou a vzniká stojaté vedení.

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \log \frac{P}{p} \quad [\Omega]$$

Útlum na jednotku délky bývá stažen na vzdálenost 100m. Jednotkou je tedy dB/100m. Jak již bylo vysvětleno dříve v této diplomové práci, velikost útlumu vzrůstá s kmitočtem přenášeného signálu. Jeho velikost bývá tedy uváděna pro různé frekvence. Kmitočtově závislý je rovněž *útlum stínění* a *útlum odrazu* udávané v dB .

Činitel zkrácení

Určuje, kolikrát je elektrická délka vlny procházející koaxiálním kabelem menší než délka vlny ve volném prostředí. Rychlost šíření elektromagnetického vlnění závisí na dielektrických vlastnostech izolačního materiálu. Je-li použit jiný izolační materiál než vzduch, tak není rychlost šíření elektromagnetického vlnění rovna rychlosti šíření světla, ale je menší. Vlnová délka signálu přenášeného po koaxiálním kabelu je potom kratší, než by byla ve volném prostředí. Jak již bylo napsáno výše v tomto odstavci, činitel zkrácení je tedy poměr mezi délkou vlny v koaxiálním kabelu a délkou ve volném prostředí. Činitel zkrácení je definován jako poměr fyzické délky koaxiálního kabelu k jeho elektrické délce.

Mezní frekvence určuje kmitočtové pásmo signálů, jež je možné přenášet po koaxiálním kabelu..

Elektrická pevnost je udávána zvlášť pro plášť a zvlášť pro dielektrikum. Po překročení předepsaných hodnot dochází k průrazu izolantu, tedy pláště nebo dielektrika. Po průrazu se izolant stává vodivým. Jako základní jednotka elektrické pevnosti se používá $V \cdot m^{-1}$, nebo častěji $kV \cdot mm^{-1}$. Protože tloušťka pláště i dielektrika je u koaxiálního kabelu známá, je tato veličina uváděna přímo v kV.

Materiál dielektrika bývá uveden na většinou ve formě zkratky definující použitý materiál. V praxi je možná se většinou setkat s pevným polyetylenem (PE), pěnovým polyetylenem (FPE, PF nebo PF CF) nebo polytetrafluorethylenem (PTFE). Činitel zkrácení je dán ε_r a μ_r použitého materiálu. Je tedy možné uvést orientační hodnoty činitele prodloužení pro výše uvedené materiály, tedy činitel prodloužení pro PE je 0,79 – 0,88; pro FPE je 0,66 a pro PTFE 0,8.

Používané konektory

Společně s koaxiálními kabely se používají speciální konektory navržené pro použití při přenosu radiových signálů, tedy signálů o kmitočtu v řádu MHz a vyšších. Jejich speciální konstrukce umožňuje snadné propojení nejen středního vodiče koaxiálního kabelu, ale zároveň také stínění. Podle kmitočtů přenášených signálů bývají tyto konektory označovány jako RF konektory (radiofrekvenční).

Tyto konektory se dělí podle provedení do následujících skupin:

- Standardní konektory (BNC)
- Miniaturní konektory (SMZ, miniaturní BNC konektor)
- Mikro-miniaturní konektory (U.FL)
- Sub-miniaturní konektory (SMA)
- Precizní konektory (APC-7)
- Konektory s přírubou (EIA RF konektory)

V závorce za uvedeným typem RF konektoru je uveden typický zástupce této kategorie.

Měřený objekt se ke spektrálnímu analyzátoru CSA N1996A připojuje pomocí konektoru APC-7. Jedná se o speciální konektor pro laboratorní aplikace. Maximální kmitočet měřicího signálu může být až 18 GHz. Tyto konektory jsou používány zejména pro jejich vysokou přesnost. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena a u některých aplikací může být omezením i maximální frekvence. Zejména kvůli ceně se tento konektor mimo laboratorní aplikace téměř nepoužívá. Z tohoto důvodu je spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A vybaven redukcí tohoto konektoru na v praxi mnohem rozšířenější konektor BNC.

BNC konektor je navržen pro přenos signálů o kmitočtu nižším než 3 GHz a napětí nižším než 500V. Zkratka BNC značí Bayonet Neill-Concelman, podle jeho tvůrců Paula Neilla a Carla Concelmana. Česky bývá označován jako Bajonetový konektor. Jelikož připojované kabely mohou být nejrůznějšího provedení, liší se rovněž typy BNC konektorů. Rozdíl je v průměru připojovaného koaxiálního kabelu a charakteristické impedanci 75 nebo 50Ω odpovídající charakteristické impedanci připojeného koaxiálního kabelu.

8. NEJISTOTY MĚŘENÍ PARAMETRŮ

AGILENT CSA N1996A

Tato kapitola se zabývá vyhodnocováním nejistot parametrů spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A. Jedná se o obecný postup výpočtů standardních nejistot při měření vzdálenosti d a měření útlumu RL na kabelu.

8.1 Obecný postup výpočtu standardních nejistot

Stanovení nejistoty typu A

Stanovení nejistoty typu A se provede standardním způsobem popsaným v kapitole 5. Tato metoda je založena na statické analýze opakované série měření. Pro získání odhadu naměřených hodnot sledovaných parametrů se provede výpočet výběrového průměru $\bar{x}$. Standardní nejistota typu A se určí jako odhad směrodatné odchylky σ tohoto výběrového průměru.

Standardní nejistota typu B

Obecný postup pro výpočet nejistoty typu B je popsán rovněž v kapitole 5. Postup výpočtu standardních nejistot typu B daných parametrů měřicích funkcí spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A je založen na určení významných složek nejistoty typu B. Jedná se zejména o kvantifikaci intervalu maximálního výskytu hodnot sledované měřené veličiny, jehož velikost vychází ze základní chyby přístroje pro danou měřicí funkci.

Kombinovaná a rozšířená nejistota

Při výpočtu rozšířené a kombinované nejistoty bude postupována způsobem popsaným v kapitole 5. Kombinovaná nejistota u_C se vypočítá z nejistot typu A a B pomocí vzorce (5.7).

Pravděpodobnost, že se skutečná hodnota měřené veličiny nachází v intervalu definovaného pomocí kombinované nejistoty u_C je přibližně 68%, za předpokladu normálního rozložení pravděpodobnostní funkce. Takováto pravděpodobnost je v měřicích úlohách nedostatečná. Pro zvýšení pravděpodobnosti se kombinovaná nejistota u_C rozšíří koeficientem rozšíření k_R podle vzorce (5.8). Při výpočtu s velikostí koeficientu rozšíření o velikosti 2 se skutečná hodnota nachází v intervalu definovaném pomocí rozšířené nejistoty s pravděpodobností přibližně 95%. Případně s pravděpodobností 99,7% při výpočtu s koeficientem rozšíření o velikosti 3.

