

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroniky a informačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření účinnosti stínění koaxiálních kabelů a koaxiálních konektorů

Autor práce: **Bc. Martin Tomášek**
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**
Konzultant: **Ing. Karel Babka**

2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin TOMÁŠEK**
Osobní číslo: **E22N0048P**
Studijní program: **N0714A060013 Elektronika a informační technologie**
Specializace: **Elektronika**
Téma práce: **Měření účinnosti stínění koaxiálních kabelů a koaxiálních konektorů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte rešerši metod určených pro měření účinnosti stínění. Zaměřte se především na měření účinnosti stínění kabelů.
2. Seznamte se s měřením účinnosti stínění kabelů pomocí triaxiální metody.
3. Vypracujte metodiku pro měření účinnosti stínění kabelů a konektorů.
4. Změřte účinnost stínění na vzorcích kabelů, včetně kabelů osazených konektory.
5. Zhodnoťte výsledky, zaměřte se také na nejčastější problémy při měření účinnosti stínění kabelů a diskutujte možné vylepšení navržené metodiky.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Normy řady ČSN EN IEC 62153-4-X.

Další vhodnou literaturu si student vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá měřením účinnosti stínění nízkoztrátových koaxiálních kabelů a vysokofrekvenčních konektorů SMA a FAKRA. Konektory FAKRA jsou rovněž běžně využívanou součástí automobilového průmyslu. Práce také řeší popis vybraných zkušebních metod, obecnou fyzikální problematiku elektromagnetického stínění a zaměřuje se na postup měření klasické triaxiální metody a modifikované triaxiální metody koncentrických trubek (tzv. tube-in-tube) při jasném vyložení normativních předpisů, kterým měření podléhá. V závěru práce jsou veškerá data vyhodnocena pomocí základních statistických metod, výběr graficky znázorněn a je provedeno slovní shrnutí měření.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické stínění, SMA, FAKRA, útlum stínění, efektivita stínění, triaxiální metoda, metoda koncentrických trubic, nízkoztrátový kabel

Abstract

This diploma thesis describes screening attenuation measurement methods that are used to evaluate low loss cables and high frequency connectors like SMA and FAKRA, where latter can be mainly found in automotive industry. With the main focus on triaxial method and modified triaxial method (i.e. tube-in-tube), this work specifies physical background along with normative guidelines and recommendations. End chapter then provides numerous plots and tables to interpret measured data with verbal conclusion.

Keywords

Electromagnetic compatibility, electromagnetic screening, SMA, FAKRA, screening attenuation, screening effectiveness, triaxial method, tube-in-tube, lowloss cable

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Zdeňkovi Kubíkovi, Ph.D. za odborné rady a výborné vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Karlovi Babkovi za skvělou asistenci při měření. Poděkování patří také firmě MD Elektronik za poskytnutí přístupu do zkušební laboratoře a umožnění práce s měřicí technikou.

Tato práce byla podpořena studentskou grantovou soutěží Západočeské univerzity v Plzni v rámci projektu SGS-2024-005: Moderní metody řešení, návrhu a aplikace elektronických a komunikačních systémů.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	viii
Seznam obrázků	xii
Seznam tabulek	xviii
Úvod	1
1 Elektromagnetické stínění	2
1.1 Základní charakterizace	2
1.2 Rozbor složek účinnosti stínění	4
1.2.1 Útlum odrazem	4
1.2.2 Absorpční útlum	5
1.2.3 Útlum vlivem mnohonásobného odrazu	5
2 Účinnost stínění kabelů	7
2.1 Fyzikální podstata	7
2.1.1 Rovnice obecné vazby	8
2.1.2 Součtová funkce	8
2.2 Parametry účinnosti stínění pro elektricky krátké kabely	11
2.2.1 Povrchová přenosová impedance	11
2.2.2 Kapacitní vazební impedance	13
2.2.3 Efektivní přenosová impedance	14
2.3 Parametry účinnosti stínění pro elektricky dlouhé kabely	14
2.3.1 Útlum stínění	15
2.3.2 Útlum nevyvážení	17
2.3.3 Vazební útlum	18
2.4 Vazební přenosová funkce	18
2.4.1 Přizpůsobený obvod	19
2.4.2 Vazba v triaxiální metodě	20
2.4.3 Stínění kabelových sestav	23
3 Měření účinnosti stínění kabelů	24
3.1 Kalibrace zkušebních uspořádání	24
3.1.1 Kalibrační nástroje	25
3.1.2 Normativní doporučení	26

3.1.3	Koncernové specifikace	26
3.1.4	Dvojbranné kalibrace	27
3.2	Metoda injekce do vedení	27
3.2.1	Náhradní schéma zapojení	28
3.2.2	Kmitočtový rozsah a vazební délka	28
3.2.3	Zkušební uspořádání	29
3.2.4	Postup měření	30
3.2.5	Vyhodnocení výsledků zkoušky	31
3.3	Triaxiální metoda	32
3.3.1	Náhradní schéma zapojení	32
3.3.2	Kmitočtový rozsah a vazební délka	33
3.3.3	Zkušební uspořádání	35
3.3.4	Postup měření	36
3.3.5	Vyhodnocení výsledků zkoušky	37
3.3.6	Triaxiální metoda koncentrických trubek	37
3.4	Metoda absorpčních kleští	38
3.4.1	Délka zkušebního vzorku	38
3.4.2	Zkušební uspořádání	39
3.4.3	Kalibrační postup	40
3.4.4	Postup měření	42
3.4.5	Vyhodnocení výsledků zkoušky	42
4	Měření triaxiální metodou	44
4.1	Zkušební kabelové vzorky	44
4.2	Vlastní výroba vzorku s SMA konektory	45
4.3	Kalibrace vektorového analyzátoru	48
4.3.1	Kalibrační postup	49
4.3.2	Ověření kalibračního postupu	53
4.4	Měření útlumu stínění kabelu	55
4.4.1	Zkušební uspořádání	55
4.4.2	Postup přípravy zkušebního vzorku pro měření	57
4.4.3	Postup měření	58
4.5	Měření útlumu stínění konektoru pomocí tube-in-tube	60
4.5.1	Zkušební uspořádání	60
4.5.2	Postup přípravy zkušebního vzorku pro měření	61
4.5.3	Postup měření	62
5	Vyhodnocení výsledků měření	65
5.1	Vyhodnocovací kritéria	65
5.1.1	Normativní standardy	65
5.1.2	Limitní křivka	65
5.1.3	Statistické vyhodnocení	66
5.1.4	Ostatní parametry	66

5.2	Interpretace výsledků	67
5.3	Měření útlumu stínění kabelů	67
5.3.1	Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 1 m	67
5.3.2	Měření s konektory SMA ve vazební soustavě 1 m	68
5.3.3	Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 3 m	69
5.3.4	Měření s konektory SMA ve vazební soustavě 3 m	70
5.4	Měření útlumu stínění konektorů	71
5.4.1	Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 0,5 m	71
5.4.2	Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 1 m	72
5.4.3	Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 3 m	74
5.4.4	Měření s konektory SMA ve vazební soustavě 3 m	75
5.5	Možná vylepšení zkušebního postupu	76
5.5.1	Měření reflektometrem	76
5.5.2	Použití paměti při měření	77
6	Závěr	78
6.1	Měření útlumu stínění kabelů	78
6.2	Měření útlumu stínění konektorů	78
6.3	Reflektometrie a nejistota měření	79
	Seznam použité literatury	81
	Přílohy	I

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
E_t	Intenzita elektrického pole bez stínící přepážky	V/m
E_i	Intenzita elektrického pole se stínící přepážkou	V/m
H_t	Intenzita magnetického pole bez stínící přepážky	A/m
H_i	Intenzita magnetického pole se stínící přepážkou	A/m
SE	Účinnost stínění	-
t	Tloušťka	m
Z_0	Impedance volného prostoru	Ω
μ_0	Permeabilita vakua	H/m
ε_0	Permitivita vakua	F/m
Z_M	Impedance vodivého prostředí	Ω
μ	Permeabilita	H/m
ε	Permitivita	F/m
ω	Úhlová rychlost	rad/s
σ	Měrná elektrická vodivost	S/m
γ	Konstanta šíření	-
α	Činitel tlumení	dB/km
β	Činitel fázového natočení	rad/km
β_1	Činitel fázového natočení vnitřního obvodu	rad/km
β_2	Činitel fázového natočení vnějšího obvodu	rad/km
R	Útlum odrazu	-
A	Útlum absorpcí	-
M	Útlum mnohonásobného odrazu	-
U_{gen}	Napětí generátoru	V
Z_1	Charakteristická impedance vnitřního obvodu	Ω
$Z_{1,n}$	Impedance blízkého konce vnitřního obvodu	Ω
$R_{1,n}$	Zatěžovací odpor blízkého konce vnitřního obvodu	Ω
$Z_{1,f}$	Impedance vzdáleného konce vnitřního obvodu	Ω
$R_{1,f}$	Zatěžovací odpor vzdáleného konce vnitřního obvodu	Ω
Z_2	Charakteristická impedance vnějšího obvodu	Ω
$Z_{2,n}$	Impedance blízkého konce vnějšího obvodu	Ω
$R_{2,n}$	Zatěžovací odpor blízkého konce vnějšího obvodu	Ω
$Z_{2,f}$	Impedance vzdáleného konce vnějšího obvodu	Ω
$R_{2,f}$	Zatěžovací odpor vzdáleného konce vnějšího obvodu	Ω
ε_{r1}	Relativní permitivita vnitřního obvodu	-
ε_{r2}	Relativní permitivita vnějšího obvodu	-
β_1	Relativní permitivita vnitřního obvodu	-
β_2	Relativní permitivita vnějšího obvodu	-

Značka	Popis	Jednotka
$U_{1,n}$	Napětí na blízkém konci vnitřního obvodu	V
$U_{1,f}$	Napětí na vzdáleném konci vnitřního obvodu	V
$U_{2,n}$	Napětí na blízkém konci vnějšího obvodu	V
$U_{2,f}$	Napětí na vzdáleném konci vnějšího obvodu	V
P_0	Výkon ve vnitřním obvodu	W
T_f	Přenosová funkce pro vzdálený konec	-
T_n	Přenosová funkce pro blízký konec	-
T_f	Přenosová funkce pro vzdálený konec	-
S_n	Součtová funkce pro blízký konec	-
S_f	Součtová funkce pro vzdálený konec	-
f	Kmitočet	Hz
l	Obecná délka	m
L_C	Vazební délka	m
c_0	Rychlost světla	m/s
λ	Vlnová délka	m
Z_T	Přenosová impedance	Ω
Z_F	Kapacitní vazební impedance	Ω/m
Y_C	Kapacitní vazební admitance	S/m
C_T	Průchozí kapacita	F
Z_{TE}	Ekvivalentní přenosová impedance	Ω
$Z_{TE,n}$	Ekvivalentní přenosová impedance na blízkém konci	Ω
$Z_{TE,f}$	Ekvivalentní přenosová impedance na vzdáleném konci	Ω
a_S	Útlum stínění	dB
P_1	Dodávaný výkon do vnitřního vodiče	W
P_{gen}	Výkon generátoru	W
$P_{r,max}$	Maximální vyzářený výkon	W
E_{nv}	Obálka průběhu	-
S_{21}	Rozptylový parametr přenosu	-
S_{11}	Rozptylový parametr odrazu vstupní brány	-
S_{22}	Rozptylový parametr odrazu výstupní brány	-
$a_{S(n)}$	Normalizovaný útlum stínění	dB
Z_S	Normalizovaná hodnota impedance	Ω
a_U	Útlum nevyvážení	dB
$U_{diff,n}$	Napětí symetrického napájení na blízkém konci	V
$U_{diff,f}$	Napětí na zátěži symetrického zapojení	V
Z_L	Impedance zátěže symetrického a nesymetrického zapojení	Ω
$U_{com,n}$	Napětí nesymetrického napájení na blízkém konci	V
$U_{com,f}$	Napětí na zátěži nesymetrického zapojení	V
I_{com}	Proud v nesymetrickém zapojení	A
I_{diff}	Proud v symetrickém zapojení	A
P_{com}	Výkon přiváděný do nesymetrického zapojení	W
P_{diff}	Výkon přiváděný do symetrického zapojení	W

Značka	Popis	Jednotka
a_C	Vazební útlum	dB
$a_{C(n)}$	Normalizovaná hodnota vazebního útlumu	dB
γ_1	Konstanta šíření vnitřního obvodu	-
γ_2	Konstanta šíření vnějšího obvodu	-
Z_{gen}	Vnitřní impedance generátoru	Ω
f_{cn}	Mezní kmitočet pro blízký konec	Hz
f_{cf}	Mezní kmitočet pro vzdálený konec	Hz
λ_0	Vlnová délka ve volném prostoru	m
λ_2	Vlnová délka ve vnějším prostoru	m
L_i	Délka úseku sestavy	m
n	Počet úseků v sestavě	-
L_C	Vazební délka	m
a_{cal}	Provozní útlum	dB
$U_{gen,cal}$	Napětí generátoru během kalibrace	dB
$U_{rec,cal}$	Napětí na přijímači během kalibrace	dB
VNA	Vektorový síťový analyzátor (Vector Network Analyzer)	-
TOSM	Kalibrační rovina typu Through - Open - Short - Match	-
SOLT	Kalibrační rovina typu Short - Open - Load - Through	-
UOSM	Kalibrační rovina typu Unknown - Open - Short - Match	-
SOLR	Kalibrační rovina typu Short - Open - Load - Reciprocal	-
$f_{max,n}$	Maximální použitelný kmitočet pro blízký konec	Hz
$f_{max,f}$	Maximální použitelný kmitočet pro vzdálený konec	Hz
$a_{meas,n}$	Naměřená hodnota na blízkém konci	Hz
$a_{meas,f}$	Naměřená hodnota na vzdáleném konci	Hz
R_Z	Zatěžovací odpor injekčního obvodu	Ω
$A_{T,n}$	Změřený utlum metodou absorpčních kleští na blízkém konci Ω	dB
$A_{T,f}$	Změřený utlum metodou absorpčních kleští na vzdáleném konci Ω	dB
f_{max-ZT}	Horní kmitočtová mez pro elektricky krátké kabely	Hz
f_g	Teoretický limit triaxiální metody	Hz
d_1	Vnější průměr stínění kabelu	m
D_2	Vnitřní průměr měřicí trubice	m
k_m	Přenos přízpusobovacího členu	-
$a_{Ferrite}$	Útlum feritového absorbéru	dB
a_{rfl}	Útlum odrazu absorpčních kleští	dB
a_{cl}	Celkový útlum uspořádání metody absorpčních kleští	dB
P_n	Výkon naměřený na blízkém konci	dB
P_f	Výkon naměřený na vzdáleném konci	dB
U_n	Napětí naměřený na blízkém konci	dB
U_f	Napětí naměřený na vzdáleném konci	dB
a_{cab}	Útlum přívodních kabelů	dB
SMD	Součástky pro povrchovou montáž (Surface Mount Device)	-
CoMeT	Vazební měřicí trubice (Coupling Measuring Tube)	-

Značka	Popis	Jednotka
SMA	Vysokofrekvenční konektor Subminiature version A	-
FAKRA	Vysokofrekvenční konektor Fachkreis Automobil	-
ESD	Elektrostatický výboj (Electrostatic discharge)	-
P1	Vstupní brána VNA	-
P2	Vstupní brána VNA	-
a_{Sm}	Špičková hodnota útlumu stínění dle IEC	dB
a_{60}	Špičková hodnota útlumu stínění dle LAH v pásmu 30 MHz - 4 GHz	dB
a_{50}	Špičková hodnota útlumu stínění dle LAH v pásmu 4 GHz - 6 GHz	dB
σ_n^2	Variance, rozptyl	dB ²
\bar{x}_n	Aritmetický průměr	dB
a_r	Celkový rozkmit měřených průběhů	dB
TDR	Reflektometrie v časové oblasti (Time-domain reflectometer)	-

Seznam obrázků

1.1	Stínící přepážka v elektromagnetickém poli.	3
1.2	Mnohonásobné odrazy na rozhraních kovové přepážky.	6
1.3	Účinnost stínění hliníkové přepážky o tloušťce $t = 1$ mm a relativní permeabilitě $\mu_r = 1$	6
2.1	Dvě paralelní přenosová vedení se vzájemnou vazbou s injekcí do vnitřního obvodu.	7
2.2	Příklad součtové funkce $S_{n,f}$ s fixní délkou L_C a mezními kmitočty pro blízký f_{cn} a vzdálený konec f_{cf} (převzato s úpravami z [5]).	10
2.3	Definice přenosové impedance Z_T dle ČSN EN 62153-4-7 (převzato s úpravami z [5]).	11
2.4	Definice přenosové impedance Z_T dle ČSN EN 50289-1-6 (převzato s úpravami z [7]).	12
2.5	Teoretické průběhy pro přenosovou impedance Z_T s celistvým stíněním vpravo a pleteným stíněním vlevo pro kabel s měděným stíněním o průměru 5 mm a tloušťkou 127 μm (vytvoreno dle [8]).	13
2.6	Definice kapacitní vazební admitance Y_C (převzato z [7]).	14
2.7	Příklad průběhu přenosového parametru S_{21} (převzato s úpravami z [10]).	15
2.8	Příklad vyhodnocení výsledků měření účinnosti stínění a_S dle ČSN EN 50289-1-6. Čárkovaná čára obecně značí jeho nejmenší přípustnou hodnotu (převzato s úpravami z [10]).	16
2.9	Stíněný kroucený vodič v a) symetrickém a b) nesymetrickém zapojení (převzato s úpravami z [12]).	17
2.10	Ukázka měření parametru nevyváženého útlumu a_U určující vzájemné ovlivňování symetrického a nesymetrického zapojení se symetrizačními členy (baluny) na obou koncích (převzato s úpravami z [12]).	17
2.11	Vypočítaná vazební přenosová funkce pro koaxiální kabel s parametry $L_C = 1$ m; $\epsilon_{r1} = 2, 3$; $\epsilon_{r2} = 1$; $Z_F = 0$ a průběh pro elektricky krátkou vazební délku pro porovnání (převzato s úpravami z [12]).	19
2.12	Principiální uspořádání triaxiální metody (převzato s úpravami z [15]).	20
2.13	Grafické znázornění periodických částečných funkcí (převzato s úpravami z [16]).	21
2.14	Teoretický průběh přenosové funkce triaxiální metody s vyznačenou hodnotou periodických maxim (převzato s úpravami z [16]).	22