8.1.1 Nejistota měření vzdálenosti k poruše

Při měření vzdálenosti k poruše d na koaxiálním kabelu pomocí spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A velikost standardní nejistoty typu B $u_B(d)$ ovlivňují:

- **Rozlišení přístroje**

Rozlišení přístroje ovlivňuje vyhodnocení nejmenší možné vzdáleností mezi poruchami, jakou je spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A schopen rozpoznat. Rozlišení lze určit podle vzorce (8.1):

$$R = \frac{d}{\frac{1}{2} \cdot P} [m], \text{ kde} \quad (8.1)$$

R je rozlišení [m],

d je měřená vzdálenost [m],

P je počet bodů.

Takto získaná hodnota je již v jednotkách měřené vzdálenosti. Pravděpodobnost výskytu odchylky je stejná v celém daném intervalu. Převedení na složku nejistoty lze tedy provést pomocí vzorce (8.2), přičemž hodnota koeficientu odpovídajícího rovnoměrnému rozložení je $\sqrt{3}$. Takto získaná hodnota bude nadále označována jako $u_{B1}(d)$.

$$u_{B1}(d) = \frac{R}{k_R}, \text{ kde} \quad (8.2)$$

$u_{B1}(d)$ je složka standardní nejistoty B způsobená rozlišením přístroje,

R je rozlišení přístroje,

k_R je koeficient rozšíření.

- **Přesnost frekvenčního rozsahu**

Další faktor ovlivňující přesnost údaje je přesnost použitého frekvenčního rozsahu. Tato nepřesnost je ovlivňována přesností vestavěného generátoru referenční frekvence 10MHz a dále samotnou přesností frekvenčního rozsahu. Ze specifikace spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A vyplývá, že přesnost vestavěného generátoru referenční frekvence f_{PPM} je $\leq \pm 5$ ppm. Jelikož měřeným parametrem je délka, jedná se o nepřímé měření.

Přesnost frekvenčního rozsahu f_{Rp} se určí podle vzorce (8.3).

$$f_{RP} = \frac{f_R}{P_f - 1}, \text{ kde} \quad (8.3)$$

f_{RP} je přesnost frekvenčního rozsahu,

f_R je nastavený použitý rozsah,

P_f je počet bodů frekvenčního rozsahu.

Tovární nastavení počtu bodů frekvenčního rozsahu je 401. Pokud nedojde ke změně této hodnoty uživatelem, bude kalkulováno s touto hodnotou. Vypočtená složka nejistoty má rozměr Hz. Pro převod na jednotky měřené veličiny, čili na metry, je třeba vyčíslit daný koeficient citlivosti neboli převodový koeficient. Z technické dokumentace přístroje je zřejmé, že výpočet vzdálenosti k poruše d se provádí pomocí rovnice (6.1). Pro výpočet převodového koeficientu A_f se provede parciální derivace rovnice (6.1) podle frekvence. Derivací vznikne rovnice (8.4):

$$A_f = -\frac{\frac{1}{4} \cdot P \cdot c \cdot V_{REL}}{f_R^2}, \text{ kde} \quad (8.4)$$

P je počet bodů,

c je rychlost světla, $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

V_{REL} je přenosová rychlost kabelu (relativně k c),

f_R je použitý frekvenční rozsah.

Výpočet standardní nejistoty způsobené nepřesností frekvenčního generátoru bude potom ve tvaru rovnice (8.5):

$$u_{B2}(d) = \frac{\sqrt{A_f^2 \cdot f_{RP}^2}}{\sqrt{3}}, \text{ kde} \quad (8.5)$$

$u_{B2}(d)$ je složka standardní nejistoty B způsobená nepřesností použitého frekvenčního rozsahu,

A_f je převodový koeficient,

f_{RP} je přesnost frekvenčního rozsahu.

Nyní se nejistota typu B skládá ze dvou složek, nejistota u_B se určí jako odmocnina součtu jejich druhých mocnin podle rovnice (8.6).

$$u_B(d) = \sqrt{u_{B1}^2(d) + u_{B2}^2(d)}, \text{ kde} \quad (8.6)$$

$u_B(d)$ je standardní nejistota B měření vzdálenosti k poruše d,

$u_{B1}(d)$ je složka standardní nejistoty B způsobená rozlišením přístroje,

$u_{B2}(d)$ je složka standardní nejistoty B způsobená nepřesností použitého frekvenčního rozsahu.

8.1.2 Nejistota měření útlumu kabelu

Nejistota typu B při vyhodnocování útlumu *RL* kabelu pomocí spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A skládá pouze ze dvou složek. První složka vzniká nepřesností spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A. Nepřesnost se vyčíslí podle následující tabulky v závislosti na použité frekvenci a naměřené hodnotě:

Rozsah	f < 2 GHz	f < 3 GHz	f < 6 GHz
5dB až 10dB	± 0,2 dB	± 0,2 dB	± 0,4 dB
10dB až 20dB	± 0,3 dB	± 0,5 dB	± 0,9 dB
>20dB	± 0,9 dB	± 1,3 dB	± 2,4 dB

Tabulka 3: Závislost přesnosti měření útlumu kabelu

Převedení na složku nejistoty lze tedy provést pomocí rovnice (8.7), přičemž hodnota koeficientu odpovídajícího rovnoměrnému rozložení je $\sqrt{3}$. Takto získaná hodnota bude nadále označována jako $u_{B1}(RL)$.

$$u_{B1}(RL) = \frac{\delta_P}{k_R}, \text{ kde} \quad (8.7)$$

$u_{B1}(RL)$ je složka standardní nejistoty B způsobená nepřesností přístroje,

δ_P je nepřesnost měření útlumu,

k_R je koeficient rozšíření.

Další složka nejistoty typu B vzniká vlivem rozlišení přístroje. Tuto nepřesnost výrobce pevně definuje jako 0,1 dB. Po podělení koeficientem $\sqrt{3}$ platným pro rovnoměrné rozložení podle rovnice (8.8) vznikne druhá složka nejistoty typu B označovaná jako $u_{B2}(RL)$:

$$u_{B2}(RL) = \frac{\delta_R}{k_R}, \text{ kde} \quad (8.8)$$

$u_{B2}(RL)$ je složka standardní nejistoty B způsobená rozlišením přístroje,

δ_R je rozlišení při měření útlumu,

k_R je koeficient rozšíření.

Obě složky nejistot typu B se sloučí pomocí vzorce (8.9) do výsledné standardní nejistoty typu B $u_B(RL)$:

$$u_B(RL) = \sqrt{u_{B1}^2(RL) + u_{B2}^2(RL)} \quad (8.9)$$

8.2 Výpočet nejistoty měření na vzorcích koaxiálních kabelů

Tato kapitola se zabývá popisem a zpracováním naměřených hodnot vzdálenosti a útlumu na vzorcích koaxiálních kabelů. Na rozdíl od předchozí části této kapitoly, kde byl uveden obecný popis, se tato kapitola zabývá zpracováním reálných výsledků měření.

Měření probíhalo na čtyřech vzorcích kabelů. Každý vzorek byl záměrně mechanicky poškozen. Naměřené vzdálenosti k poruše byly vzdálenosti k těmto mechanickým poškozením.