2.15	Teoretický průběh přenosové funkce triaxiální metody v lineárním měřítku vodorovné osy s vyznačenou hodnotou periodických maxim (převzato s úpravami z [16]).	22
3.1	Kalibrační rovina ležící na konektorech přívodních kabelů SMA, označených jako S	25
3.2	Manuální kalibrační sada z řady ZN-Z1xx (vlevo) a automatická kalibrační sada z řady ZN-Z5x od firmy Rohde & Schwarz. K dispozici je také široká škála variant, které kombinují různé připojovací konektory a počet bran (převzato z [18]).	25
3.3	Zkušební vzorek metody injekce do vedení pro měření konektoru. Injekční vodič (žloutočervený) se chová jako zdroj rušení (převzato z [22]).	27
3.4	Náhradní schéma metody injekce do vedení. Je zřejmý efekt kapacitní vazební admitance Y_C	28
3.5	Metoda injekce do vedení s naznačeným postupem měření na obou koncích (převzato s úpravami z [7]).	30
3.6	Zkušební uspořádání metody injekce do vedení s měřením na vzdáleném konci, označení je stejné jako na obrázku 3.5 (převzato s úpravami z [7]).	31
3.7	Náhradní schéma triaxiální metody.	32
3.8	Vazební přenosová funkce změřená triaxiální zkušební metodou (převzato z [15]).	33
3.9	Zkušební uspořádání triaxiální metody pro měření přenosové impedance a útlumu stínění s přízpůsobovacím článkem a tlumícím rezistorem R_2 (převzato s úpravami z [24]).	35
3.10	Zkušební uspořádání triaxiální metody (převzato z [25]).	36
3.11	Připojení zkušební vzorku k triaxiální trubici (převzato s úpravami z [7]). .	36
3.12	Připojení zkušební vzorku k triaxiální trubici (převzato s úpravami z [5]). .	38
3.13	Měření povrchové vlny na blízkém konci vzorku (převzato z [7]).	39
3.14	Zkušební uspořádání metody absorpčních kleští. Na obrázku vlevo je blízký konec s absorpčními klešti a generátorem za kovovou deskou, vlevo je pak konec vzdálený zakončený svazkem symetrického kabelu. (převzato z [26]).	40
3.15	Kalibrační uspořádání (převzato z [7]).	40
3.16	Zakončení kabelu během kalibrace (převzato z [7]).	41
3.17	Měření vloženého útlumu absorbérů (převzato z [7]).	41
3.18	Uspořádání pro měření na vzdáleném konci. Označení jednotlivých položek je na obrázku 3.13 (převzato z [7]).	42
4.1	Svazky označených kabelových vzorků.	44
4.2	Detail uspořádání použitého nízkoztrátového koaxiálního kabelu s označením výrobce GG CoSpeed 5031/9 a externí specifikací N.909.934. Jednotky jsou v mm. (převzato z [27]).	45
4.3	Příprava zkušební vzorku dle ČSN-EN-50289-1-6 (převzato z [7]).	45

4.4	Potřebné vybavení pro ruční zhotovení SMA-M konektoru. Na obrázku je zleva skalpel, štípací kleště, lisovací kleště pro <i>lowloss</i> kabely a částmi SMA konektoru včetně jehličky.	46
4.5	Odpláštěný konec kabelu s odebranou hliníkovou fólií a obnaženým dielektrikem ještě bez řezu pro osazení kontaktní jehličkou.	46
4.6	Nasazená kontaktní jehlička připravená k lisování.	47
4.7	Nasazený konektor a lisovací prstenec.	47
4.8	Kontaktování pomocí lisovacích kleští.	48
4.9	Hotový vzorek s nalisovaným konektorem.	48
4.10	Kalibrační uspořádání s vektorovým síťovým analyzátozem ZNB 40 vlevo a automatickou kalibrační sadou ZN-Z54 vpravo pro plnou dvojbrannou kalibraci.	49
4.11	Volba S parametrů v průvodci kalibrací.	49
4.12	Volba zkušebního uspořádání v průvodci kalibrací.	50
4.13	Nastavení referenční impedance a přiřazení fyzických bran k logickým v průvodci kalibrací.	50
4.14	Nastavení šířky pásma rozmitání a aktivního či pasivního zkušebního uspořádání v průvodci kalibrací.	51
4.15	51
4.16	Nastavení frekvenčního rozsahu kalibrace a počtu bodů měření dle LAH.V03.825 v průvodci kalibrací.	52
4.17	Rekapitulační okno průvodce kalibrací.	52
4.18	Dokončení kalibračního procesu.	53
4.19	Hlavní obrazovka měřených S parametrů bezprostředně po kalibraci.	53
4.20	Detail naměřeného průběhu S_{21} při spojených branách P1 a P2.	54
4.21	Precizní zakončovací rezistor o hodnotě 50Ω od firmy Rosenberger.	54
4.22	Detail naměřeného průběhu S_{21} při zatížení bran P1 a P2 precizním rezistorem.	54
4.23	Principiální uspořádání triaxiální metody pro měření útlumu stínění kabelů.	55
4.24	Nástavec pro kontaktování a impedanční zakončení zkušební vzorku napájeného generátorem jakožto součást měřicí hlavičky s momentálně upnutým adaptérem na konektory SMA.	55
4.25	Na obrázku vlevo je měřicí hlavička s nástavcem pro impedanční zakončení s adaptérem pro připojení zkušební vzorku s konektorem FAKRA. Obrázek vpravo pak ukazuje připojení trubice na přijímací bránu VNA.	56
4.26	Upínací mechanismus na blízkém konci trubice.	56
4.27	Měřicí hlavička s upevněným adaptérem pro zkušební vzorky s SMA konektorem.	57
4.28	Vodivý kontakt zkušební vzorku s trubicí na blízkém konci.	58
4.29	Distanční kroužek vložený do trubice v místě rozebíratelného spojení.	58
4.30	Odpláštěná část kabelu vložená do koncových svorek pro stínění o průměru 2,5 mm vlevo a celkové upevnění pomocí matice vpravo.	59
4.31	Připojení zkušební vzorku ke generátoru na blízkém konci trubice.	60
4.32	Principiální uspořádání triaxiální metody koncentrických trubek pro měření útlumu stínění konektorů (převzato s úpravami z [5]).	61

4.33	Upínací mechanismy pro vodivé spojení vnitřní trubice a stínění kabelu na vzdáleném konci vlevo a pro spojení vnitřní a vnější měřicí trubice vpravo. . .	61
4.34	Odpláštěný vzorek s demontovaným krytem FAKRA vložený do upínací svorky.	62
4.35	Přídavné vybavení pro měření metodou tube-in-tube. Vnitřní trubice s distančním kruhem je na obrázku vlevo a sada koncentrických tyčí vpravo.	63
4.36	Upevněný kabel s konektorem FAKRA připravený k nakontaktování s měřicí hlavicí.	63
4.37	Uspořádání na blízkém konci. Upevnění vnitřní trubice do svorek je na obrázku vlevo a následné připojení ke generátoru vpravo.	64
5.1	Porovnání průběhů pro vazební soustavy o délce 1 m a 3 m.	67
5.2	Porovnání průběhů obálek pro vazební soustavy o délce 1 m a 3 m.	67
5.3	Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkoztrátových kabelů N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m.	68
5.4	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m. . . .	68
5.5	Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkoztrátových kabelů N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m.	68
5.6	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m.	69
5.7	Porovnání průběhů obálek útlumu stínění průměrů měření vzorku 2 pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 1,5 m s konektory SMA a FAKRA ve vazební soustavě 1 m.	69
5.8	Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkoztrátových kabelů N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m.	69
5.9	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m. . . .	70
5.10	Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkoztrátových kabelů N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.	70
5.11	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.	70
5.12	Porovnání průběhů obálek útlumu stínění průměrů měření vzorku 3 pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 3,5 m s konektory SMA a FAKRA ve vazební soustavě 3 m.	71
5.13	Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m.	71
5.14	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m. . .	72
5.15	Porovnání průběhů obálek útlumu stínění průměrů měření vzorku 1 pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m a 3 m.	72
5.16	Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m.	72

5.17	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m.	73
5.18	Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m.	73
5.19	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m.	73
5.20	Průběhy obálek útlumu stínění konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m s délkou přesahu odpláštění 10 mm.	74
5.21	Průběhy obálek útlumu stínění konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m se standardní délkou odpláštění a délkou přesahu odpláštění 30 mm.	74
5.22	Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.	75
5.23	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.	75
5.24	Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů SMA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.	75
5.25	Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů SMA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.	76
5.26	Porovnání průběhů obálek průměrů měření vzorku 2 pro konektory SMA a FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.	76
5.27	Porovnání průběhů TDR při různém napnutí kabelu s konektory SMA a FAKRA.	76
5.28	Průběhy obálek měření při různém napnutí nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m.	77
5.29	Průběhy obálek měření při různém napnutí nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.	77
6.1	Průběhy útlumu stínění pro kabel nízkoztrátový N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.	I
6.2	Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.	I
6.3	Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.	II
6.4	Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.	II
6.5	Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.	III
6.6	Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.	III
6.7	Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.	IV

6.8	Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.	IV
6.9	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m pro vzorek 2.	V
6.10	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m pro vzorek 3.	V
6.11	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.	VI
6.12	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.	VI
6.13	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.	VII
6.14	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.	VII
6.15	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 1 s různými přesahy odpláštění	VIII
6.16	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2 s různými přesahy odpláštění	VIII
6.17	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3 s různými přesahy odpláštění.	IX
6.18	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.	X
6.19	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.	X
6.20	Průběhy útlumu stínění konektoru SMA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.	XI
6.21	Průběhy útlumu stínění konektoru SMA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.	XI
6.22	Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro různá napnutí.	XII
6.23	Průběhy útlumu stínění konektoru SMA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro různá napnutí.	XII

Seznam tabulek

1.1	Hodnocení účinnosti elektromagnetického stínění <i>SE</i> (převzato z [4]).	4
3.1	Seznam doporučených norem pro zkušební metody metalických komunikačních kabelů. Tučně označená čísla norem byly v této práci použity jako reference k teoretickému základu či samotnému provedení zkušebních metod.	24
5.1	Tabulka útlumu stínění dle koncernové specifikace LAH.V03.825 (převzato z [19]).	66
5.2	Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m.	67
5.3	Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m.	68
5.4	Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m.	69
5.5	Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.	70
5.6	Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m.	71
5.7	Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m.	72
5.8	Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m.	73
5.9	Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m s různou délkou přesahu odpláštění l	74
5.10	Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.	74
5.11	Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory SMA s kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.	75

Úvod

S přibývajícím počtem elektronických zařízení je důležité řešit otázku elektromagnetické kompatibility či elektromagnetické interference. Zařízení tedy musí být adekvátně chráněna proti rušivým vlivům okolí a ona samotná nesmějí nežádoucí elektromagnetickou energii do okolí vyzařovat. K potlačení tohoto jevu se používá elektromagnetické stínění, jakožto pasivní odrušovací prvek. Aby bylo možné kvantifikovat jeho efektivnost a vyhovět tak stále zvyšujícím se nárokům norem a předpisů, byly pro tento účel vyvinuty různé zkušební metody.

Hlavním cílem práce bylo provedení rešerše používaných metod a na základě dostupnosti použít konkrétní vyhovující metodu pro realizaci měření efektivnosti stínění a prozkoumat možná zlepšení měřicího postupu. Protože se tato problematika potýká s řadou normativních dokumentů dle kterých měření probíhá, nedílnou součástí práce je i srozumitelný výklad postupů a principů, které jsou ve standardech popsány velmi stručně.

Práce je započata fyzikálním popisem elektromagnetického stínění. První kapitola obsahuje jeho základní charakterizaci, dělení a příslušné výpočty. Ve druhé kapitole je podrobně popsána podstata účinnosti stínění metalických kabelů a zkušebních metod. Třetí kapitola obsahuje rešerši konkrétních zkušebních metod, pomocí kterých by bylo možné měření realizovat. Zbytek práce je věnován zkušebnímu postupu a vyhodnocení výsledků zvolené měřicí metody.

1 Elektromagnetické stínění

Klíčovým ukazatelem k posouzení elektromagnetické způsobilosti kabelu je kvalita jeho stínění. Na tuto skutečnost se bere ohled zejména v moderní době, kdy dochází k rapidnímu nárůstu instalací nových zařízení a zdrojů případného rušení tak stále přibývá. Znalost problematiky elektromagnetického stínění je nepostradatelná při návrhu zařízení, které musí splňovat určité emisní normy. Jedná se o nejdůležitější pasivní odrušovací prostředek elektromagnetické kompatibility **EMC**.

Použití stínění řeší minimalizaci nechtěného vyzařování jak z pohledu rušivých zdrojů, tak i ze strany zařízení, které může být tímto vyzařováním ovlivněno. Zmíněnými skutečnostmi se zabývají obě oblasti EMC, jmenovitě elektromagnetická susceptibilita (náchylnost) **EMS** z pohledu příjemce rušení a elektromagnetická interference **EMI** z pohledu zdroje rušení. Stínění má mimo jiné také další funkce jako mechanickou odolnost, ochranu proti dotyku či ochranu proti vlhkosti [1].

1.1 Základní charakterizace

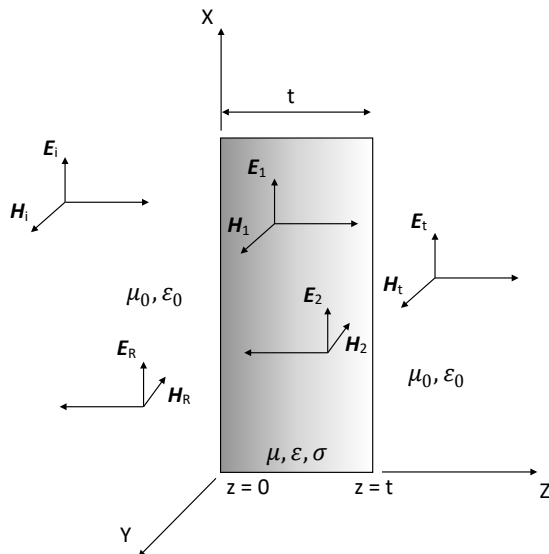
Běžným způsobem stínění je vložení přepážky z kovového materiálu mezi elektromagnetické záření a stíněný objekt. Můžeme tak zavést tzv. **koeficient stínění** K_S , který je definován poměrem intenzit elektrických polí E_t , popřípadě magnetických polí H_t , které popisují prostor se stínící deskou a polí E_i (H_i) popisující prostor bez stínící desky, jak lze vidět na obrázku 1.1. Koeficient stínění K_S je potom dán dle rovnice (1.1):

$$K_S = \left| \frac{E_t}{E_i} \right| = \left| \frac{H_t}{H_i} \right| \left(-, \frac{\text{V}}{\text{m}}, \frac{\text{A}}{\text{m}} \right), \quad (1.1)$$

kde E_t ($\frac{\text{V}}{\text{m}}$) je intenzita elektrického pole bez stínící desky, E_i ($\frac{\text{V}}{\text{m}}$) je intenzita elektrického pole se stínící deskou, H_t ($\frac{\text{A}}{\text{m}}$) je intenzita magnetického pole bez stínící desky a H_i ($\frac{\text{A}}{\text{m}}$) je intenzita magnetického pole se stínící deskou.

Protože v praxi většinou používáme logaritmickou míru, vyjadřujeme tento poměr logaritmem jako **efektivnost** nebo **účinnost stínění** SE , v angl. literatuře *Shielding Effectiveness*. Tu lze zapsat dle rovnice (1.2):

$$SE = 20 \cdot \log_{10} \frac{1}{|K_S|} = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{E_i}{E_t} \right|, \quad SE = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{H_i}{H_t} \right| \quad (\text{dB}). \quad (1.2)$$



Obrázek 1.1: Stínící přepážka v elektromagnetickém poli.

Pokud je dopadající vlna elektromagnetického záření homogenní a prostředí na obou stranách stínící přepážky tloušťky t stejné, jsou výsledky obou definic SE (1.2) totožné z důvodu vzájemného provázání elektrického a magnetického pole charakteristickou impedancí prostředí (1.4). Při různých prostředích na obou stranách stínění dávají vztahy (1.2) různé výsledky. V tomto případě obvykle využíváme první z definic [2].

Obecnou definici SE (1.2) lze dalšími matematickými úpravami vyjádřit pomocí konstant prostředí, mezi které patří charakteristická impedance volného prostoru okolo stínící přepážky Z_0 a charakteristická impedance vodivého prostředí Z_M . K tomu je samozřejmě nutné znát všechny náležité parametry stínící přepážky (ϵ , μ , σ , t) a parametry okolního prostředí (ϵ_0 , μ_0) [2]. Vztah má potom tvar dle rovnice (1.3):

$$SE = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M} \cdot e^{\gamma t} \cdot \left[1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma t} \right] \right| \quad (\text{dB}). \quad (1.3)$$

Pro charakteristickou impedanci volného prostoru Z_0 platí rovnice (1.4) [3]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \, \Omega \approx 120\pi, \quad (1.4)$$

kde μ_0 ($4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$) je permeabilita vakua a ϵ_0 ($8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$) je permitivita vakua.