Měření probíhalo v laboratoři E607 UAMT FEKT VUT Brno za těchto podmínek:

Teplota okolí: 25,0 °C

Relativní vlhkost: 54%

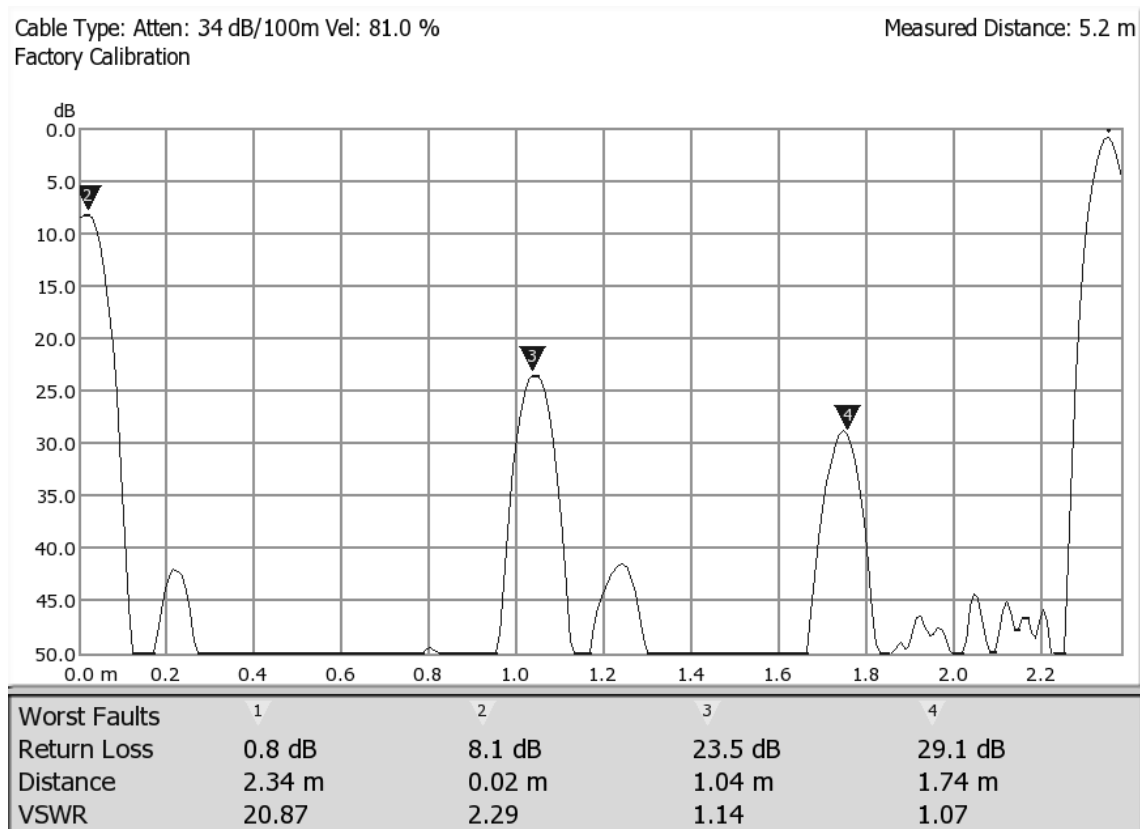
Atmosférický tlak: 1009 hPa

8.2.1 Kabely Belden

Nejprve byly použity dva vzorky kabelu Belden H125 CATV Drop Cable. Oba vzorky se vzájemně lišily pouze délkou kabelu. Při výběru měřeného kabelu nejsou tyto vzorky k dispozici, je tedy nutné zadat parametry kabelu ručně. Tyto hodnoty jsou dostupné v dokumentaci ke kabelu [16]. Konkrétně se jedná o hodnoty činitele zkrácení $V_{REL}=81\%$ a útlum při frekvenci 3GHz je 34dB/100m.

Vzorek kabelu č.1

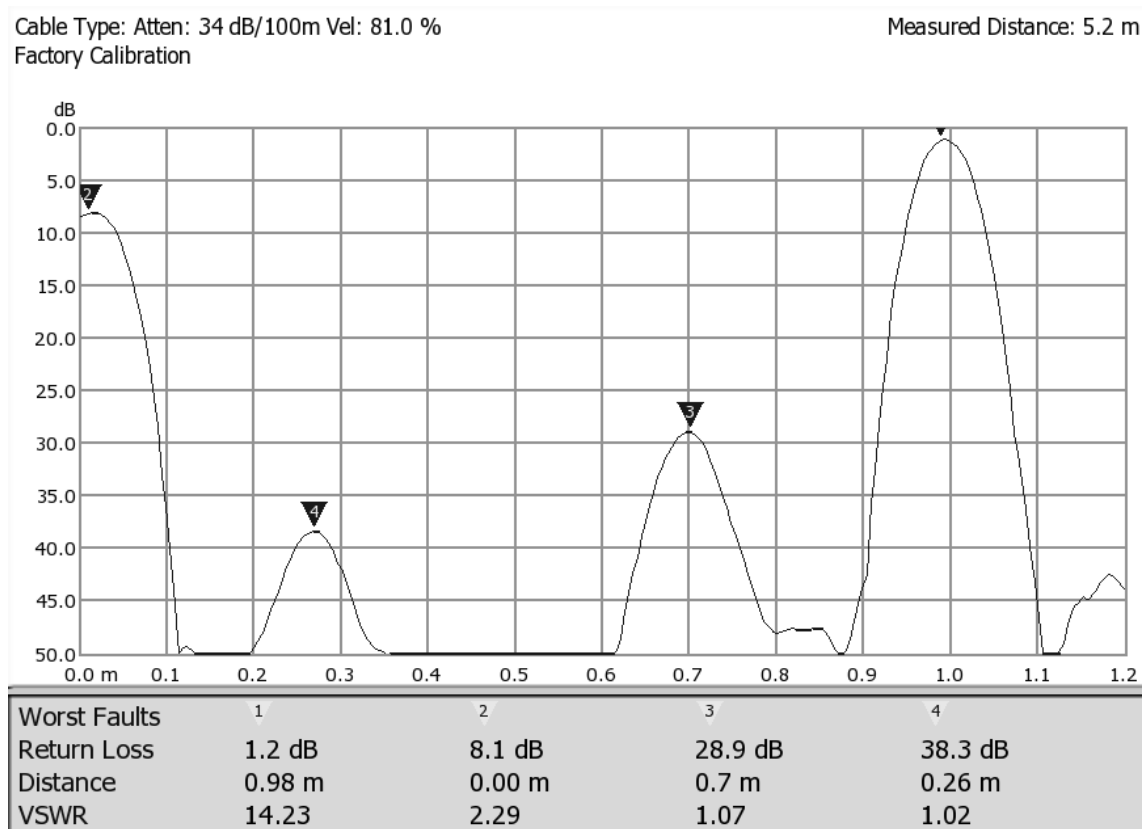
První vzorek tohoto kabel měří 2,34m. Data naměřená při prvním měření jsou zobrazena na obrázku 9:



Obrázek 9: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m

Vzorek kabelu č. 2

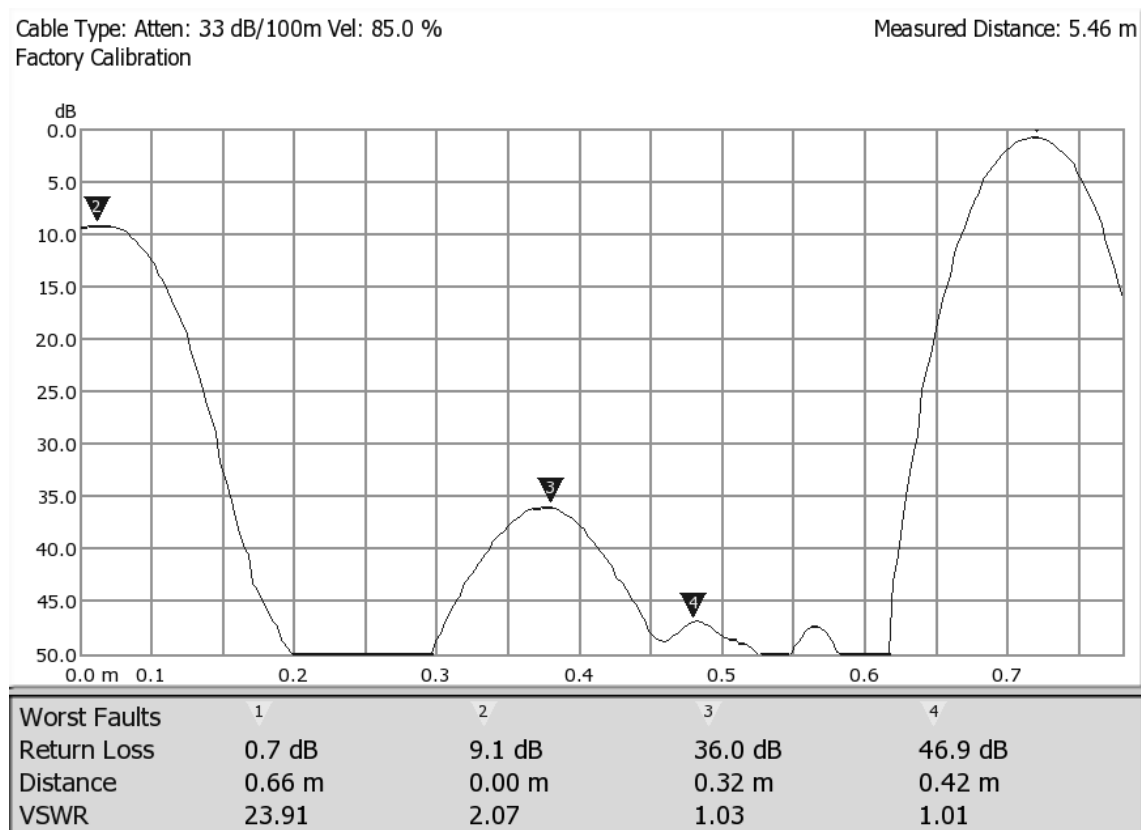
Další kabel měří 0,98m. Během prvního měření byly naměřeny hodnoty zobrazené na obrázku 10:



Obrázek 10: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m

8.2.2 Kabel Draka

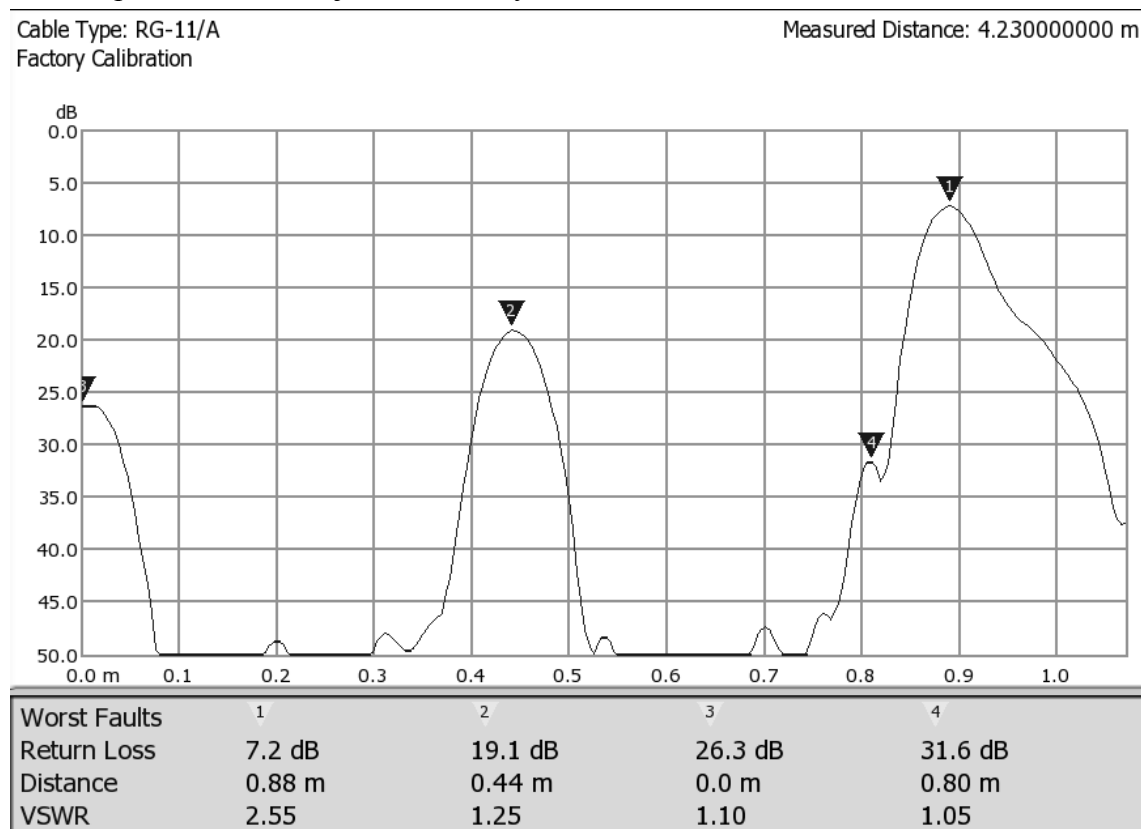
Jako třetí vzorek posloužil koaxiální kabel Draka CATV-Drop-Cable. Z technické dokumentace [17] poskytované výrobcem kabelu byl zjištěn činitel zkrácení V_{REL} 85% a útlum A při frekvenci 3 GHz 33,5dB. Naměřená hodnoty z prvního měření jsou zachyceny na obrázku 11.