Pro charakteristickou impedanci vodivého prostředí platí rovnice (1.5) [2]:

$$Z_M = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (\Omega), \quad (1.5)$$

kde μ ($\frac{\text{H}}{\text{m}}$) je permeabilita, ϵ ($\frac{\text{F}}{\text{m}}$) je permitivita, ω ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$) je úhlový kmitočet a σ ($\frac{\text{S}}{\text{m}}$) je měrná elektrická vodivost materiálu stínění.

Veličina γ ve vztahu (1.3) značí tzv. konstantu šíření nebo také vlnové číslo rovinné elektromagnetické vlny ve vodivém prostředí stínící přepážky, kterou udává rovnice (1.6) [2]:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1 + j) \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \alpha + j\beta, \quad (1.6)$$

kde reálná část α ($\frac{\text{dB}}{\text{km}}$) je činitel tlumení a β ($\frac{\text{rad}}{\text{km}}$) je činitel fázového natočení. Tabulka 1.1 pak obsahuje základní kvalitativní rozdělení různých hodnot efektivnosti stínění.

Tabulka 1.1: Hodnocení účinnosti elektromagnetického stínění SE (převzato z [4]).

Účinnost stínění SE (dB)	Kategorie stínění
0 - 10	Nedostatečné stínění
10 - 30	Stínění pro minimální požadavky
30 - 60	Stínění dostačující pro většinu běžných požadavků.
60 - 90	Velmi dobré stínění
90 - 120	Vysoce kvalitní stínění

1.2 Rozbor složek účinnosti stínění

Aby byly zřejmé jednotlivé fyzikální mechanismy stínícího efektu, lze vztah (1.3) rozdělit na jednotlivé složky rovnicí (1.7):

$$SE = R + A + M \text{ (dB)}. \quad (1.7)$$

Následující kapitoly vysvětlují podstatu jednotlivých složek stínění a jejich vztahy tvořící celkový výpočet pro efektivnost stínění.

1.2.1 Útlum odrazem

Složka R vyjadřuje útlum, který vzniká odrazem z důvodu rozdílných impedancí okolního prostředí Z_0 a materiálu stínění Z_M na rozhraní těchto prostředí. Je dán rovnicí (1.8):

$$R = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4 \cdot Z_0 Z_M} \right| \text{ (dB)}. \quad (1.8)$$

Rovnici (1.8) lze dle potřeby dále upravit na vztah (1.9):

$$R = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{Z_0 + Z_M}{2 \cdot Z_M} \cdot \frac{Z_0 + Z_M}{2 \cdot Z_0} \right| = R_1 + R_2 \text{ (dB)}, \quad (1.9)$$

kde R_1 (dB), popřípadě R_2 (dB) vyjadřuje útlum způsobený odrazem elektromagnetické vlny na pomyslném vstupním rozhraní vzduch - kov a výstupním rozhraní kov - vzduch [4].

Pokud platí podmínka $Z_0 \gg Z_M$, kdy je stínění tvořeno materiálem s dobrou vodivostí, poté

je možné celkový útlum R daný rovnicí (1.8) vyjádřit vztahem (1.10):

$$R \approx 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{Z_0}{4 \cdot Z_M} \right| \text{ (dB)}, \quad (1.10)$$

a potom s ohledem na rozhraní vztahem (1.11):

$$R_1 \approx 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{Z_0}{2 \cdot Z_M} \right| \text{ (dB)} \quad a \quad R_2 \approx 20 \cdot \log \frac{1}{2} \approx -6 \text{ dB}. \quad (1.11)$$

Hlavní složka útlumu odrazem R vzniká zřejmě na vstupním rozhraní vzduch - kov R_1 a pouze malá část energie vlny pronikne až k výstupnímu rozhraní kov - vzduch. Zde je přenos R_2 takřka konstantní. Útlum odrazem R tedy není závislý na tloušťce stínící přepážky. Účinným elektrickým stíněním může být i tenká stěna, avšak vyrobena z vysoce vodivého materiálu, tedy již zmíněná podmínka $Z_0 \gg Z_M$ [4].

1.2.2 Absorpční útlum

Absorpční útlum A vyjadřuje tepelné ztráty které vznikají, když stínění o tloušťce t pohltí část energie elektromagnetické vlny. Tato složka účinnosti stínění SE je dána vztahem (1.12):

$$A = 20 \cdot \log_{10} |e^{\gamma t}| = 20 \cdot \log e^{\alpha t} = 20 \cdot \log e^{\frac{t}{\delta}} \text{ (dB)}, \quad (1.12)$$

kde δ je hloubka vniku elektromagnetického pole do stínícího materiálu dána rovnicí (1.13):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \text{ (m)}. \quad (1.13)$$

Úpravou rovnice (1.12) lze hodnotu absorpčního útlumu rovněž vyjádřit vztahem (1.14) [4]:

$$A = 8,69 \cdot \frac{t}{\delta} \text{ (dB)}. \quad (1.14)$$

1.2.3 Útlum vlivem mnohonásobného odrazu

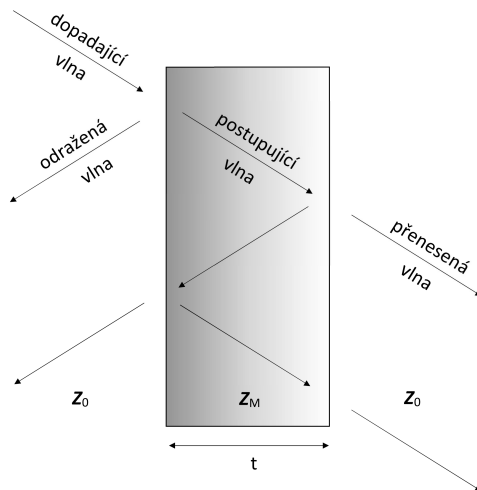
Jak již bylo naznačeno u útlumu odrazem R , na rozhraní dvou impedancí dochází k odrazu elektromagnetické vlny. Podobně je útlum mnohonásobného odrazu způsoben opakovanými odrazy a skládáním vln mezi vstupním a výstupním přechodem stínění, viz. obrázek 1.2. Tento mechanismus může mít nezanedbatelný vliv na celkový útlum stínící přepážky. Velikost útlumu mnohonásobnými odrazy M je potom dána vztahem (1.15):

$$M = 20 \cdot \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2t}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{2t}{\delta}} \right| \text{ (dB)}. \quad (1.15)$$

Pokud je stínění z velmi dobrého kovu ($Z_0 \gg Z_M$) a jeho tloušťka t je mnohonásobně vyšší než hloubka vniku ($t \gg \delta$) je útlum způsobený mnohonásobnými odrazy ≈ 0 dB a lze tak

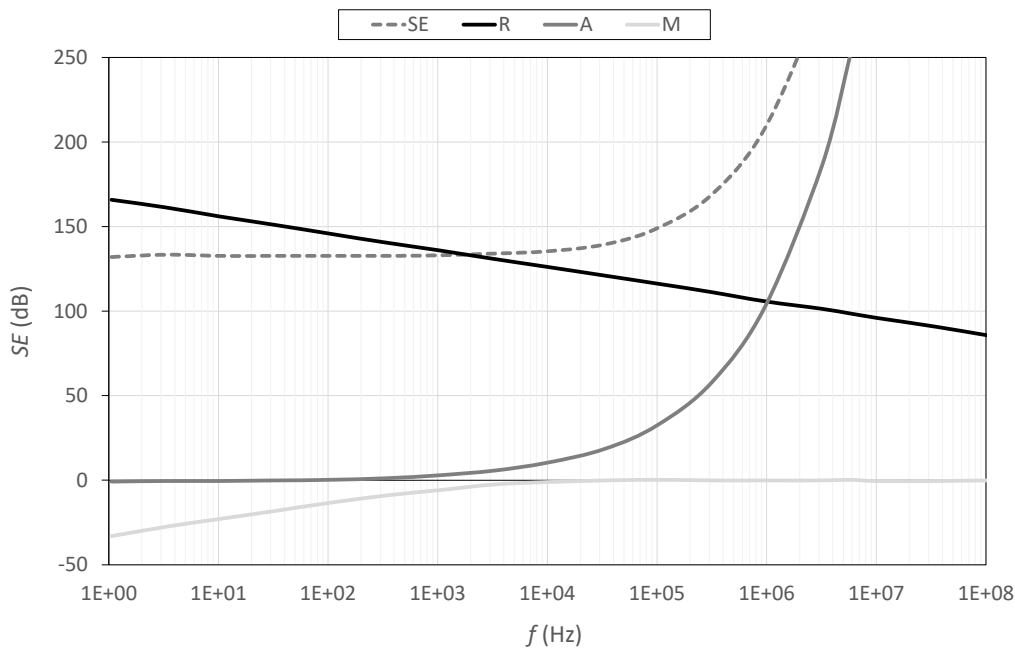
jeho vliv zanedbat [4]. Vztah (1.7) lze pak zjednodušeně psát jako (1.16) [4]:

$$SE = R + A \text{ (dB)}. \quad (1.16)$$



Obrázek 1.2: Mnohonásobné odrazy na rozhraních kovové přepážky.

Příkladem účinnosti stínění SE hliníkové desky o tloušťce 1 mm a relativní permeabilitě $\mu_r = 1$ je průběh na obrázku 1.3.



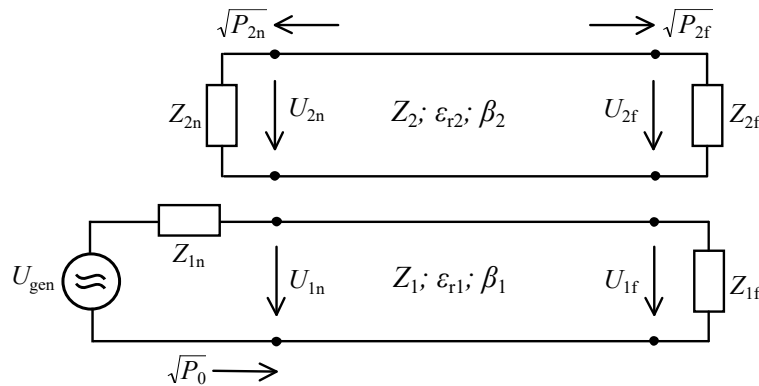
Obrázek 1.3: Účinnost stínění hliníkové přepážky o tloušťce $t = 1$ mm a relativní permeabilitě $\mu_r = 1$.

2 Účinnost stínění kabelů

Mezi základní parametry pro kvantifikaci účinnosti stínění kabelů patří povrchová přenosová impedance Z_T (angl. *transfer impedance*), kapacitní vazební admitance Y_C , útlum stínění a_S (angl. *screening attenuation*) popřípadě vazební útlum a_C (angl. *coupling attenuation*). Souhrnně tyto parametry vyjadřují působení elektromagnetických vazeb mezi vnitřním vodičem, stíněním a okolím v důsledku konečného stínícího účinku.

2.1 Fyzikální podstata

Měřicí metody popsané v této práci vycházejí z modelu dvou přenosových vedení, která se v důsledku vzájemné elektromagnetické vazby po celé své vazební délce L_C (z angl. *coupling length*) ovlivňují a představují tzv. vnitřní a vnější obvod. Vnitřním obvodem je testovaný kabel vyzařující energii vlivem nedokonalého stínění a tvoří tak vazbu s vnějším obvodem, který se chová jako okolní prostředí. Na tento model lze pohlížet i recipročně, tedy napájené injekční vedení může být buď samotný vodič nebo vnější obvod. V druhém případě se tedy zkoumá odolnost kabelu vůči vnějšímu rušení.



Obrázek 2.1: Dvě paralelní přenosová vedení se vzájemnou vazbou s injekcí do vnitřního obvodu.

Na obrázku 2.1 jsou zobrazeny všechny potřebné veličiny. Pro vnitřní obvod je použit index **1** a pro vnější obvod index **2**. Rozlišuje se také blízký a vzdálený konec vedení. *Blízký* konec je blíže generátoru injekčního vedení a je značen indexem **n**, vzdálený konec má potom index **f**. Prostředí obvodů je popsáno charakteristickou impedancí Z_1, Z_2 (Ω), dielektrickou konstantou $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$ (–) a činitelem fázového natočení β_1, β_2 ($\frac{\text{rad}}{\text{km}}$). Obvody jsou pak na obou koncích zakončeny obecnou impedancí $Z_{1(n,f)}, Z_{2(n,f)}$ (Ω). Zmíněné impedance mohou náležet například vstupní či výstupní impedanci generátoru či přijímače. Obrázek také ukazuje šíření navázané vlny do vnějšího obvodu na obě strany vedení, což je naznačeno horizontálními šipkami.

Vnější obvod může být v rámci konkrétní aplikace koncipován jako neferomagnetická trubice, do kterého se koncentricky vkládá testovaný kabel [5]. Vzniká tak *triaxiální uspořádání*, kde stínění kabelu spolu s trubicí tvoří vnější obvod označován indexem **2** a samotný vodič se stíněním potom vnitřní obvod označován indexem **1**. Stejně tak lze místo trubice použít samotný vodič, který se může chovat jako injekce do vedení nebo vazební obvod pro měření vyzářené energie (viz. **EN 50289-1-6**, metoda injekce do vedení). Zapojení na obrázku 2.1 bývá pro dílčí metody modifikováno. Konkrétní metody a náhradní schémata jsou popsány v příslušné podkapitole.

Pro navržení měřicí metody vycházející z této myšlenky musel být sestrojen matematický model, pomocí kterého lze analyticky popsat šíření vlny a následně zkoumat působení vazby na každém místě podél dvou uvažovaných přenosových vedení.

2.1.1 Rovnice obecné vazby

V principu je elektromagnetické působení mezi testovaným kabelem a vnějším prostředím přeslechem mezi dvěma vedeními, který je způsoben kapacitní a induktivní vazbou. Rovnice obecné vazby (2.1) vycházející z náhradního schéma na obrázku 2.1 tuto vazbu vyjadřuje pomocí normalizovaných vlnových amplitud U/\sqrt{Z} nebo přímo odmocninou přenášených výkonů [6]:

$$T_{\text{f}}^{\text{n}} = \frac{U_{2(\text{n},\text{f})}/\sqrt{Z_2}}{U_1/\sqrt{Z_1}} = \frac{\sqrt{P_{2(\text{n},\text{f})}}}{\sqrt{P_0}} (-), \quad (2.1)$$

kde U_1 (V) je napětí generátoru vnitřního obvodu, $U_{2(\text{n},\text{f})}$ (V) je napětí navázané do vnějšího obvodu na blízkém a vzdáleném konci, P_0 (W) je napájecí výkon a $P_{2(\text{n},\text{f})}$ (W) je výkon navázaný do vnějšího obvodu na blízkém a vzdáleném konci.

Pro upřesnění lze rovnici (2.1) dle indexové konvence rozložit na části (2.2) a (2.3):

$$T_{\text{n}} = \frac{U_{2\text{n}}/\sqrt{Z_2}}{U_1/\sqrt{Z_1}} = \frac{\sqrt{P_{2\text{n}}}}{\sqrt{P_0}} (-) \quad (2.2)$$

pro blízký konec a

$$T_{\text{f}} = \frac{U_{2\text{f}}/\sqrt{Z_2}}{U_1/\sqrt{Z_1}} = \frac{\sqrt{P_{2\text{f}}}}{\sqrt{P_0}} (-) \quad (2.3)$$

pro vzdálený konec.

2.1.2 Součtová funkce

Pro vyjádření vazby mezi dvěma vedeními je také nutné zohlednit šíření elektromagnetické vlny, tj. zohlednit model vedení s distribuovanými prvky. Součet příspěvků dílčích vazeb nekonečně malých segmentů po celé délce vedení s ohledem na momentální fázi vyjadřuje tzv.

součtová funkce S_{f} , která je pro blízký a vzdálený konec dána rovnicí (2.4) [7]:

$$S_{\text{f}}(f \cdot L_C) = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\beta \cdot L_C \pm}{2}\right)}{\beta \cdot L_C \pm} \cdot e^{-j\frac{\beta \cdot L_C \pm}{2}}, \quad (2.4)$$

ve které člen $\beta \cdot L_C$ lze vyjádřit pomocí vztahu (2.5) [6]:

$$\beta \cdot L_C \pm = (\beta_1 \pm \beta_2) \cdot L_C = \frac{2\pi \cdot (\sqrt{\varepsilon_{r1}} \pm \sqrt{\varepsilon_{r2}})}{c_0} \cdot f \cdot L_C, \quad (2.5)$$

kde c_0 je rychlost světla ($3 \cdot 10^8$ m/s), L_C (m) je vazební délka a f (Hz) je kmitočet.

Argumentem součtové funkce je součin vazební délky L_C a kmitočtu f a jedná se v principu o funkci typu sinc(x). Symetričnost funkce umožňuje zkoumat její změny při fixní vazební délce a proměnném kmitočtu, nebo naopak. Lze tak určit mezní kmitočty či vazební délky vedení, od kterých součtová funkce začíná kmitat, jinými slovy se začíná projevovat šíření vlny. Dielektrické konstanty ε_r pro vnitřní a vnější obvod potom zavádějí závislost na konkrétním prostředí [6]. Zápis pomocí skládaných indexů \pm opět vyjadřuje konkrétní rovnice (2.6) a (2.7) pro příslušný konec vedení:

$$S_{\text{n}}(f \cdot L_C) = \frac{2 \cdot \sin\left[\frac{(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C}{2}\right]}{(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C} \cdot e^{-j\frac{(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C}{2}}, \quad (2.6)$$

pro blízký a

$$S_{\text{f}}(f \cdot L_C) = \frac{2 \cdot \sin\left[\frac{(\beta_1 - \beta_2) \cdot L_C}{2}\right]}{(\beta_1 - \beta_2) \cdot L_C} \cdot e^{-j\frac{(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C}{2}} \quad (2.7)$$

pro vzdálený konec.