Obrázek 11: Naměřené parametry d a RL kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m

8.2.3 Kabel RG11

Jako poslední vzorek posloužil koaxiální kabel RG11, označovaný jako *Yellow cable*. Na rozdíl od předchozích vzorků není nutné ručně zadávat parametry tohoto kabelu. Tento kabel je již nadefinován ve spektrálním analyzátoru Agilent CSA N1996A výrobcem zařízení. Stačí vybrat tento kabel ze seznamu nabízených kabelů. Hodnoty získané prvním měřením jsou zobrazeny na obrázku 12:



Obrázek 12: Naměřené parametry d a RL kabelu RG-11, délka 0,88 m

8.3 Zpracování naměřených hodnot

Měření probíhalo na výše uvedených kabelech. Každé měření bylo opakováno desetkrát a naměřené hodnoty byly zaznamenány. U popisu každého vzorku je přiložen záznam obrazovky spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A při prvním měření (viz. Obrázek 9, Obrázek 10, Obrázek 11 a Obrázek 12). Všechny naměřené a hodnoty jsou uvedeny v Tabulkách 4,5,6 a 7:

Porucha č.	Číslo měření n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	d [m]	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34
	RL [dB]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8
2	d [m]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	RL [dB]	8,1	8,1	8,0	8,0	8,1	8,1	7,9	8,0	8,1	8,1
3	d [m]	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
	RL [dB]	23,5	23,6	23,5	23,5	23,4	23,5	23,5	23,4	23,6	23,5
4	d [m]	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74
	RL [dB]	29,1	29,1	29,3	29,1	29,0	29,2	28,9	29,1	29,1	29,0

Tabulka 4: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m

Porucha č.	Číslo měření n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	d [m]	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	RL [dB]	1,2	1,2	1,0	1,4	0,9	1,2	1,1	1,0	1,0	1,4
2	d [m]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RL [dB]	8,1	8,3	8,1	8,0	8,1	8,0	8,1	7,9	8,2	8,0
3	d [m]	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	RL [dB]	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9
4	d [m]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
	RL [dB]	38,3	38,2	38,3	38,1	38,5	38,0	38,1	38,4	38,2	38,4

Tabulka 5: Naměřené parametry d a RL kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m

Porucha č.	Číslo měření n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	d [m]	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
	RL [dB]	0,7	0,9	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7
2	d [m]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RL [dB]	9,1	9,1	9,0	9,1	9,1	9,1	9,4	9,2	9,1	9,0
3	d [m]	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
	RL [dB]	36,0	36,1	36,0	35,8	36,2	36,3	36,1	36,2	36,0	36,0
4	d [m]	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
	RL [dB]	46,9	47,0	47,0	47,2	46,8	47,0	46,9	47,2	46,9	47,1

Tabulka 6: Naměřené parametry d a RL kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m

Porucha č.	Číslo měření n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	d [m]	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
	RL [dB]	7,2	7,2	7,0	7,4	7,4	6,9	7,2	7,0	7,0	7,0
2	d [m]	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
	RL [dB]	19,1	19,0	19,1	19,0	19,3	19,0	18,9	19,2	19,1	19,4
3	d [m]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RL [dB]	26,3	25,9	26,0	26,5	26,3	26,3	26,3	26,2	26,4	26,4
4	d [m]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	RL [dB]	31,6	31,5	31,9	32,4	31,6	31,1	31,3	31,4	31,8	31,8

Tabulka 7: Naměřené parametry d a RL kabelu RG-11, délka 0,88 m

8.3.1 Měření vzdálenosti k poruše

Zpracování výsledků měření vzdálenosti k poruše d probíhalo podle postupu uvedeného na začátku této kapitoly. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tabulkách 8,9,10 a 11:

Porucha. č.	1	2	3	4
$\bar{d}$	2,34	0,02	1,04	1,74
Suma kvadrátů odchylek	0,00	0,00	0,00	0,00
u_A [m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B1}(d)$ [m]	0,02	0,02	0,02	0,02
f_{PPM} [Hz]	14950	14950	14950	14950
f_{Rp} [Hz]	7475000	7475000	7475000	7475000
A_f	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B2}(d)$ [m]	0,01	0,01	0,01	0,01
$u_B(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$u_C(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$U(d)$ [m]	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabulka 8: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m

Porucha. č.	1	2	3	4
$\bar{d}$	0,98	0,00	0,70	0,26
Suma kvadrátů odchylek	0,00	0,00	0,00	0,00
u_A [m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B1}(d)$ [m]	0,02	0,02	0,02	0,02
f_{PPM} [Hz]	14950	14950	14950	14950
f_{Rp} [Hz]	7475000	7475000	7475000	7475000
A_f	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B2}(d)$ [m]	0,01	0,01	0,01	0,01
$u_B(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$u_C(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$U(d)$ [m]	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabulka 9: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m

Porucha. č.	1	2	3	4
$\bar{d}$	0,66	0	0,32	0,42
Suma kvadrátů odchylek	0,00	0,00	0,00	0,00
u_A [m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B1}(d)$ [m]	0,02	0,02	0,02	0,02
f_{PPM} [Hz]	14950	14950	14950	14950
f_{Rp} [Hz]	7475000	7475000	7475000	7475000
A_f	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B2}(d)$ [m]	0,01	0,01	0,01	0,01
$u_B(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$u_C(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$U(d)$ [m]	0,05	0,05	0,05	0,05

**Tabulka 10: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu
Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m**

Porucha. č.	1	2	3	4
$\bar{d}$	0,88	0,44	0,00	0,80
Suma kvadrátů odchylek	0,00	0,00	0,00	0,00
u_A [m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B1}(d)$ [m]	0,02	0,02	0,02	0,02
f_{PPM} [Hz]	14950	14950	14950	14950
f_{Rp} [Hz]	7475000	7475000	7475000	7475000
A_f	0,00	0,00	0,00	0,00
$u_{B2}(d)$ [m]	0,01	0,01	0,01	0,01
$u_B(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$u_C(d)$ [m]	0,02	0,02	0,03	0,03
$U(d)$ [m]	0,05	0,05	0,05	0,05

**Tabulka 11: Vypočtené hodnoty nejistot měření vzdálenosti k poruše d kabelu RG-
11, délka 0,88 m**

Postup výpočtu standardních nejistot měření vzdálenosti k poruše:

Výpočet pro kabel Belden H125 CATV, délka 2,34m, první porucha ve vzdálenosti $d = 2,34\text{m}$:

Stanovení standardní nejistoty typu A u_A :

$$u_A(d) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - d_p)^2} = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)}} 0,0 = 0,0 \text{ m}$$

Stanovení standardní nejistoty typu B u_B :

Měření vzdálenosti k poruše d bylo realizováno na frekvenčním rozsahu f_r v rozmezí počáteční frekvence 10 MHz a koncové frekvence 3 GHz a tedy $f_r = 2990 \text{ MHz}$

První zdroj nejistoty typu B u_{B1} vzniká vlivem rozlišení spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A:

$$u_{B1}(d) = \frac{1,5 \cdot 10^8 \cdot V_{REL}}{f_R \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,5 \cdot 10^8 \cdot 0,81}{2990 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{3}} = 0,02 \text{ m}$$

Druhá zdroj nejistoty typu B u_{B2} vzniká nepřesností použitého frekvenčního rozsahu a její první část vzniká nepřesností vestavěného 10MHz generátoru, její velikost je uvedena v technické dokumentaci a pro nastavený frekvenční rozsah má hodnotu 14 950 Hz.