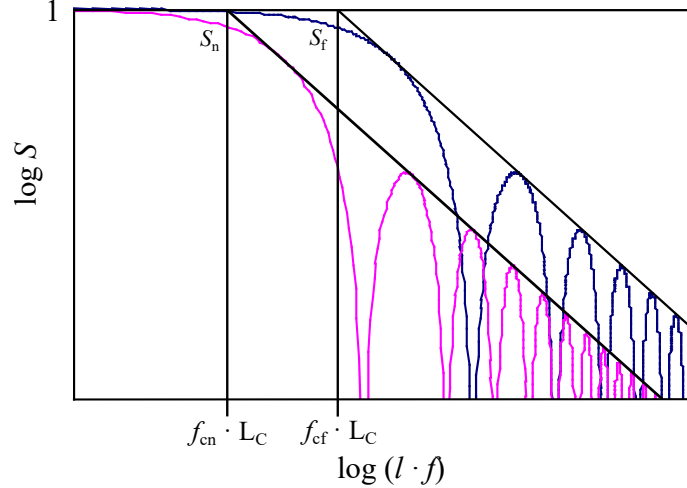
Při použití identity $\sin(x) = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2j}$ lze rovnice pro blízký a vzdálený konec vyjádřit pomocí vztahů (2.8) a (2.9):

$$S_{\text{n}}(f \cdot L_C) = \frac{1 - e^{-j(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C}}{j(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C}, \quad (2.8)$$

pro blízký a

$$S_{\text{f}}(f \cdot L_C) = \frac{1 - e^{-j(\beta_1 - \beta_2) \cdot L_C}}{j(\beta_1 - \beta_2) \cdot L_C} \cdot e^{-j\beta_2 \cdot L_C} \quad (2.9)$$

pro vzdálený konec.



Obrázek 2.2: Příklad součtové funkce $S_{n,f}$ s fixní délkou L_C a mezními kmitočty pro blízký f_{cn} a vzdálený konec f_{cf} (převzato s úpravami z [5]).

Součtovou funkci $S_{n,f}$ lze vyjádřit i v absolutních hodnotách rovnicí (2.10):

$$\left| S_{n,f} \right| = \frac{2 \cdot \sin \left[\frac{(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C}{2} \right]}{(\beta_1 + \beta_2) \cdot L_C}. \quad (2.10)$$

Pro vysoké kmitočty nabývá asymptota hodnota tvaru dle (2.11):

$$\left| S_{n,f} \right| \rightarrow \frac{2}{(\beta_1 \pm \beta_2) \cdot L_C} = \frac{1}{\frac{\pi \cdot (\sqrt{\epsilon_{r1}} \pm \sqrt{\epsilon_{r2}})}{c_0} \cdot f \cdot L_C} \quad (2.11)$$

a pro nízké kmitočty přechází rovnice (2.11) ve vztah (2.12):

$$\left| S_{n,f} \right| \rightarrow 1. \quad (2.12)$$

Jedná se o oblast, kde je šíření vlny pro konkrétní vazební délku takřka zanedbatelné. Aby byla součtová funkce skutečně rovna jedné, musela by se vazební délka L_C limitně blížit k nule a efektivně by se jednalo o popis se soustředěnými parametry.

Dosazením výrazu (2.13)

$$f_{c,n} \cdot L_C = \frac{c_0}{\pi \cdot |\sqrt{\epsilon_{r1}} \pm \sqrt{\epsilon_{r2}}|} \quad (2.13)$$

do rovnice (2.11) asymptota přechází do oblasti nižších kmitočtů (tzn. $S_{n,f} \rightarrow 1$) a je tak získán průsečík asymptotických hodnot pro nízké a vysoké kmitočty pro oba konce a rovnice (2.13) tedy vyjadřuje mezní podmínku pro *elektricky krátké* a *dlouhé* kabely [7].

Kabel je elektricky krátký, pokud platí:

$$f_{c,n} \cdot L_C \leq \frac{c_0}{\pi \cdot |\sqrt{\epsilon_{r1}} \pm \sqrt{\epsilon_{r2}}|} \quad (2.14)$$

nebo elektricky dlouhý, pokud platí:

$$f_{\text{c,n}} \cdot L_C \geq \frac{c_0}{\pi \cdot |\sqrt{\varepsilon_{r1}} \pm \sqrt{\varepsilon_{r2}}|}. \quad (2.15)$$

Popis elektrické délky je důležitý pro pochopení funkce jednotlivých metod a jejich kmitočtových možností, tzn. jaké parametry účinnosti stínění s nimi lze měřit. Mezní kmitočty jsou potom dále upravovány příslušnými vazebními rovnicemi (2.31) a (2.35), kde jsou zohledněny i impedanční poměry vedení. Součtová funkce popisuje kromě zohlednění šíření vln i materiálové parametry vazebního obvodu.

2.2 Parametry účinnosti stínění pro elektricky krátké kabely

Pro každý parametr stínění je charakteristická nejen použitá metoda, ale i zkoumaný kmitočtový rozsah. Parametry pro elektricky krátké kabely popisují účinnost stínění v nižších kmitočtových polohách, tj. $L_C \ll \lambda$ a jsou závislé na délce.

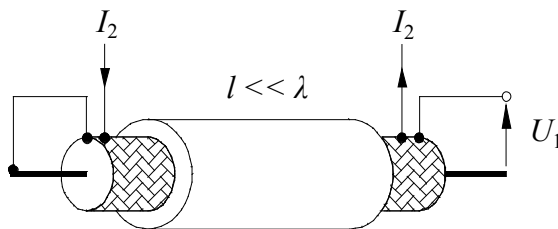
2.2.1 Povrchová přenosová impedance

Přenosovou impedanci lze z definice popsat jako míru rušivého elektrického napětí ve vnitřním obvodu U_1 (tj. na vnitřním vodiči a stínění), které je indukováno elektrickým proudem tekoucím ve vnějším obvodu I_2 (tj. stínění a vnější prostředí) na jednotku délky l . Přenosovou impedanci Z_T lze vyjádřit vztahem (2.16):

$$Z_T = \frac{U_1}{I_2 \cdot L_C} \left(\frac{\Omega}{\text{m}} \right), \quad (2.16)$$

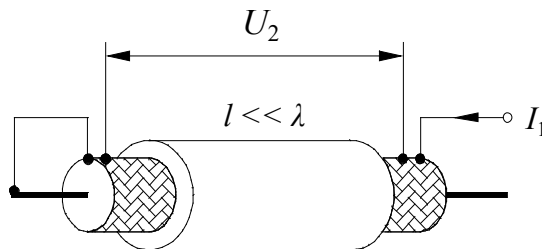
kde U_1 (V) je rušivé napětí ve vnitřním obvodu, I_2 (A) je proud tekoucí stíněním a vnějším obvodem a L_C (m) je vazební délka.

Dle definice (2.16) je zřejmé, že vyšší hodnoty rušivého napětí U_1 navázaného do vnitřního vodiče znamenají i nárůst přenosové impedance Z_T , účinnost stínění se tedy snižuje. Podobnou úvahu lze aplikovat i na proud I_2 , který protéká stíněním. Pokud při stejné hodnotě rušivého napětí U_1 bude stíněním protékat vyšší proud I_2 , celková hodnota přenosové impedance se sníží a kvalita stínění je tudíž vyšší.



Obrázek 2.3: Definice přenosové impedance Z_T dle ČSN EN 62153-4-7 (převzato s úpravami z [5]).

V normách se se lze setkat i s další definicí přenosové impedance. Nyní je rušivým elementem ve vnitřním obvodu proud I_1 , který je vyvolán napětím indukovaným ve vnějším obvodu U_2 .



Obrázek 2.4: Definice přenosové impedance Z_T dle ČSN EN 50289-1-6 (převzato s úpravami z [7]).

Přenosovou impedanci nyní vyjadřuje vztah (2.17):

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1 \cdot L_C} \left(\frac{\Omega}{\text{m}} \right), \quad (2.17)$$

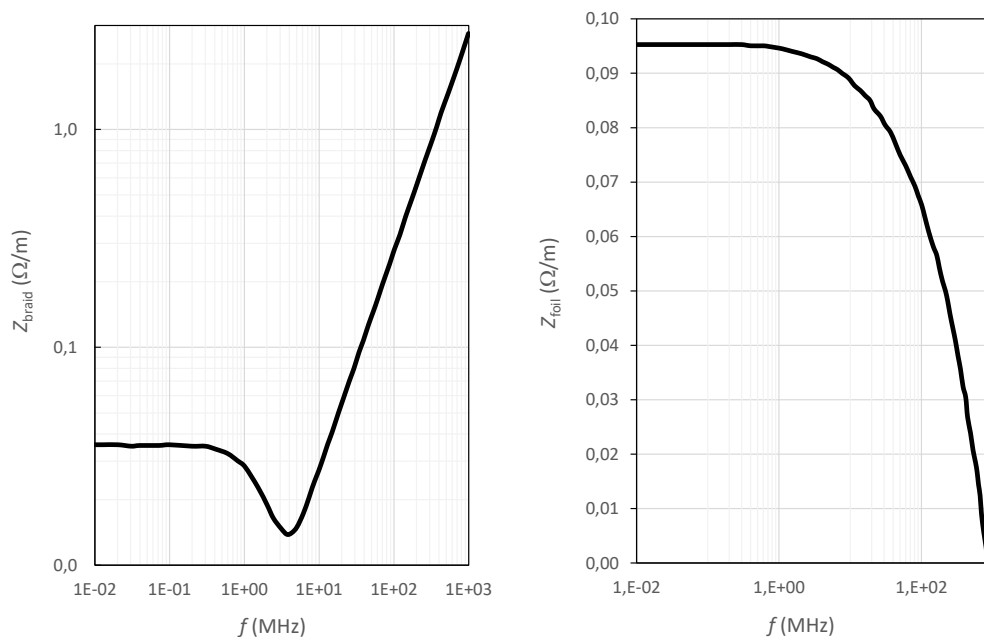
kde U_2 (V) je napětí vnějšího obvodu a I_1 (A) je rušivý proud tekoucí vnitřním obvodem.

Závislost přenosové impedance na délce se uvádí jen pro samotné kabely. Prostým součinem s celkovou délkou vodiče l lze získat jednotku v Ω . Pro konektory nebo kabelové sestavy potom přenosová impedance vyjadřuje pouze v Ω . Kabelovou sestavou (angl. *cable assembly*) rozumíme kabel, který je na obou koncích opatřen konektorem [5].

Dle potřeby lze přenosovou impedanci vyjádřit také ve formě absolutní úrovně rovnicí (2.18):

$$Z_T \text{ (re } 1 \Omega) = 20 \cdot \log_{10} \frac{|Z_T|}{1 \Omega} \text{ (dB)}. \quad (2.18)$$

Přenosová impedance je kmitočtově závislý parametr a s uplatněním skin efektu je jeho výsledná hodnota závislá na hloubce vniku, viz. (1.13). V oblasti nízkých kmitočtů je Z_T rovna stejnosměrnému odporu stínícího materiálu. S rostoucí frekvencí se potom charakteristika přenosové impedance odvíjí od typu použitého stínění.



Obrázek 2.5: Teoretické průběhy pro přenosovou impedanci Z_T s celistvým stíněním vpravo a pleteným stíněním vlevo pro kabel s měděným stíněním o průměru 5 mm a tloušťkou 127 μm (vytvořeno dle [8]).

Celistvé stínění vodiče (např. z kovové pásky) s rostoucím kmitočtem vytlačuje proud na svůj povrch a drží ho tak dále od vnitřního vodiče. Přenosová impedance se tak ideálně v celém frekvenčním spektru snižuje a současně roste i účinnost stínění SE . U **opletených stínění** je chování v nižších kmitočtových rozsazích podobné jako u stínění z celistvého materiálu. Odlišnost průběhu Z_T je pak zřejmá při vyšších kmitočtech (cca. 1 MHz až 10 MHz), kdy se začíná projevovat únik elektromagnetického záření z apertur v opletení. Přenosová impedance po tomto zlomu již opět roste [8]. Teoretické průběhy pro oba typy stínění ukazují obrázek 2.5.

Povrchová přenosová impedance Z_T vyjadřuje působení **induktivní vazby** mezi vnitřním vodičem a stíněním.

2.2.2 Kapacitní vazební impedance

Spolu s přenosovou impedancí Z_T je nutno uvažovat i kapacitní vazební impedanci Z_F , protože zohledňuje kapacitní vazbu způsobenou průchozí kapacitou C_T mezi vnitřním vodičem a vazebním obvodem přes celou vazební délku l , viz. obrázek 2.8. Pro výpočet kapacitní vazební impedance Z_F je nutné nejdříve určit hodnotu kapacitní vazební admitance Y_C dle vztahu (2.19):

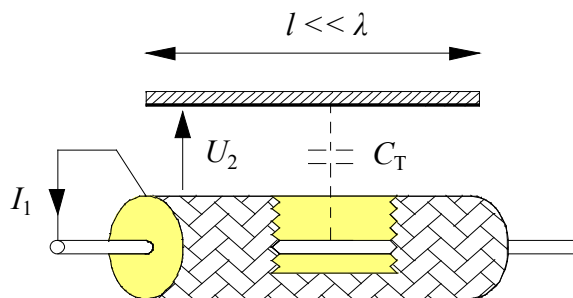
$$Y_C = \frac{I_1}{U_2 \cdot L_C} = j\omega \cdot C_T \left(\frac{\text{S}}{\text{m}} \right), \quad (2.19)$$

kde I_1 (A) je proud vnitřního obvodu, U_2 (V) je napětí vnějšího obvodu vyvolaného v důsledku přítomné kapacitní vazby a C_T (F) je vazební kapacita.

Aby bylo možné vyjádřit vazební účinek jako impedanci a následně ji kvantitativně porovnávat s přenosovou impedancí Z_T , zavádí se právě kapacitní vazební impedance Z_F dle vztahu (2.20) [7]:

$$Z_F = Z_1 \cdot Z_2 \cdot Y_C \left(\frac{\Omega}{\text{m}} \right), \quad (2.20)$$

kde Z_1 (Ω) je charakteristická impedance vnitřního obvodu (kabelu) a Z_2 (Ω) je charakteristická impedance vnějšího obvodu (tzn. měřící soustavy).



Obrázek 2.6: Definice kapacitní vazební admittance Y_C (převzato z [7]).

Kapacitní vazební impedance vyjadřuje působení **kapacitní** vazby, která je způsobena penetrací elektrického pole aperturami stínění. Pokud tedy stínění nemá otvory, tzn. je tvořeno fólií a/nebo dvojitým opletením, je průchozí kapacita C_T zanedbatelná a lze tak při měření zanedbat i vazební kapacitní impedanci Z_F [7].

2.2.3 Efektivní přenosová impedance

Tato veličina zahrnuje společné působení magnetické a kapacitní vazby mezi na testovaným kabelem a okolím, tudíž slučuje parametry povrchové přenosové impedance Z_T a kapacitní vazební impedance Z_F . Některé zkušební metody nedokáží tyto složky oddělit, výsledkem měření je potom efektivní přenosová impedance Z_{TE} . Obecnou definicí ji lze popsat jako maximální absolutní hodnotu součtu či rozdílu kapacitní vazební impedance Z_F a povrchové přenosové impedance Z_T . Efektivní přenosová impedance Z_{TE} je dána rovnicí 2.21 [5]:

$$Z_{TE} = \max |Z_F \pm Z_T| \left(\frac{\Omega}{\text{m}} \right). \quad (2.21)$$

2.3 Parametry účinnosti stínění pro elektricky dlouhé kabely

V kmitočtovém rozsahu elektricky dlouhých kabelů již parametry pro účinnost stínění nezávisí na délce, protože se jedná o poměry výkonů. Parametry pro elektricky dlouhé kabely popisují účinnost stínění ve vyšších kmitočtových polohách, tj. $L_C > \lambda$.

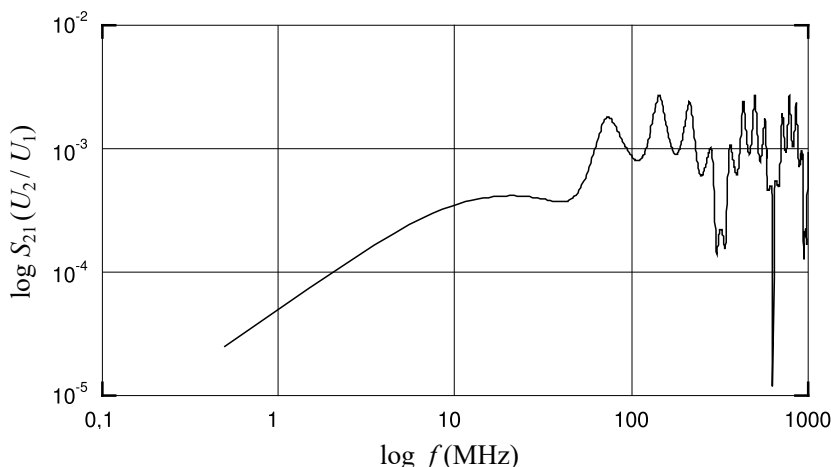
2.3.1 Útlum stínění

Pro elektricky dlouhé kabely vyjadřuje útlum stínění logaritmický poměr mezi hodnotou výkonu dodávaného do vnitřního obvodu P_1 (tj. napájení testovaného kabelu) a vrcholovou hodnotou vyzářeného výkonu $P_{r,\max}$ navázaného do vnějšího obvodu, který byl vyzářen kabelem v důsledku nedokonalého stínění. Útlum stínění a_S je vyjádřen rovnicí (2.22) [9]:

$$a_S = 10 \cdot \log_{10} \left[\text{Env} \left| \frac{P_1}{P_{r,\max}} \right| \right] = -10 \cdot \log_{10} \left[\text{Env} \left| \frac{P_{r,\max}}{P_1} \right| \right] \quad (\text{dB}), \quad (2.22)$$

kde P_1 (W) je výkon dodávaný do kabelu a $P_{r,\max}$ (W) je maximální hodnota vyzářeného výkonu z kabelu.

Při interpretaci výsledků měření této veličiny je útlum stínění a_S brán jako nejvyšší hodnota obalové křivky v měřeném frekvenčním rozmezí. Výsledná hodnota je dle normy vždy **kladná**. Při měření s vektorovým analyzátozem je zkoumána obálka parametru přímého přenosu S_{21} (angl. *forward voltage gain*), který udává poměr napětí mezi vnějším vazebním obvodem U_2 a napětím generátoru na straně napájeného kabelu U_1 .



Obrázek 2.7: Příklad průběhu přenosového parametru S_{21} (převzato s úpravami z [10]).

Navázané napětí do vnějšího obvodu U_2 nemůže být v tomto uspořádání vyšší než napětí napájecí U_1 , naměřený parametr přenosu S_{21} by měl tudíž být vždy menší než 1. Po dosazení do logaritmu by byl potom výsledek záporný, proto se u přepočtu na útlum stínění (2.23) používá počáteční záporné znaménko. Útlum stínění bude tedy opět interpretován dle definice jako kladná hodnota vztahem (2.23):

$$a_S = -20 \cdot \log_{10} [\text{Env} |S_{21}|] = -20 \cdot \log_{10} \left[\text{Env} \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \right] \quad (\text{dB}). \quad (2.23)$$

Pro porovnání s výsledky získanými jinými zkušebními metodami se útlum stínění také vyjadřuje pomocí normalizované hodnoty impedance $Z_S = 150 \Omega$. Je nutné podotknout, že Z_S je normalizovaná hodnota impedance prostředí typické kabelové instalace a nemá nic společ-

ného s impedancí vnějšího obvodu měřícího uspořádání. Normalizovaný útlum stínění $a_{S(n)}$ vyjadřuje vztah (2.24) [11]:

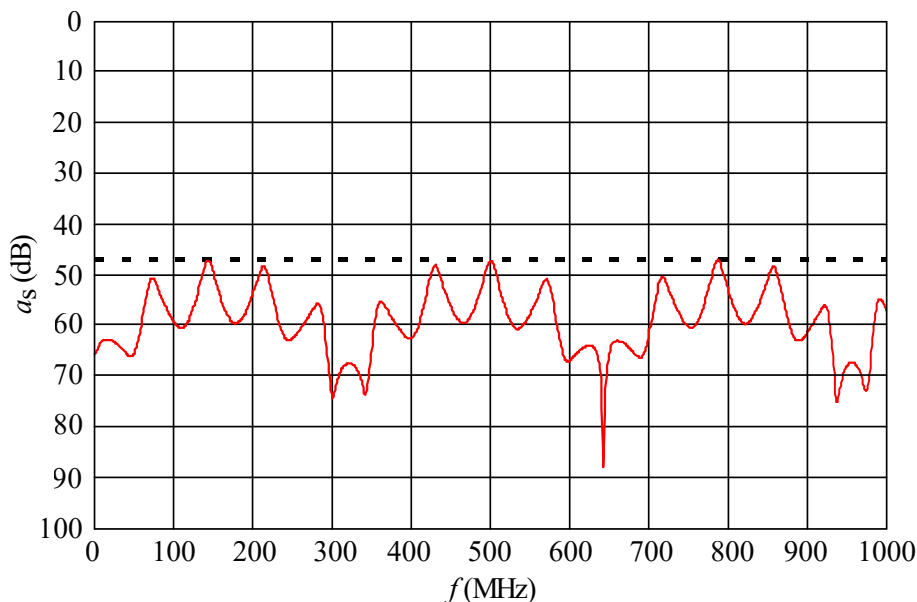
$$a_{S(n)} = 10 \cdot \log_{10} \left[\text{Env} \left| \frac{P_1}{P_{r,\max}} \right| \right] + 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{2 \cdot Z_S}{Z_1} \right| \quad (\text{dB}), \quad (2.24)$$

který potom s naměřeným parametrem přenosu S_{21} přechází v (2.25):

$$a_{S(n)} = -20 \cdot \log_{10} [\text{Env} |S_{21}|] + 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{2 \cdot Z_S}{Z_1} \right| \quad (\text{dB}), \quad (2.25)$$

kde Z_S (Ω) je normalizovaná hodnota impedance a Z_1 (Ω) je impedance testovaného kabelu.

Označení normalizované hodnoty útlumu stínění $a_{S(n)}$ bylo zavedeno pouze pro odlišení od nenormalizované hodnoty. Ve standardech se pro oba používá souhrnné označení a_S . U obrázku 2.8 je důležité si také povšimnout opačné orientace svislé osy.



Obrázek 2.8: Příklad vyhodnocení výsledků měření účinnosti stínění a_S dle ČSN EN 50289-1-6. Čárkovaná čára obecně značí jeho nejmenší přípustnou hodnotu (převzato s úpravami z [10]).

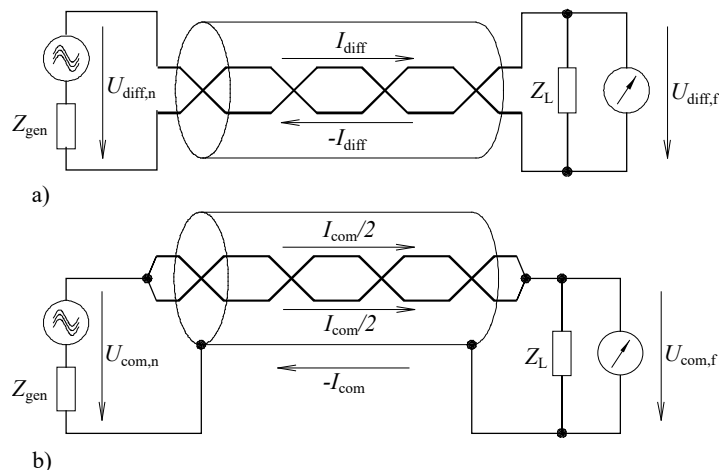
Ačkoli je standardně útlum stínění udáván v kladných hodnotách, interní směrnice konkrétního závodu tuto skutečnost upravují dle vlastního uvážení a výsledek útlumu stínění bývá často interpretován v záporných hodnotách i přesto, že měření probíhalo dle standardu s požadavkem na znaménko kladné. To je i fyzikálně správně, jelikož útlum vyjádřený v záporných hodnotách by byl v podstatě zisk. Důvodem používání záporného znaménka je ale fakt, že útlum stínění a_S lze rovnou interpretovat jako změřený parametr přenosu S_{21} bez nutnosti přepočtu znaménka. Přepočet na normalizovanou impedanci by se v tomto případě provedl dle vztahu (2.26) jako:

$$-a_{S(n)} = 20 \cdot \log_{10} [\text{Env} |S_{21}|] - 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{2 \cdot Z_S}{Z_1} \right| \quad (\text{dB}). \quad (2.26)$$

Záporné znaménko výrazu na levé straně rovnice bývá však zanedbáno a výsledný (normalizovaný) útlum stínění je vyjádřen například jako $a_S = -60$ dB.

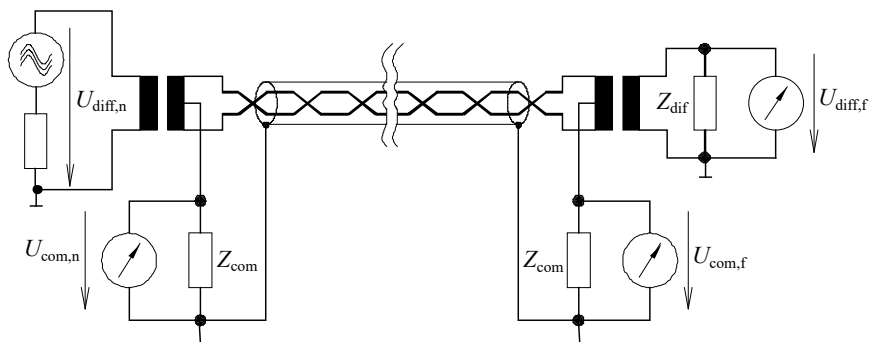
2.3.2 Útlum nevyvážení

Útlum nevyvážení vyjadřuje míru nesymetrie uspořádání kabelu s kroucenými vodiči. Ideálně by se elektromagnetické vyzařování mělo kroucením zcela vyrušit, reálně tohoto stavu však nelze dosáhnout a část elektromagnetické energie je vyzařena do okolí.



Obrázek 2.9: Stíněný kroucený vodič v **a)** symetrickém a **b)** nesymetrickém zapojení (převzato s úpravami z [12]).

Stíněný kroucený pár lze provozovat v **symetrickém** (angl. *differential mode* také *balanced*), či **nesymetrickém** zapojení (angl. *common mode* také *unbalanced*). V symetrickém zapojení je koncové zařízení zapojeno mezi oba párové vodiče, kde jeden vede proud I_{diff} od zdroje a druhý, návratový vodič, zase proud $-I_{\text{diff}}$ zpět ke zdroji a stíněním žádný proud neprotéká. Naproti tomu nesymetrické zapojení využívá stínění jako návratovou cestu zpět ke zdroji, kterým pak protéká proud $-I_{\text{com}}$. Spojenými kroucenými vodiči pak protéká proud I_{com} , tedy $I_{\text{com}}/2$ na samotný vodič v páru [12].



Obrázek 2.10: Ukázka měření parametru nevyváženého útlumu a_U určující vzájemné ovlivňování symetrického a nesymetrického zapojení se symetrizačními členy (baluny) na obou koncích (převzato s úpravami z [12]).

V ideálním případě nedochází ke vzájemnému působení obou zapojení. Symetrické zapojení by například nemělo do okolí vyzařovat elektromagnetickou energii, protože by bylo kroucení ideálně symetrické. V reálném uspořádání tento jev nelze potlačit a část vyzářené energie dopadá na stínění. Tím je ihned ovlivněno nesymetrické zapojení, protože využívá stínění jako návratový vodič a vyzářená energie z kroucených párů pak působí jako rušení.

Útlum nevyvážení a_U lze obecně určit jako logaritmický podíl výkonu vedeného diferenciálním P_{diff} párem k výkonu P_{com} , který je způsoben nechtěnou vazbou se stíněním dle rovnice 2.27 [13]:

$$a_U = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_{\text{diff}}}{P_{\text{com}}} \right| \text{ (dB)}, \quad (2.27)$$

kde P_{diff} (W) je výkon dodávaný do symetrického zapojení a P_{com} (W) je výkon v nesymetrickém zapojení.

2.3.3 Vazební útlum

Vazební útlum vyjadřuje celkový účinek ochranných prvků, které potlačující nechtěné vyzařování elektromagnetické energie z kabelu, tedy kabelové stínění a_S a kroucení vnitřních vodičů a_U . Jelikož se jedná o logaritmicky vyjádřené veličiny, lze výsledný vazební útlum a_C určit součtem dle rovnice 2.28 [14]:

$$a_C \approx a_S + a_U \text{ (dB)}. \quad (2.28)$$

Ze vztahu (2.28) je zřejmé, že u stíněných nesymetrických kabelů je vazební útlum a_C roven pouze útlumu stínění a_S , protože útlum nevyvážení a_U se v tomto případě nebude projevovat. U nestíněných symetrických kabelů se potom vazební útlum rovná pouze útlumu nevyvážení a_U . Celkový vazební útlum a_C bez jednotlivých složek lze určit obdobně jako útlum stínění a_S , kdy je ve vnějším měřicím obvodu zachycena vyzářená elektromagnetická energie ze symetrického vodiče. Definice je pak také obdobná a je dána rovnicí 2.29:

$$a_C = 10 \cdot \log_{10} \left[\text{Env} \left| \frac{P_1}{P_{r,\text{max}}} \right| \right] \text{ (dB)}. \quad (2.29)$$

S naměřeným parametrem přenosu S_{21} je potom normalizovaný vazební útlum $a_{C(n)}$ dán rovnicí (2.30):

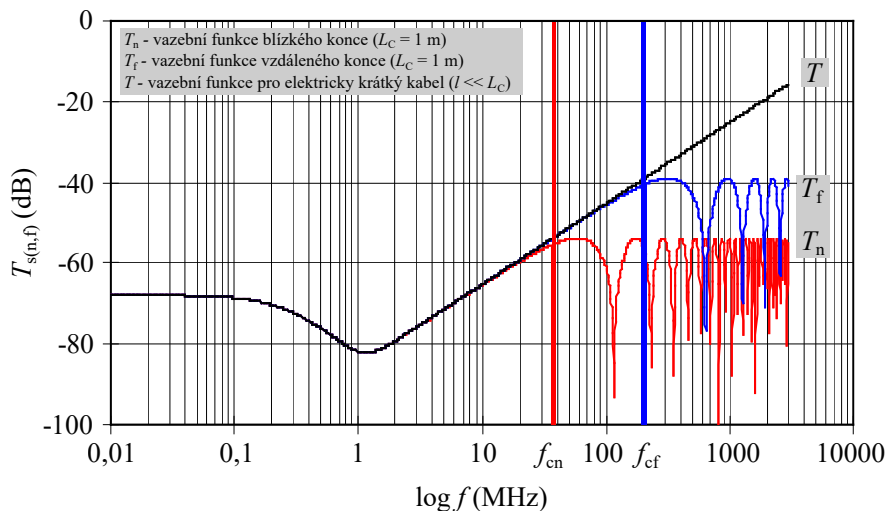
$$a_{C(n)} = -20 \cdot \log_{10} [\text{Env} |S_{21}|] + 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{2 \cdot Z_S}{Z_1} \right| \text{ (dB)}. \quad (2.30)$$

2.4 Vazební přenosová funkce

Po definici rovnice obecné vazby, součtové funkce a parametrů stínění pro elektricky dlouhé a krátké kabely následuje popis vazební přenosové funkce $T_{S(n,f)}$, která všechny tyto prvky slučuje. Pomocí vazební přenosové funkce lze matematicky popsat průběh parametrů stínění a poté je porovnávat s naměřenými hodnotami získanými pomocí příslušných zkušebních metod.

2.4.1 Přizpůsobený obvod

Mezi primární veličiny pro určování účinnosti stínění patří již zmiňovaná povrchová přenosová impedance Z_T a kapacitní vazební impedance Z_F a taktéž i efektivní přenosová impedance Z_{TE} . Pro stínění kabelu nebo pak pro konektory lze předpokládat, že budou po celé své délce strukturálně konstantní.



Obrázek 2.11: Vypočítaná vazební přenosová funkce pro koaxiální kabel s parametry $L_C = 1$ m; $\epsilon_{r1} = 2,3$; $\epsilon_{r2} = 1$; $Z_F = 0$ a průběh pro elektricky krátkou vazební délku pro porovnání (převzato s úpravami z [12]).

Za těchto podmínek vyjadřuje vzájemné ovlivňování zkoušeného vzorku a okolí vazební přenosová funkce $T_{s,n}$ dána rovnicí 2.31 [5]:

$$T_{s,n} = \frac{U_{2,n}}{U_{1,n}} = -(Z_F \pm Z_T) \cdot \frac{1}{\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}} \cdot \frac{L_C}{2} \cdot S_n(-), \quad (2.31)$$

kde $U_{2(n,f)}$ (V) je napětí na blízkém a vzdáleném konci vnějšího obvodu, $U_{1,n}$ (V) je napětí generátoru vnitřního obvodu, Z_F (Ω) je kapacitní vazební impedance, Z_T (Ω) je povrchová přenosová impedance, Z_1 (Ω) je charakteristická impedance vnitřního obvodu, Z_2 (Ω) je charakteristická impedance vnějšího obvodu, L_C (m) je vazební délka a $S_{n,f}(-)$ je součtová funkce.

Ve vnitřním obvodu postupuje elektromagnetická vlna od zdroje ke vzdálenému konci vedení $U_{1,f}$, který je impedančně přizpůsoben ($Z_1 = Z_{\text{gen}} = Z_{1,f}$). Ve vnějším obvodu se potom část navázané vlny šíří na obě strany impedančně přizpůsobeného vedení ($Z_2 = Z_{2,n} = Z_{2,f}$). Potom je možné ve vnějším obvodu na blízkém konci u generátoru $U_{2,n}$ naměřit napětí části navázané vlny stejně tak jako na konci vzdáleném napětí $U_{2,f}$. Vznikají tedy průběhy pro blízký a vzdálený konec, což je znázorněno na obrázku 2.11.

Jelikož vazební přenosová funkce je ve své podstatě poměr napětí, jedná se přímo o kvantitu změřenou zkušební metodou. Toto označení náleží hlavně matematickému popisu z kterého

lze určit teoretický průběh vazební funkce, při reálném měření svislá osa s označením $T_{s(n,f)}$ odpovídá již definovaným parametrům stínění tedy přenosové impedanci Z_T a při vyšších kmitočtech útlumu stínění a_S , který vyjadřuje efektivitu stínění pro elektricky dlouhé délky ($l > \lambda$) zde pro blízký i vzdálený konec.