Další zdroj nejistoty u_{B2} vzniká vlivem konečného počtu signálů z frekvenčního rozsahu f_R vysílaných do měřeného objektu a její hodnota je určena podle vzorce (8.3):

$$f_{Rp} = \frac{f_R}{P_f - 1} = \frac{2990 \cdot 10^6}{401 - 1} = 7\,475\,000 \text{ Hz, kde}$$

f_{Rp} je přesnost frekvenčního rozsahu,

f_R je nastavený použitý rozsah,

P_f je počet bodů frekvenčního rozsahu.

Z výše uvedeného vyplývá, že zdroj nejistoty $u_{B2}(d)$ vznikající nepřesností vestavěného generátoru je téměř 500x menší než nepřesnost vznikající vlivem konečného počtu signálů. Dále bude tedy tato hodnota f_{ppm} zanedbána. Nyní je nepřesnost frekvenčního rozsahu vyjádřena v Hz, tuto hodnotu je třeba převést na

odpovídající vzdálenost. Pro tento krok je třeba vypočítat koeficient citlivosti A_f podle rovnice (8.4):

$$A_f = -\frac{\frac{1}{4} \cdot P \cdot c \cdot V_{REL}}{f_R^2} = -\frac{0,25 \cdot 256 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 0,81}{(3GHz - 10MHz)^2} = 17 \cdot 10^{-10}$$

Nyní je možné vypočítat druhou složku nejistoty typu B podle rovnice (8.5):

$$u_{B2}(d) = \frac{\sqrt{A_f^2 \cdot f_{RP}^2}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{17 \cdot 10^{-20} \cdot 7\,475\,000^2}}{\sqrt{3}} = 0,0075 \cong 0,01m$$

Ze znalosti $u_{B1}(d)$ a $u_{B2}(d)$ lze pomocí rovnice (8.6) vypočítat nejistotu $u_B(d)$:

$$u_B(d) = \sqrt{u_{B1}^2(d) + u_{B2}^2(d)} = \sqrt{0,02^2 + 0,01^2} = 0,03m$$

Stanovení kombinované a rozšířené nejistoty:

Za předpokladu, že nejistota typu A $u_A(d)$ vyšla nulová, lze konstatovat, že nejistota typu B přímo odpovídá **kombinované nejistotě**:

$$u_C(d) = u_B(d) = 0,03m$$

Stanovení rozšířené nejistoty:

Kombinovanou nejistotu ještě vynásobíme podle vztahu (5.8) koeficientem rozšíření $k_R = 2$ a dostaneme rozšířenou nejistotu:

$$U = k_R \cdot u_C = 2 \cdot 0,03 = 0,06m$$

8.3.2 Měření útlumu

Zpracování výsledků měření útlumu na kabelu probíhalo rovněž podle první části této kapitoly, výsledky jsou uvedeny v Tabulkách 12, 13, 14 a 15 :

Porucha. č.	1	2	3	4
$\bar{RL}$	0,8	8,1	23,5	29,1
Suma kvadrátů odchylek	0,0	0,0	0,0	0,1
$u_A(RL)$ [dB]	0,0	0,0	0,0	0,0
$u_{B1}(RL)$ [dB]	0,0	0,1	0,8	0,8
$u_{B2}(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,1	0,1
$u_B(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,8	0,8
$u_C(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,8	0,8
$U(RL)$ [dB]	0,1	0,3	1,5	1,5

**Tabulka 12: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu Belden H125
CATV, délka 2,34m**

Porucha. č.	1	2	3	4
$\bar{RL}$	1,1	8,1	28,9	38,3
Suma kvadrátů odchylek	0,3	0,1	0,0	0,2
$u_A(RL)$ [dB]	0,1	0,0	0,0	0,0
$u_{B1}(RL)$ [dB]	0,0	0,1	0,8	0,8
$u_{B2}(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,1	0,1
$u_B(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,8	0,8
$u_C(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,8	0,8
$U(RL)$ [dB]	0,2	0,3	1,5	1,5

**Tabulka 13: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu Belden H125
CATV, délka 0,98m**

Porucha. č.	1	2	3	4
$\overline{RL}$	0,7	9,1	36,1	47,0
Suma kvadrátů odchylek	0,1	0,1	0,2	0,2
$u_A(RL)$ [dB]	0,0	0,0	0,0	0,0
$u_{B1}(RL)$ [dB]	0,0	0,1	0,8	0,8
$u_{B2}(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,1	0,1
$u_B(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,8	0,8
$u_C(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,8	0,8
$U(RL)$ [dB]	0,1	0,3	1,5	1,5

Tabulka 14: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m

Porucha. č.	1	2	3	4
$\overline{RL}$	7,1	19,1	26,3	31,6
Suma kvadrátů odchylek	0,3	0,2	0,3	1,2
$u_A(RL)$ [dB]	0,1	0,0	0,1	0,1
$u_{B1}(RL)$ [dB]	0,0	0,3	0,8	0,8
$u_{B2}(RL)$ [dB]	0,1	0,1	0,1	0,1
$u_B(RL)$ [dB]	0,1	0,3	0,8	0,8
$u_C(RL)$ [dB]	0,1	0,3	0,8	0,8
$U(RL)$ [dB]	0,2	0,6	1,5	1,5

Tabulka 15: Vypočtené hodnoty nejistot měření útlumu RL kabelu RG-11, délka 0,88 m

Příklad výpočtu standardní nejistoty útlumu:

Příklad výpočtu pro první vzorek a čtvrtou naměřenou hodnotu, tj. pro průměrnou hodnotu 29,1:

Odhad RL : $RL=29,1\text{dB}$

Stanovení standardní nejistoty typu A:

$$u_A(RL) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - d_p)^2} = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)}} 0,1 = 0,0012 \cong 0,0 \text{ dB}$$

Stanovení standardní nejistoty typu B:

První složka nejistoty $u_{B1}(RL)$ vzniká nepřesností spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A. Naměřena byla hodnota v rozmezí 20-30 dB, podle tabulky 3 má nepřesnost velikost $\pm 1,3\text{dB}$. Na základě toho lze za předpokladu rovnoměrného rozložení pravděpodobnosti výskytu odchylky v daném intervalu vypočítat podle rovnice 8.7 první složku nejistoty typu B $u_{B1}(RL)$:

$$u_{B1}(RL) = \frac{1,3}{\sqrt{3}} = 0,8 \text{ dB}$$

Druhá složka nejistoty $u_{B2}(RL)$ vzniká vlivem rozlišení přístroje, rozlišení δ_R je 0,1dB, opět lze předpokládat rovnoměrné rozložení odchylek od jmenovité hodnoty, $u_{B2}(RL)$ se vypočítá podle rovnice 8.8:

$$u_{B2}(RL) = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,057 \cong 0,1 \text{ dB}$$