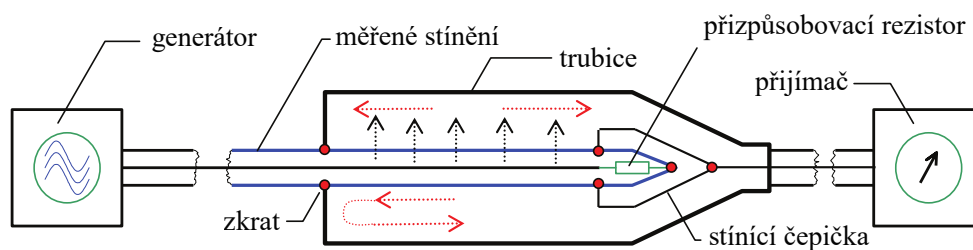
Pro nízké frekvence, kdy $S_{n,f} \approx 1$ se vztah (2.31) zjednodušuje na vztah (2.32):

$$T_{s,n} = \frac{U_{2,n}}{U_{1,n}} = -(Z_F \pm Z_T) \cdot \frac{1}{\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}} \cdot \frac{L_C}{2} \quad (-) \quad (2.32)$$

a odpovídá průběhu vazební přenosové funkce v nižších frekvenčních polohách pro elektricky krátké vazební délky. Na obrázku 2.11 je rovnicí 2.32 například popsána vazební funkce T , jelikož je její vazební délka ve zkoumaném frekvenčním rozsahu elektricky krátká. Rovnice 2.32 také popisuje vazební funkce pro blízký T_n a vzdálený konec T_f pod mezními kmitočty f_{cn} , respektive f_{cf} . Je tedy zřejmé i chování reálných zkušebních metod, které mají konečnou vazební délku.

2.4.2 Vazba v triaxiální metodě

V praxi je obecně výhodné zkratovat jeden z konců vnějšího vazebního systému a provozovat ho tak impedančně nepřizpůsobený. Energie vyzářená stíněním se naváže do vnějšího obvodu a šíří se současně k oběma koncům. U přizpůsobeného vnějšího obvodu by bylo možné změřit přenosovou funkci T_n na blízkém i vzdáleném konci T_f a z výsledků poté určit efektivnost stínění. Vlivem zkratu na příslušném konci ale dochází k totálnímu odrazu části energie a vlna se tak šíří zpět k opačnému konci, kde dochází k superpozici [6]. Lze tak určit pouze jednu přenosovou funkci (tj. poměr napětí) a zjednodušit tak měření. U triaxiální metody se zkrat nachází na blízkém konci vnějšího obvodu, viz. obrázek 2.12.



Obrázek 2.12: Principiální uspořádání triaxiální metody (převzato s úpravami z [15]).

Pokud je vnější obvod na obou stranách přizpůsobený bude přenosová funkce popsána vztahem pro vazební přenosovou funkci (2.31), přičemž bude součtová funkce ve tvaru (2.9), respektive (2.8). Rovnice (2.33) a (2.34) pak udávají výpočet:

$$T_n = \frac{U_{2,n}}{U_{1,n}} = \frac{Z_T + Z_F}{\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}} \cdot \frac{c_0}{j\omega \cdot (\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}})} \cdot \left[1 - e^{-2\pi \cdot (\epsilon_{r1} + \sqrt{\epsilon_{r2}}) \cdot \frac{L_C}{\lambda_0}} \right] \quad (-) \quad (2.33)$$

pro blízký a

$$T_f = \frac{U_{2,f}}{U_{1,n}} = \frac{Z_T - Z_F}{\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}} \cdot \frac{c_0}{j\omega \cdot (\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}})} \cdot \left[1 - e^{-2\pi \cdot (\varepsilon_{r1} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}) \cdot \frac{L_C}{\lambda_0}} \right] \cdot e^{-j2\pi \cdot \frac{L_C}{\lambda_2}} \quad (-) \quad (2.34)$$

pro vzdálený konec, kde λ_0 (m) je vlnová délka ve volném prostoru a λ_2 (m) je vlnová délka ve vnějším prostoru.

V případě zkratu na blízkém konci dochází k superpozici vln energie navázané do vnějšího obvodu tvořeného trubici na vzdáleném konci, kde je možno změřit celkové rušivé napětí U_2 . Tuto superpozici lze vyjádřit jako součet vln (2.34) a (2.33) rovnicí (2.35) [16]:

$$T = \frac{U_2}{U_{1,n}} = \left| \frac{Z_T + Z_F}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \cdot [1 - e^{-j\varphi_1}] + \frac{Z_T - Z_F}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \cdot [1 - e^{-j\varphi_2}] \right| \cdot \left| \frac{1}{\omega \cdot Z_1} \right| \cdot \left| \frac{c_0}{2 + \left(\frac{Z_2}{Z_{2,f}} - 1 \right) \cdot [1 - e^{-j\varphi_3}]} \right| \quad (-), \quad (2.35)$$

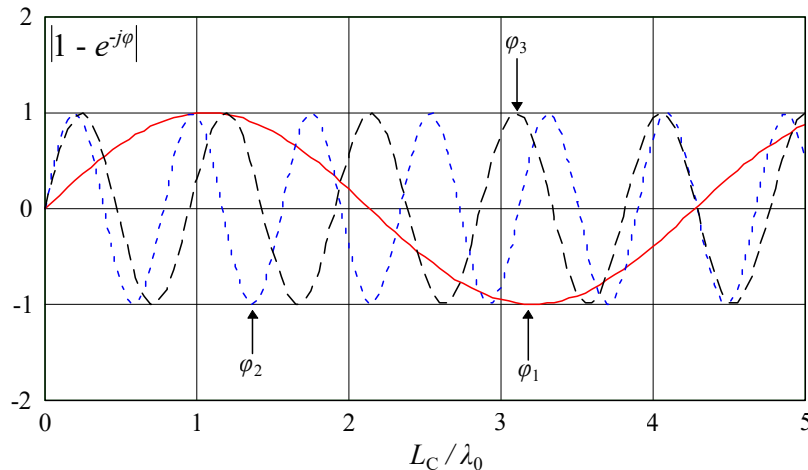
s exponenty vyjádřenými jako:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 2\pi \cdot (\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}) \cdot \frac{L_C}{\lambda_0}, \\ \varphi_2 &= 2\pi \cdot (\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}) \cdot \frac{L_C}{\lambda_0}, \\ \varphi_3 &= \varphi_2 - \varphi_1 = 4\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r2}} \cdot \frac{L_C}{\lambda_0}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

K další analýze (2.35) je zavedena tzv. funkcionální rovnice (2.37), která je graficky znázorněna na obrázku 2.13. Ukazuje, že poměr napětí vyjadřující superpozici vln (2.35) obsahuje tři periodické částečné funkce poměru mechanické délky L_C a elektrické vlnové délky λ_0

$$|1 - e^{-j\varphi}| = \left| 2 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right|, \quad (2.37)$$

kde $\varphi = \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$.



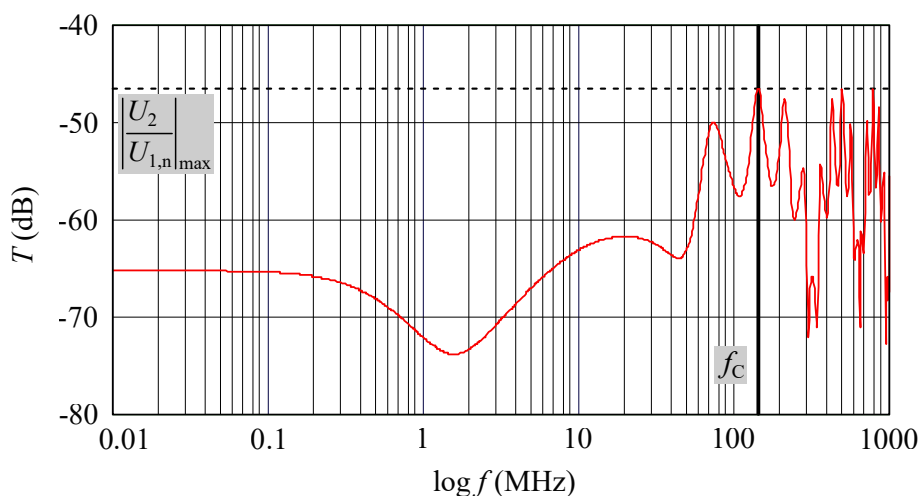
Obrázek 2.13: Grafické znázornění periodických částečných funkcí (převzato s úpravami z [16]).

Pro nízké kmitočty při $L_C \ll \lambda_0$ (a tedy také při $\sin\varphi \approx \varphi$) přechází rovnice (2.35) na jednoduchou vazební rovnici (2.32), kde je vlivem zkratu na blízkém konci $Z_F = 0$. Teoretické průběhy přenosových funkcí pro $L_C > \lambda_0$ jsou potom na obrázcích 2.14 a 2.15.

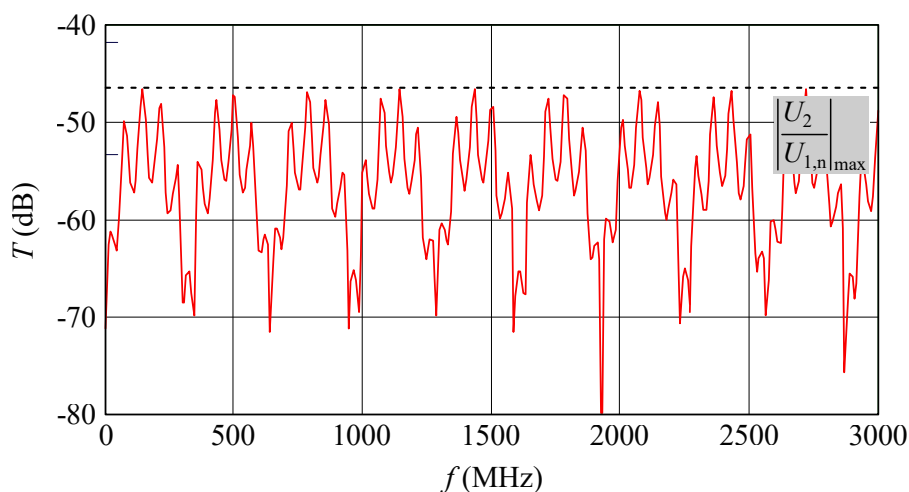
Z funkcionální rovnice, potažmo z jejích grafického znázornění vyplývá, že přenosová funkce (2.35) nabývá maximální hodnoty poprvé při poměru $\frac{L_C}{\lambda_0} = 1$, tedy při přechodu mezi elektricky dlouhou a krátkou vazební délkou, přičemž se maxima periodicky opakují. Amplitudu těchto opakujících se maxim vyjadřuje rovnice (2.38) [16]:

$$\left| \frac{U_2}{U_{1,n}} \right|_{\max} \approx \frac{c_0}{\omega \cdot Z_1} \cdot \left| \frac{Z_T + Z_F}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} + \frac{Z_T - Z_F}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \right| \quad (-). \quad (2.38)$$

Opakující se maxima jsou potom graficky znázorněna na obrázcích 2.14 a 2.15.



Obrázek 2.14: Teoretický průběh přenosové funkce triaxiální metody s vyznačenou hodnotou periodických maxim (převzato s úpravami z [16]).



Obrázek 2.15: Teoretický průběh přenosové funkce triaxiální metody v lineárním měřítku vodorovné osy s vyznačenou hodnotou periodických maxim (převzato s úpravami z [16]).

Prvního a dalších periodicky se opakujících maxim se dosáhne při vlnových délkách odpoví-

dajících nerovnici (2.39):

$$\frac{\lambda_0}{L_C} \leq 2 \cdot |\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}| \quad (-) \quad (2.39)$$

nebo kmitočtech odpovídajících nerovnici (2.40):

$$f_C > \frac{c_0}{2 \cdot L_C \cdot |\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}|} \quad (\text{Hz}). \quad (2.40)$$

2.4.3 Stínění kabelových sestav

Kabelová sestava je tvořena samotným kabelem a konektory na obou koncích. Kromě vazby samotného kabelu a konektorů je třeba vzít v úvahu i vazbu přechodu mezi kabelem a konektorem. Montáž správného konektoru a kabelu tedy nemusí vždy znamenat, že se efektivita stínění celé sestavy nezmění, neboť může být stále ovlivněna spojením mezi kabelem a konektorem, což by potom vedlo ke snížení efektivity stínění celé sestavy.

Protože má kabelová sestava více částí, je nutno provést integraci po úsecích vzorku a zohlednit tak jednotlivé vazby každé části, tzn. konektor A, přechod, kabel, přechod, konektor B. V příslušné normě následující vyjádření předpokládá stejnou fázovou rychlost ve všech částech sestavy. Opět platí, že vnitřní a vnější obvod je impedančně přizpůsoben. Součet vazeb jednotlivých sekcí lze vyjádřit dán rovnicemi (2.41) a (2.42) [5]:

pro blízký

$$T_n = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{Z_{F,i} + Z_{T,i}}{2 \cdot \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}} \cdot e^{-(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot \sum_{k=1}^{i-1} L_k} \cdot (1 - e^{-(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot L_i}) \right] \quad (-), \quad (2.41)$$

a vzdálený konec

$$T_f = \frac{e^{-\gamma_2 \cdot L_C}}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{Z_{F,i} + Z_{T,i}}{2 \cdot \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}} \cdot e^{-(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot \sum_{k=1}^{i-1} L_k} \cdot (1 - e^{-(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot L_i}) \right] \quad (-). \quad (2.42)$$

kde $T_{n,f}(-)$ je vazební přenosová funkce na blízkém a vzdáleném konci, $\gamma_{1,2}(-)$ je komplexní konstanta šíření vln vnitřního nebo vnějšího obvodu, L_C (m) je vazební délka (tj. součet dílčích délek sestavy), L_i (m) je délka konkrétního úseku v sestavě, $n(-)$ je počet úseků (u kabelových sestav $n = 3$), Z_1 (Ω) je charakteristická impedance vnitřního obvodu, Z_2 (Ω) je charakteristická impedance vnějšího obvodu, Z_F (Ω) je kapacitní vazební impedance a Z_T (Ω) je povrchová přenosová impedance.

3 Měření účinnosti stínění kabelů

Obecně jsou metody k měření efektivnosti stínění a k nim náležící postupy standardizované. Konkrétní řešení a konstrukce testovacího zařízení je však doménou jednotlivých výrobců, proto existuje nepřehledné množství měřících souprav, konceptů a návodů, které určitý standard interpretují.

Tabulka 3.1: Seznam doporučených norem pro zkušební metody metalických komunikačních kabelů. Tučně označená čísla norem byly v této práci použity jako reference k teoretickému základu či samotnému provedení zkušebních metod.

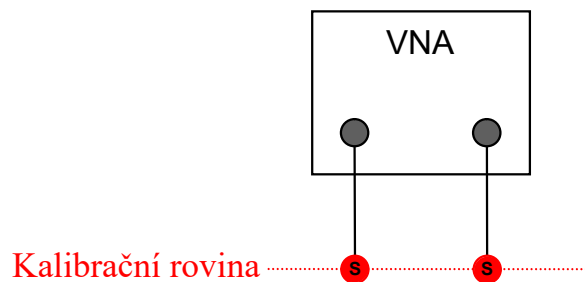
Označení	Triaxiální metoda
IEC TS 62153-4-1	Uvedení do měření elektromagnetických stínění
IEC 62153-4-3	Povrchová přenosová impedance - Triaxiální metoda
IEC 62153-4-4	Zkušební metody pro měření útlumu stínění do a nad 3 GHz - Triaxiální metoda
IEC 62153-4-7	Zkušební metoda pro měření přenosové impedance Z_T a útlumu stínění a_S nebo vazebního útlumu a_C konektorů a sestav - Triaxiální metoda koncentrických trubek
IEC 62153-4-8	Zkušební metoda pro měření kapacitní vazební admitance Y_C
IEC 62153-4-9	Vazební útlum a_C stíněných symetrických kabelů - Triaxiální metoda
IEC 62153-4-10	Povrchová přenosová impedance Z_T a útlum stínění a_S průchodek a těsnění - Dvojitá koaxiální metoda
IEC 62153-4-15	Zkušební metoda pro měření povrchové přenosové impedance Z_T a útlumu stínění a_S triaxiální buňkou
IEC 62153-4-16	Prodloužení frekvenčního pásma k horním kmitočtům pro povrchovou přenosovou impedanci Z_T a k dolním kmitočtům pro útlum stínění a_S - Triaxiální metoda
Označení	Ostatní metody
ČSN EN 50289-1-1	Elektrické zkušební metody - Všeobecné požadavky
ČSN EN 50289-1-6	Elektrické zkušební metody - Elektromagnetické vlastnosti

Samotným měřením potom určujeme příslušné parametry, které kvantifikují účinnost stínění. Příslušné normy, které jsou pak v měřící laboratoři dostupné jako fyzický svazek přímo od Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví nebo jako součást interní směrnice firmy či instituce.

3.1 Kalibrace zkušebních uspořádání

Kalibrační rovina se ve výchozím stavu přístroje nachází na jeho terminálech, kde je garantována výrobcem. Protože je při měření ale zapotřebí přívodních kabelů ke zkoušenému zařízení či generátoru/přijímači, je nutné provést kalibraci zařízení a vyloučit tak vliv parazitních kapacit a indukčností přívodního vedení, neboť způsobují útlum a fázový posuv průchozímu

signálu. Kalibrační rovina se tak po kalibračním procesu přesune na přípojovací konektory přívodních kabelů.



Obrázek 3.1: Kalibrační rovina ležící na konektorech přívodních kabelů SMA, označených jako S.

3.1.1 Kalibrační nástroje

Kalibraci lze provádět pomocí tzv. kalibračních standardů, pomocí kterých se vyhodnocuje chování přenosové cesty vystavené různým zatěžovacím podmínkám. Mezi nejvíce používané standardy patří:

- **THRU**, tj. standard přenosu pro dvojbrannou kalibraci,
- **OPEN**, tj. standard se zakončením naprázdno,
- **SHORT**, tj. standard zakončený zkratem a
- **MATCH** nebo také **LOAD**, tj. standard zakončený charakteristickou impedancí.

Počet a konkrétní typ kalibračního standardu volí dle normativních doporučení, tudíž dle metody, která bude ke kalibraci použita. Každý reálný kalibrační standard není z elektrického hlediska ideální a má tedy svůj model, který zohledňuje parazitní kapacity, indukčnosti, odporu a/nebo zpoždění signálu při průchodu, je tedy plně charakterizován svým modelem s příslušnými parametry či koeficienty [17].



Obrázek 3.2: Manuální kalibrační sada z řady ZN-Z1xx (vlevo) a automatická kalibrační sada z řady ZN-Z5x od firmy Rohde & Schwarz. K dispozici je také široká škála variant, které kombinují různé přípojovací konektory a počet bran (převzato z [18]).

Kalibrace může být provedena pomocí manuálních či automatických kalibračních sad.

U manuálních kalibračních sad je nutno standardy jednotlivě v průběhu kalibračního procesu přepojovat dle pokynů na přístroji. Mají zpravidla méně kalibračních standardů, jsou ale cenově dosažitelnější. Automatické kalibrační sady jsou k VNA přímo připojeny datovým kabelem a přepínání standardů tak probíhá autonomně.

3.1.2 Normativní doporučení

Dle oficiálních norem IEC pro měření účinnosti stínění v tabulce 3.1 lze kalibraci zkušebních metod provést tzv. normalizací přenosu, čímž je vyloučen frekvenčně závislý útlum a fázový posun měřící cesty. Jedná se o nejjednodušší kalibrační metodu, protože využívá pouze jeden kalibrační standard **THRU** pro dvojbranné měření. Útlum změřený touto cestou je také označován jako provozní útlum a při vyhodnocování výsledků zkoušek se musí brát v úvahu. Měří se pokud možno v kmitočtovém rozsahu, ve kterém budou provozována zkušební metoda. Provozní útlum a_{cal} je pak vyjádřen vztahem (3.1) [7]:

$$a_{\text{cal}} = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{U_{\text{gen,cal}}}{U_{\text{rec,cal}}} \right| \quad (\text{dB}), \quad (3.1)$$

kde $U_{\text{gen,cal}}$ (V) je výstupní napětí generátoru během kalibračního postupu a $U_{\text{rec,cal}}$ (V) je vstupní napětí na přijímači během kalibračního postupu.

Názvy napětí generátoru a napětí přijímače jsou voleny záměrně, jelikož je dle norem IEC dovoleno ve zkušebních metodách měření účinnosti stínění používat generátor a přijímač jako samostatná zařízení. Pokud je k dispozici síťový analyzátor s příslušnou kalibrační sadou, je doporučeno provádět celkovou dvojbrannou kalibraci a pro měření používat tento přístroj [5]. Pokud je kalibrační hodnota provozního útlumu a_{cal} pouze změřena bez aplikování korekce na výstupní brány zařízení, musí se ve výpočtech zohlednit.

3.1.3 Koncernové specifikace

Ačkoli je kalibrační proces měřicího zařízení popsán v oficiálních normách IEC, koncernové normy doporučenou metodiku konkretizují. Koncernovými normami se zpravidla řídí i laboratoře hlavních dodavatelů kabelů jakožto externích firem, které normativní nařízení zákazníka implementují do svých směrnic nebo je zcela přeberou a zajišťují tak požadované parametry produktu.

Příkladem koncernové normy je dokument **LAH.V03.825** od firmy Volkswagen, který specifikuje celkové požadavky na dodávané kabely. Kromě výroby, označení a kontroly je samozřejmě standardizováno i měření účinnosti stínění, tedy i postup kalibrace zkušebních uspořádání. Norma přímo vyžaduje, aby byla všechna vysokofrekvenční měření prováděna pouze s vektorovým analyzátozem na kterém byla provedena plná dvojbranná kalibrace. Vyžaduje také mimo jiné nastavení impedance terminálů na standardních 50 Ω . Tuto hodnotu charakteris-

tické impedance musí mít i případné adaptéry nebo prodlužovací kabely [19].

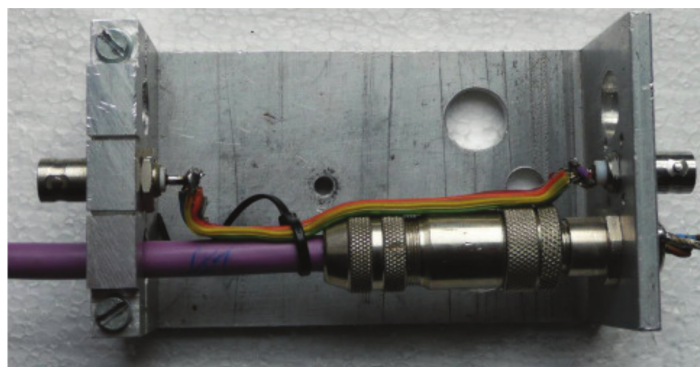
3.1.4 Dvojbranné kalibrace

Mezi nejpoužívanější metody plné dvojbranné kalibrace VNA patří **TOSM** (také označováno jako **SOLT**) a **UOSM** (nebo také **SOLR**). Metoda TOSM spočívá v kalibraci každé brány pomocí kalibračních standardů OPEN, SHORT, MATCH (LOAD) a následného spojení obou bran pomocí standardu THROUGH. Všechny použité standardy přitom musí být elektricky definovány pomocí svého modelu, příslušných koeficientů a rozptylových S parametrů. Elektrickou definici je přitom potřeba znát i pro případné adaptéry na přívodních kabelech z VNA, což většinou není splněno [20].

Problém chybějící elektrické definice adaptérů řeší upravená metoda UOSM (tzv. unknown-through), kde elektrické parametry THROUGH standardu nemusí být známy. Jedinou podmínkou je reciprocita standardu, což je většinou vždy splněno. Podmínka reciprocity je zřejmá z jiného názvu kalibrační metody SOLR, kde za písmenem R stojí standard RECIPROCIAL, tedy nedefinovaný THROUGH. Je méně přesná než metoda TOSM, ale je velmi univerzální a přesnost je většinou dostačující [21]. Metodu UOSM je také výhodné použít pro dvojbranný kalibrační standard THROUGH, jehož parametry časem degradovaly a nemusí již odpovídat své původní elektrické definici.

3.2 Metoda injekce do vedení

Metoda injekce do vedení se používá pro měření povrchové přenosové impedance Z_T tzn. ve frekvenčních oblastech elektricky krátkých vazebních délek. Mimo nesymetrických kabelů je metoda vhodná i pro měření přenosové impedance konektorů. Obecně lze měření provádět až do 1 GHz [22]. Oproti ostatním metodám je konstrukčně velmi jednoduchá, což ale do jisté míry může ovlivnit reprodukovatelnost výsledků měření.



Obrázek 3.3: Zkušební vzorek metody injekce do vedení pro měření konektoru. Injekční vodič (žloutočervený) se chová jako zdroj rušení (převzato z [22]).

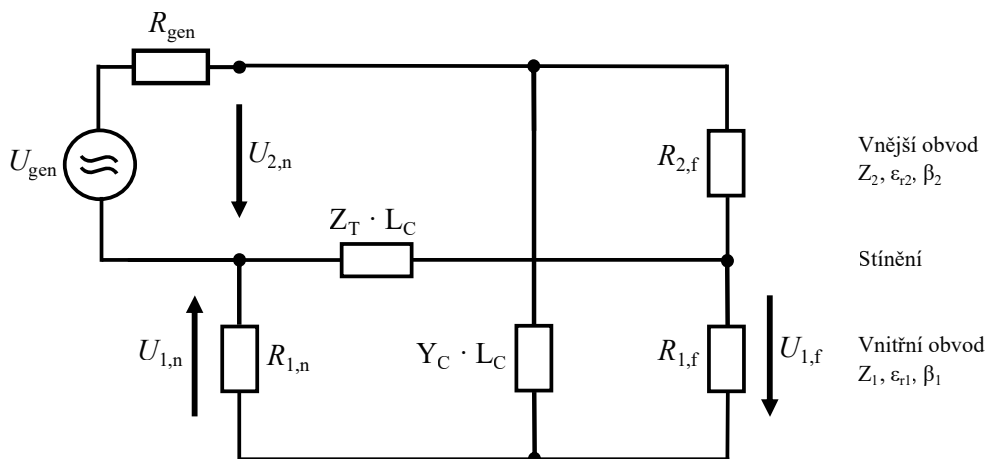
Příslušný normativní dokument má označení ČSN EN 50289, viz. tabulka 3.1. Metoda injekce do vedení pro měření přenosové impedance je popsána v části 1-6: Elektrické zkušební metody

- Elektromagnetické vlastnosti v kapitole 7.

3.2.1 Náhradní schéma zapojení

Vnější obvod zkušebního uspořádání se skládá z injekčního vedení a stínění zkoušeného kabelu. Do injekčního vedení je přivedeno napájení a chová se jako rušivý prvek. Vnitřní obvod potom tvoří zkoušený kabel a jeho stínění, na kterém se měří indukované napětí.

Impedance na konci vnějšího vedení $R_{2,f}$ značí zatěžovací odpor při měření na blízkém konci, R_{gen} potom vnitřní odpor generátoru. Při měření na vzdáleném konci se pozice těchto prvků prohodí. Blízký konec vnitřního obvodu se potom skládá ze stacionárního přijímače s vnitřním odporem $R_{1,n}$ a zakončovacím odporem $R_{1,f}$ na konci vnitřního vedení. Prvky $Z_T \cdot L_C$ a $Y_C \cdot L_C$ vyjadřují vazbu přes stínění mezi vedeními, tedy efekt přenosové impedance a kapacitní vazební admittance.



Obrázek 3.4: Náhradní schéma metody injekce do vedení. Je zřejmý efekt kapacitní vazební admittance Y_C .

Frekvenční chování a matematický popis odpovídá vazební přenosové funkci pro přizpůsobená paralelní vedení (2.31). To znamená, že celé vedení musí být impedančně přizpůsobené, tj. zkoušený kabel musí mít stejnou charakteristickou impedanci, jako injekční vodič i zakončovací rezistor. Je nutné podotknout, že ve výsledcích měření u této metody nelze oddělit elektrickou a magnetickou složku rušení. Na zkoušený kabel tedy celkově působí efektivní přenosová impedance Z_{TE} , viz. kapitola 2.2.3. U většiny kabelů lze sice postupnou kapacitu C_T zanedbat, u jednoduchých opletení však nikoli, proto je nutné brát tento jev před měřením v úvahu.

3.2.2 Kmitočtový rozsah a vazební délka

Délka zkoušeného kabelu musí umožnit vazební délku nutnou pro stanovený kmitočtový rozsah a připojení ke zkušebnímu přístroji. Od vazební délky se odvíjí nejvyšší měřený kmitočet, minimální vazební délka přitom musí být 0,3 m [7].

Jelikož je uspořádání impedančně přizpůsobené, odpovídá vazební funkci (2.31). Nejvyšší měřený kmitočet při použité vazební délce L_C lze tedy určit pomocí upravené podmínky pro elektricky krátké kabely (2.14) rovnicí (3.2):

$$f_{\text{max},n} \leq \frac{c_0}{\pi \cdot L_C \cdot |\sqrt{\varepsilon_{r1}} \pm \sqrt{\varepsilon_{r2}}|} \text{ (Hz)}, \quad (3.2)$$

kde $f_{\text{max}(n,f)}$ (Hz) je nejvyšší použitelný kmitočet pro blízký a vzdálený konec, ε_{r1} (–) je relativní permitivita dielektrika injekčního obvodu, ε_{r2} (–) je relativní permitivita dielektrika kabelu, \pm se vztahuje k měření na blízkém a vzdáleném konci, c_0 ($3 \cdot 10^8$ m/s) je rychlost světla a L_C (m) je vazební délka.

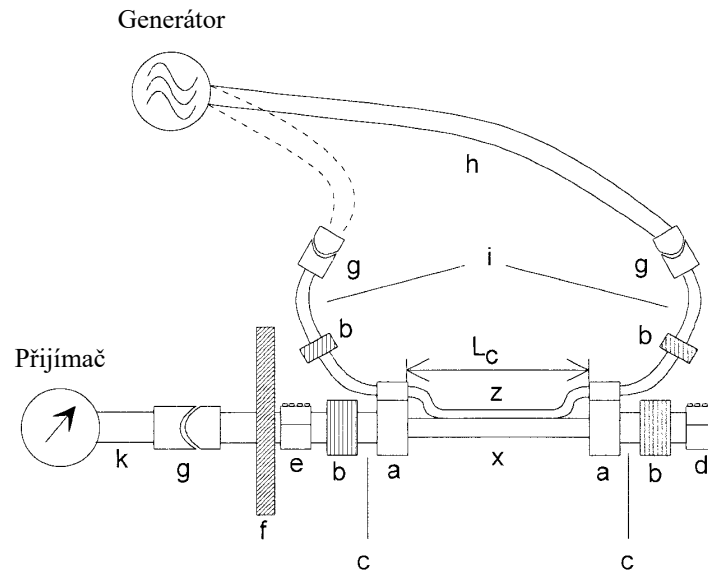
3.2.3 Zkušební uspořádání

Měření lze provést pomocí síťového analyzátoru nebo alternativně pomocí generátoru diskretního signálu a selektivního měřicího přijímače.

Měřicí zařízení je znázorněno na obrázku 3.5 a je tvořeno:

- a) síťovým analyzátozem nebo alternativně
 - generátorem signálu se stejnou charakteristickou impedancí jako kvazikoaxiální systém zkoušeného kabelu nebo s členem pro impedanční přizpůsobení a v případě potřeby doplněným výkonovým zesilovačem pro velmi nízkou přenosovou impedanci,
 - přijímačem s kalibrovaným stupňovým útlumovým článkem a v případě potřeby doplněným nízkošumovým zesilovačem pro velmi nízkou přenosovou impedanci,
- b) uspořádáním pro injekci do vedení podle IEC 61196-1,
- c) a v případě potřeby obvodem pro impedanční přizpůsobení [7].

Injekční obvod může být konstruován z jednoho či více paralelních vodičů, například jako zvlněný měděný pásek nebo ploché měděné opletení. Injekční vodič pak musí být ke zkušebnímu vzorku těsně upevněn po celé jeho vazební délce, například lepící páskou. Na konektory přírodních kabelů se potom připojí generátor a zakončovací rezistor dle měření na příslušném konci.



Obrázek 3.5: Metoda injekce do vedení s naznačeným postupem měření na obou koncích (převzato s úpravami z [7]).

Na obrázku 3.5 jsou jednotlivé části označeny: **a** jako místo pro vodivé spojení stínění zkoušeného kabelu a injekčního vodiče, **b** jako ferit, **c** jako mosazná/měděná trubka pro dostatečné stínění, **d** jako stínící skříňka pro přizpůsobovací rezistor zkoušeného kabelu, **e** jako stínící skříňka pro připojení zkoušeného kabelu k přijímači, **f** jako stíněná stěna místnosti se stíněnou koaxiální průchodkou, **g** jako konektory (SMA, N, atd.), **h** jako napájecí kabel z generátoru, **i** jako napájecí kabely pro injekční vodič, **k** jako připojovací kabel k přijímači, **x** jako zkoušený kabel, **z** jako injekční vedení a L_C jako vazební délka.

Při kalibraci metodou provozního útlumu se měření provádí nejen pro přívodní kabely, ale i samotný injekční obvod. Kalibraci je tedy nutné provést spojením přívodního kabelu generátoru a injekčního vodiče spolu s přívodním kabelem přijímače na opačném konci [7]. Detaily kalibračního postupu jsou k nalezení v kapitole 3.1.

3.2.4 Postup měření

Protože na kabel působí současně povrchová přenosová impedance Z_T a kapacitní vazební impedance Z_F , je nutné provádět měření na blízkém i vzdáleném konci, tzn. zaměnit generátor signálu a zakončovací rezistor. Výsledky měření potom vedou k hodnotě ekvivalentní přenosové impedance Z_{TE} .

Útlum je měřen v celém kmitočtovém rozsahu ve stejných bodech jako u kalibračního postupu. Vzhledem k tomu, že injekční vodič neobepíná zkoušený kabel, musí se kromě měření na blízkém a vzdáleném konci provést nejméně čtyři další měření s odstupem 90° po obvodu zkoušeného kabelu. Tímto postupem se vezme v potaz případná nehomogenita stínění [7].

Výsledek zkoušky je potom maximální hodnota ekvivalentní přenosové impedance Z_{TE} získaná z nejméně čtyř měření po obvodu kabelu na blízkém a vzdáleném konci dle (3.6) jako:

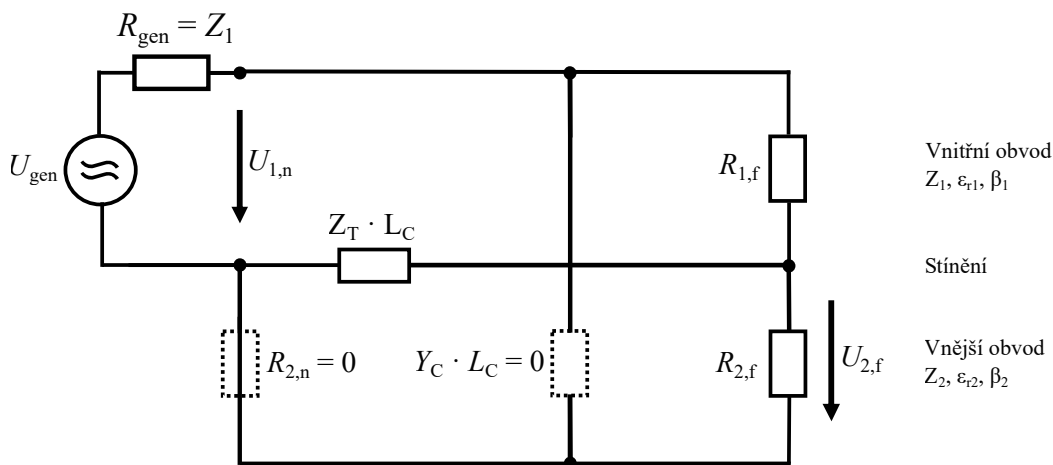
$$Z_{TE} = \max(Z_{TE,n}; Z_{TE,f}). \quad (3.6)$$

3.3 Triaxiální metoda

Pomocí triaxiální metody lze měřit přenosovou impedanci Z_T , útlum stínění a_S a vazební útlum a_C . Frekvenční rozsah metody závisí především na konkrétním uspořádání pro jednotlivé parametry. Protože je zkušební vodič umístěn v měřicí trubici, rušivé vlivy okolí jsou výrazně potlačeny. Metoda a všechny její varianty jsou popsány v normativních dokumentech zkušebních metod pro metalické komunikační kabely s označením IEC 62153-4-x a potom také v ČSN EN 50289-1-6, kde je v kapitolách 6 a 8 popsáno měření přenosové impedance a útlumu stínění, viz. tabulka 3.1.