Nejistotu $u_B(RL)$ je možné spočítat pomocí těchto hodnot:

$$u_B(RL) = \sqrt{u_{B1}^2(RL) + u_{B2}^2(RL)} = \sqrt{0,8^2 + 0,1^2} = 0,8 \text{ dB}$$

Stanovení kombinované a rozšířené nejistoty:

Za předpokladu, že nejistota typu A vyšla nulová, lze konstatovat, že nejistota typu B přímo odpovídá **kombinované nejistotě** $u_C(RL)$:

$$u_C(RL) = u_B(RL) = 0,8 \text{ dB}$$

Stanovení rozšířené nejistoty $U(RL)$:

Kombinovanou nejistotu $u_C(RL)$ ještě vynásobíme podle vztahu 5.8 koeficientem rozšíření $k_R = 2$ a dostaneme rozšířenou nejistotu:

$$U = k_R \cdot u_C = 2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ dB}$$

8.4 Přehled výsledků

Pro výpočet zde prezentovaných výsledků bylo použito programu Microsoft Office Excel. Díky čemuž nevznikaly problémy se zaokrouhlováním v jednotlivých krocích výsledku. Výpočet probíhal pomocí vzorce zapsaného až pro výpočet rozšířené nejistoty.

Přístroj používaný k měření v rámci této diplomové práce je používán ke školní výuce, proto u něho není v pravidelných předepsaných intervalech prováděna kalibrace. Pokud by byla kalibrace prováděna, byl by k dispozici platný kalibrační list, který by byl použit k úpravě hodnoty údaje měřicího přístroje.

Naměřené hodnoty na jednotlivých vzorcích kabelů jsou prezentovány v následujících jednotlivých tabulkách.

Prvním vzorkem byl Belden H125 CATV Drop Cable, naměřené hodnoty vzdálenosti k poruše d a útlum RL na tomto kabelu jsou uvedeny v tabulce 16:

Porucha	Vzdálenost d [mm]	Útlum RL [dB]
1	$2,34 \pm 0,05$	$0,8 \pm 0,2$
2	$0,02 \pm 0,05$	$8,1 \pm 0,2$
3	$1,04 \pm 0,05$	$23,5 \pm 1,6$
4	$1,74 \pm 0,05$	$29,1 \pm 1,6$

Tabulka 16: Naměřené hodnoty na kabelu Belden H125 CATV, délka 2,34m

Další měření probíhalo na kabelu kratším vzorku shodného kabelu, naměřené hodnoty vzdálenosti k poruše d a útlum RL jsou uvedeny v tabulce 17:

Porucha	Vzdálenost d [mm]	Útlum RL [dB]
1	$0,98 \pm 0,05$	$1,1 \pm 0,2$
2	$0,00 \pm 0,05$	$8,1 \pm 0,2$
3	$0,70 \pm 0,05$	$28,9 \pm 1,6$
4	$0,26 \pm 0,05$	$38,3 \pm 1,6$

Tabulka 17: Naměřené hodnoty na kabelu Belden H125 CATV, délka 0,98m

Třetím předloženým vzorkem byl koaxiální kabel Draka CATV-Drop-Cable, naměřené hodnoty vzdálenosti k poruše d a útlum RL na tomto kabelu uvádí tabulka 18:

Porucha	Vzdálenost d [mm]	Útlum [dB]
1	$0,66 \pm 0,05$	$0,7 \pm 0,2$
2	$0,00 \pm 0,05$	$9,1 \pm 0,2$
3	$0,32 \pm 0,05$	$36,1 \pm 1,6$
4	$0,42 \pm 0,05$	$47 \pm 1,6$

Tabulka 18: Naměřené hodnoty na kabelu Draka CATV-Drop-Cable, délka 0,66 m

Poslední měření probíhalo na koaxiálním kabelu RG11, označovaným jako *Yellow cable*, tento kabel byl označen jako vzorek č.4. Naměřené hodnoty vzdálenosti k poruše d a útlum RL na tomto kabelu jsou uvedeny v tabulce 19:

Porucha	Vzdálenost d [mm]	Útlum RL [dB]
1	$0,88 \pm 0,05$	$7,1 \pm 0,2$
2	$0,44 \pm 0,05$	$19,1 \pm 0,6$
3	$0,00 \pm 0,05$	$26,3 \pm 1,6$
4	$0,80 \pm 0,05$	$31,6 \pm 1,6$

Tabulka 19: Naměřené hodnoty na kabelu RG-11, délka 0,88 m

8.5 Shrnutí dosažených výsledků

Na tomto místě jsou shrnuty některé poznatky z výpočtu nejistot měření pomocí spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A.

Nejprve byly počítány nejistoty měření vzdálenosti k poruše d . I při opakování měření desetkrát byla vždy naměřena stejná hodnota. Nejistota typu A $u_A(d)$ je tudíž nulová a kombinovaná nejistota $u_C(d)$ tudíž odpovídá přímo nejistotě $u_B(d)$, která se skládá ze dvou složek. První složka nejistoty, v textu označovaná jako $u_{B1}(d)$, vzniká vlivem rozlišení nejmenší možné vzdálenosti mezi poruchami d . Druhá složka $u_{B2}(d)$ vzniká vlivem nepřesnosti frekvenčního rozsahu f_R . Měření probíhalo na poměrně krátkých koaxiálních kabelech, bylo tedy zapotřebí nastavit co možná největší rozdíl frekvencí měřicího signálu, neboť rozsah měřené vzdálenosti klesá s rostoucím rozpětí frekvencí měřicích signálů. Poněvadž byl rozptyl frekvencí ve všech případech stejný, byla stejná i složka nejistoty $u_{B2}(d)$ a složka $u_{B1}(d)$ se lišila pouze velikostí činitele zkrácení. Nicméně při pohledu na provedené výpočty je patrné, že složka $u_{B1}(d)$ je přibližně dvojnásobná oproti složce $u_{B2}(d)$. Tudíž větší mírou se na výsledné kombinované nejistotě $u_C(d)$ projeví vliv rozlišení přístroje.

Naměřené hodnoty vzdáleností k poruše d byly potvrzeny následným ověřením této vzdálenosti pomocí svinovacího metru.

Oproti měření vzdálenosti k poruše d se při měření útlumu na kabelu RL již vyskytovala nejistota typu A $u_A(RL)$, přesto byla tato nejistota ve většině případů téměř nulová. Nejistota typu B $u_B(RL)$ se stejně jako v předchozím případě skládá ze dvou složek, první složka $u_{B1}(RL)$ vzniká vlivem nepřesnosti spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1996A a její velikost roste s naměřenou velikostí útlumu kabelu RL. Druhá složka $u_{B2}(RL)$ je pevně daná a vzniká vlivem rozlišení δ_R spektrálního analyzátoru Agilent CSA N1966A. Z vypočtených hodnot vyplývá, že zejména při naměření vyšších hodnot útlumu na kabelu byla dominantní složka $u_{B1}(RF)$.

9. ZÁVĚR

Touto diplomovou prací jsem navázal na svoji bakalářskou práci zabývající se nejistotami měření odporů a kapacit. Cílem mojí diplomové práce bylo seznámení se spektrálním analyzátozem Agilent CSA N1996A a vypracovat všeobecný postup pro stanovení nejistot při měření útlumu a vzdálenosti k poruchám na koaxiálním kabelu. Nakonec realizovat zkušební postup s několika vzorky koaxiálních kabelů.

První část této diplomové práce byla převzata z mojí předcházející bakalářské práce za účelem seznámení čtenáře se standardními nejistotami měření.

Následuje kapitola seznamující čtenáře se samotným spektrálním analyzátozem Agilent CSA N1996A. V první části této kapitoly je popisován všeobecně spektrální analyzátor a jeho technické parametry. Dále následuje přehled měřicích funkcí se zaměřením především na sekci *Stimulus Response*, jenž obsahuje měřicí funkce vzdálenosti k poruše na koaxiálním kabelu a útlum na kabelu.

Jelikož všechna měření provedená v rámci této diplomové práce probíhala na různých typech koaxiálních kabelů, následuje kapitola věnovaná popisu jejich technických parametrů. Je uveden způsob a podmínky šíření signálu po vedení a jsou vysvětleny pojmy z této problematiky. Pro větší přehlednost jsou parametry rozčleněny do třech skupin na fyzikální a mechanické parametry, parametry prostředí a na elektrické parametry. Některé z těchto parametrů jsou v dalším textu uváděny bez vysvětlení.

Další kapitola se zabývá popisem obecného postupu určení nejistot měření vzdálenosti k poruše koaxiálního kabelu a útlumu kabelu. Tato kapitola se již nezabývá všeobecnou teorií nejistot měření, proto je v první části namísto detailního postupu výpočtu nejistoty typu A uveden pouze odkaz na konkrétní místa této práce, kde je možné tento postup najít. Postup pro určení nejistot typu B je rozdělen na dvě části, první část se zabývá stanovením nejistot při měření vzdálenosti k poruše kabelu a druhá při měření útlumu na kabelu. V obou případech bylo nutné provést rozbor zdrojů nejistot, které ovlivňují měření. Většinu zdrojů nejistot je schopen eliminovat samotný spektrální analyzátor Agilent CSA N1996A za předpokladu dodržení předepsaných pracovních podmínek. Všechna měření v rámci této diplomové práce probíhala ve školní laboratoři E607 v prostorách UAMT a tyto podmínky zde byly dodrženy. Další působící vlivy byly vyhledávány zejména ve firemní dokumentaci ke spektrálnímu analyzátoru Agilent CSA N1996A. Firemní literatura k tomuto přístroji je rozdělena do třech samostatných publikací. V některých pasážích zachází do dle mého názoru zbytečných detailů, naopak některé pasáže jsou psány poměrně stroze. Toto se týká i popisu přesnosti spektrálního analyzátoru, která podle mého názoru neodpovídá její závažnosti.

Poslední kapitola popisuje realizaci zkušebních měření na 4 vzorcích koaxiálních kabelů, které byly zcela záměrně v určitých místech mechanicky poškozeny. První dva

vzorky byly stejné koaxiální kabely v různých délkách od výrobce BELDEN, dále byl použit vzorek od výrobce Draka Kabely, s.r.o. Posledním vzorkem byl koaxiální kabel RG-11, používaný v dřívější době pro rozvod ethernetu. Pro větší množství naměřených výsledků byly tyto uvedeny v tabulkách. Postup výpočtu standardních nejistot byl uveden vždy pro jeden typ daného měření. Všechny výpočty v rámci této diplomové práce byly prováděny pomocí programu Microsoft Office Excel, díky čemuž byl vyřešen problém se zaokrouhlováním v jednotlivých krocích výpočtu. Závěr této kapitoly se zabývá zhodnocením naměřených hodnot a dominancí jednotlivých složek nejistot.

Literatura

- [1] TROJAN, M. *Standardní nejistoty měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 85 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D..
- [2] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: Nejistoty v měření I až V, soubor článků v časopise AUTOMA, č. 7-8/2001, č. 10/2001, č. 12/2001, č. 4/2002 a č. 5/2002
- [3] Measurement Guide and Programming Examples : Agilent CSA Spectrum Analyzer [online]. March 2007. USA, [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/N1996-90018.pdf>>.
- [4] User's and Programmer's Reference : Agilent CSA Spectrum Analyzer [online]. March 2007. USA, [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/N1996-90019.pdf>>.
- [5] Specifications Guide : Agilent CSA Spectrum Analyzer [online]. September 2010. USA, [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/N1996-90021.pdf>>.
- [6] SHIN, Yong-June, et al. Application of Time-Frequency Domain Reflectometry for Detection and Localization of a Fault on a Coaxial Cable. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT [online]. DECEMBER 2005, 6, [cit. 2010-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01542557&tag=1>>.
- [7] THOMAS, Steve. ANTENNA SYSTEM MEASUREMENTS USING FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY VS. TIME DOMAIN REFLECTOMETRY. IEEE [online]. 2006, 1-4244-0052-X/06, [cit. 2010-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4062374&tag=1>>.
- [8] FIALKA, Miloslav. Telekomunikační vedení. třetí vydání. [s.l.] : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988. 225 s.
- [9] SVAČINA, Jiří. Mikrovlnná technika. první vydání. [s.l.] : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982. 218 s.
- [10] HOREVAJ, M. VF vedení. In [online]. 200? [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <http://horevaj.com/horevaj/K1_files/K1_3.pdf>.
- [11] HOREVAJ, M. Činitel zkrácení. In [online]. 200? [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <http://www.horevaj.com/horevaj/K1_files/K4_4.pdf>.
- [12] Šíření vln na jedno a dvojvodičovém vedení. In [online]. 200? [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/fei/sireni_vln/teze/otazka_16.pdf>.
- [13] ZEŽULKA, František; HYNČICA, Ondřej. Průmyslový Ethernet I. AUTOMA. 2007, 2007, 1, s. 41-43. Dostupný také z WWW: <<http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~zezulka/download/KPPA/A010741-I.pdf>>.
- [14] KOUTNÁ, Marcela; SOCHOR, Tomáš. Úvod do počítačových sítí [online]. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://distančne.obaka-orlova.cz/PDF/UPS.pdf>>.

- [15] *DigiZone.cz* [online]. 200? [cit. 2010-11-10]. Koaxiální kabely. Dostupné z WWW: <<http://anteny.digizone.cz/koaxialni-kabely/>>.
- [16] Product datasheet. *H125A00 CATV Drop Cable*. 2005-11-30. 2 s.
- [17] DRAKA. *Sdělovací a datové kabely*. 200?. 112 s. Dostupné z WWW: <http://www.draka.cz/images/stories/katalog/datove_kabely/datove-kabely.pdf>.