3.3.1 Náhradní schéma zapojení

Vnitřním obvodem zkušebního uspořádání je zkoušený kabel (vnitřní vodič a stínění), který je napájen. Vnější obvod pak tvoří stínění zkoušeného kabelu spolu s triaxiální trubicí. Impedance na konci vnitřního vedení $R_{1,f}$ značí zatěžovací rezistor zkoušeného kabelu a R_{gen} potom vnitřní odpor generátoru. Blízký konec vnějšího obvodu je zkratován, tedy $R_{2,n} = 0$. Na vzdáleném konci je potom naznačen vnitřní odpor přijímače $R_{2,f}$. Prvek $Z_T \cdot L_C$ vyjadřují vazbu přes stínění mezi vedeními tedy efekt přenosové impedance. Jelikož je na blízkém konci vnějšího obvodu zkrat, efekt kapacitní vazební impedance $Y_C \cdot L_C$ je vyloučen, viz. kapitola 2.2.2.



Obrázek 3.7: Náhradní schéma triaxiální metody.

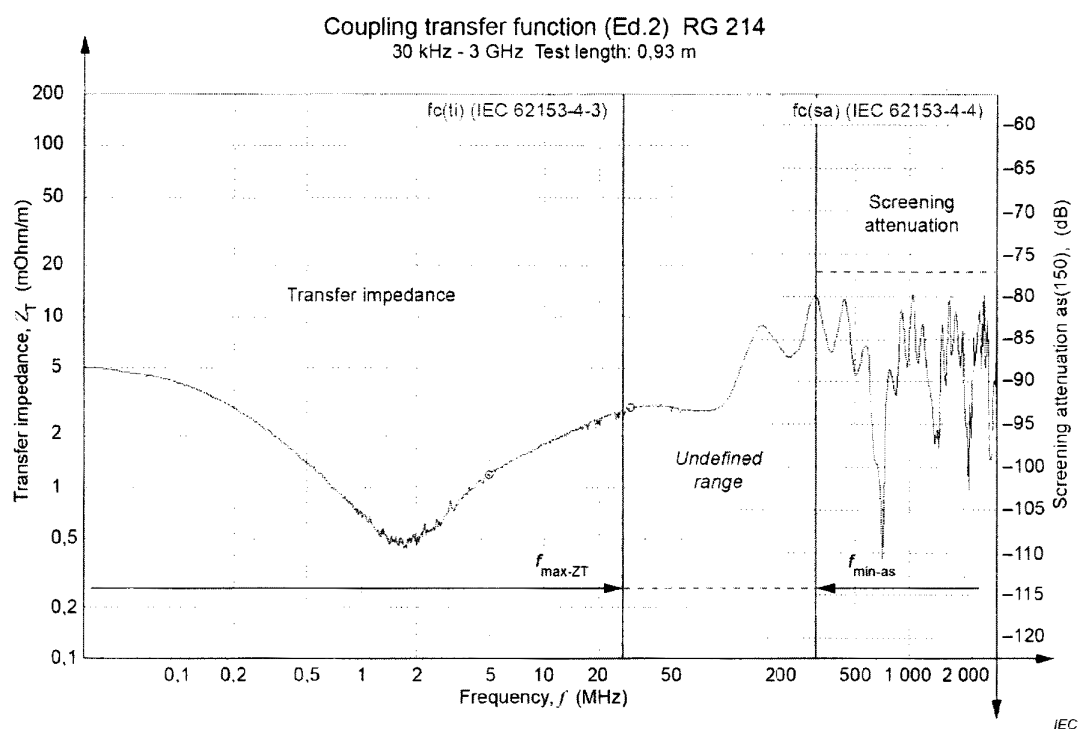
Účinky zkratu jsou popsány v kapitole 2.4.2. Praktickým důsledkem je fakt, že se měření provádí pouze na vzdáleném konci. Celá procedura je tedy rychlejší a vyjádření výsledků zkoušky je zjednodušené, protože se nemusí vyhodnocovat měření na obou koncích. Pokud má

zkoušený kabel řídké opletení, kdy nelze zanedbat efekt podélné vazební kapacity C_T , je nutno společně s měřením přenosové impedance zohlednit i měření kapacitní vazební admitance dle IEC 62153-4-8, viz. tabulka 3.1.

3.3.2 Kmitočtový rozsah a vazební délka

Triaxiální metoda umožňuje měření povrchové přenosové impedance Z_T a útlumu stínění a_S v jednom zkušební zapojení, kde změřená přenosová funkce bude obsahovat průběh obou kvantit pro vyhodnocení účinnosti stínění. Je ale důležité zmínit, že ve výsledku není možné k vyhodnocení použít celý kmitočtový rozsah a je nutné brát v úvahu část přechodového pásma, tzv. šedé zóny, kdy vazební délka L_C přechází z elektricky krátké na elektricky dlouhou.

Nedefinovaná zóna je naznačena na obrázku 3.8, kde průběh přenosové funkce nelze v pásmu 30 MHz až 300 MHz vyhodnocovat. Měření je samozřejmě možné provádět i separátně. V tomto případě bude možné zvolit vazební délku zkušebního zařízení (tedy délku trubice) dle požadovaného parametru a zachytit tak přenosovou funkci ve větším rozsahu kmitočtů než při společném měření pro elektricky krátké a dlouhé délky.



Obrázek 3.8: Vazební přenosová funkce změřená triaxiální zkušební metodou (převzato z [15]).

Nedefinovaný průběh v šedé zóně lze extrapolovat pomocí doporučení v normě IEC 62153, části 4-16, která matematicky popisuje chování triaxiálního uspořádání a odvozuje vztahy pro prodloužení frekvenčního pásma přenosové impedance k vyšším kmitočtům a prodloužením k nižším kmitočtům při extrapolaci výsledků útlumu stínění.

Horní kmitočtová mez $f_{\max-ZT}$ určuje konec kmitočtového pásma pro měření přenosové impedance v elektricky krátkých vazebních délkách. Vychází z podmínky pro elektricky krátké vazební délky v triaxiálním uspořádání, kde je fázová konstanta vnitřního obvodu (tedy kabelu) β_1 vynásobená vazební délkou L_C menší než jedna. To lze vyjádřit pomocí rovnice (3.7) [7] jako:

$$\beta_1 \cdot L_C = \frac{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r1}}}{c_0} \cdot f_{\max-ZT} \cdot L_C \leq 1, \quad (3.7)$$

úpravou je potom získána rovnice (3.8):

$$f_{\max-ZT} \leq \frac{c_0}{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r1}} \cdot L_C} \text{ (Hz)}. \quad (3.8)$$

Dosazením konstant do (3.8) má konečná rovnice tvar (3.9):

$$f_{\max-ZT} \leq \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r1}} \cdot L_C} \approx \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} \cdot L_C} \text{ (Hz)}, \quad (3.9)$$

kde $f_{\max-ZT}$ (Hz) je mezní kmitočet pro elektricky krátké kabely v triaxiálním uspořádání.

Při samostatném měření přenosové impedance je vhodné použít co nejmenší možnou délku trubice pro posunutí kmitočtové meze pro krátké kabely směrem nahoru a zvýšit tak frekvenční rozmezí pro měření. Minimální vazební délku, kterou lze použít je 0,3 m. Délka zkušební vzorku přitom nesmí být o více než 50 % delší než vazební délka. Rovnici (3.9) [7] je pak možné upravit na rovnici (3.10):

$$f_{\max} \leq \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r1}} \cdot 0,3} = \frac{167 \cdot 10^6}{\sqrt{\varepsilon_{r1}}} \text{ (Hz)} \quad (3.10)$$

a mezní kmitočet určit dosazením konkrétní hodnoty ε_1 podle materiálu izolace měřeného kabelu. Obecně je pro měření přenosové impedance trubice o délce 1 m vhodná pro kmitočty do 30 MHz a trubka o délce 0,3 m je vhodná do 100 MHz [7].

Mezní kmitočet $f_{\min-as}$ odděluje šedou zónu frekvenčního pásma elektricky dlouhých kabelů, ve kterém je útlum stínění a_S vykazujícím parametrem efektivity stínění. Výpočet mezního kmitočtu elektricky dlouhého kabelu v triaxiálním uspořádání je popsán v kapitole 2.4.2 a dán rovnicí (2.40). Při měření útlumu stínění se často používají vazební délky 2 a 3 m pro stanovení útlumu stínění od 50 MHz výše.

Triaxiální uspořádání lze teoreticky používat pouze do určitého kmitočtu f_g , který je daný rovnicí (3.11) [23]:

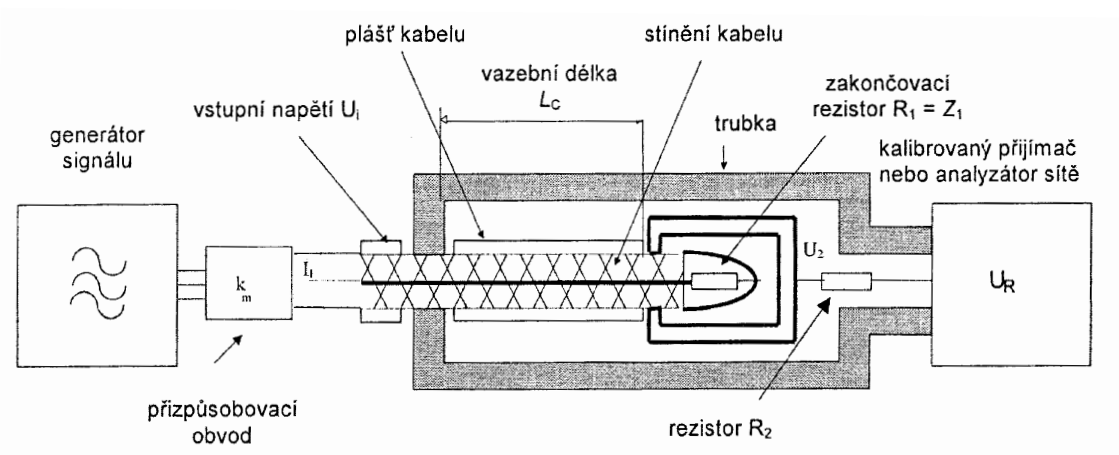
$$f_g = \frac{2 \cdot c_0}{\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r2}} \cdot (D_2 + d_1)} \text{ (Hz)}, \quad (3.11)$$

kde ε_{r2} (–) je relativní permitivita vnějšího systému, d_1 (m) je vnější průměr stínění kabelu a D_2 (m) je vnitřní průměr měřící trubice.

3.3.3 Zkušební uspořádání

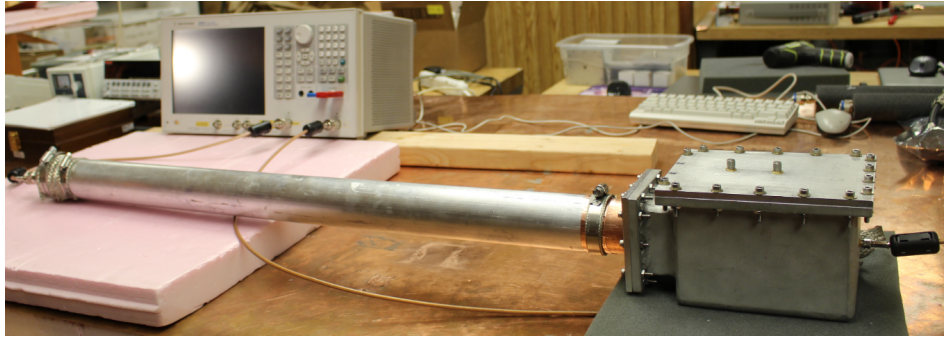
Měřicí zařízení je znázorněno na obrázku 3.9 a je tvořeno:

- a) síťovým analyzátozem nebo alternativně
 - generátorem signálu se stejnou charakteristickou impedancí jako kvazikoaxiální systém zkoušeného kabelu nebo s členem pro impedanční přizpůsobení a v případě potřeby doplněným výkonovým zesilovačem pro velmi nízkou přenosovou impedanci,
 - přijímačem s kalibrovaným stupňovým útlumovým článkem a v případě potřeby doplněným nízkošumovým zesilovačem pro velmi nízkou přenosovou impedanci,
- b) triaxiální trubkou se zakončeními na stínění kabelu a síťového analyzátoru nebo přijímači. Materiál trubky musí být dobře vodivý a neferomagnetický, kupříkladu z mosazi,
- c) a v případě potřeby obvodem pro impedanční přizpůsobení [5].



Obrázek 3.9: Zkušební uspořádání triaxiální metody pro měření přenosové impedance a útlumu stínění s přizpůsobovacím článkem a tlumícím rezistorem R_2 (převzato s úpravami z [24]).

Pokud je charakteristická impedance zkoušeného kabelu odlišná od výstupní impedance generátoru, je možné použít přizpůsobovací článek. Tlumící rezistor R_2 zapojený mezi trubicí a přijímačem potom slouží k zmenšení amplitudy napěťových špiček. Měření je nejméně ovlivněno v uspořádání, které nevyžaduje použití tlumícího rezistoru a přizpůsobovacího členu.



Obrázek 3.10: Zkušební uspořádání triaxiální metody (převzato z [25]).

Kalibrace měřícího uspořádání je provedena dle postupu v kapitole 3.1.

3.3.4 Postup měření

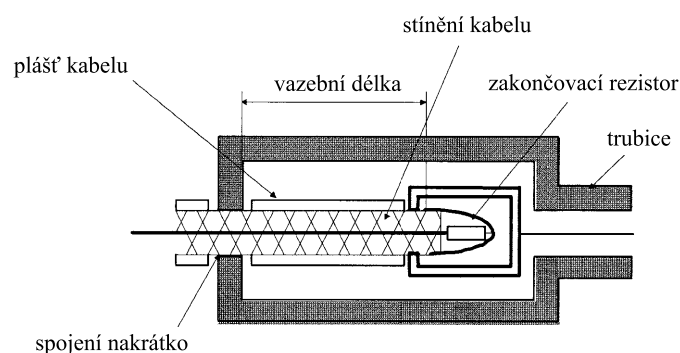
Zkušební vzorek se připojí ke generátoru a vnější obvod (trubice) k přijímači, viz. obrázek 3.9. Pokud se jmenovitá impedance zkoušeného kabelu liší od výstupního odporu generátoru, musí se zkoušený kabel připojit pomocí obvodu pro impedanční přizpůsobení. Stínění kabelu se k zkušební trubici připojí po celém jeho obvodu v místě kontaktu, viz. obrázky 3.9 a 3.11.

Měření parametrů stínění se měří při lineárním rozmítání kmitočtu v celém stanoveném kmitočtovém rozsahu a ve stejných kmitočtových bodech jako u kalibračního postupu. Změřené veličiny jsou vyjádřeny rovnicí (3.12):

$$a_{\text{meas}} = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{U_{\text{gen}}}{U_{\text{rec}}} \right| = -20 \cdot \log_{10} |S_{21}| \text{ (dB)}, \quad (3.12)$$

kde a_{meas} (–) je hodnota změřeného útlumu, U_{gen} (V) je napětí na generátoru a U_{rec} (V) je napětí na přijímači.

Vrcholové hodnoty se zaznamenávají jako funkce kmitočtu pro pozdější vytvoření a vyhodnocení obalové křivky. Dodatečný útlum vyvolaný jakýmkoli vloženým členem pro impedanční přizpůsobení se musí vzít v úvahu buď pomocí kalibrace nebo při vyhodnocení výsledků zkoušky [5].



Obrázek 3.11: Připojení zkušebního vzorku k triaxiální trubici (převzato s úpravami z [7]).

Měřicí uspořádání je shodné pro měření přenosové impedance a/nebo útlumu stínění, stejně tak jako kalibrace, která je provedena dle postupu v kapitole 3.1.

3.3.5 Vyhodnocení výsledků zkoušky

Nezávisle na tom, zda jsou parametry účinnosti stínění měřeny separátně či v jednom zkušebním uspořádání, musí být pro dílčí parametr vyhodnocena výsledná hodnota v příslušném kmitočtovém pásmu a se správnými jednotkami, viz. obrázek 3.8.

Povrchovou přenosovou impedanci Z_T lze dle zkušebního uspořádání na obrázku 3.9 naměřenou v kmitočtovém pásmu DC až $f_{\max-Z_T}$ s mezním kmitočtem určeným dle (3.8) lze vyjádřit rovnicí (3.13) [24] jako:

$$Z_T = \frac{R_1 \cdot (50 + R_2)}{50 \cdot L_C} \cdot 10^{-\left(\frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}} - k_m - 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{50}{Z_1}\right)}{20}\right)} \left(\frac{\Omega}{\text{m}}\right), \quad (3.13)$$

kde R_1 (Ω) je odpor zakončovacího rezistoru zkoušeného kabelu, R_2 (Ω) je odpor tlumícího rezistoru, a_{meas} (dB) je naměřený poměr napětí z (3.12), a_{cal} (dB) je provozní útlum změřený při kalibraci viz. 3.1, k_m (dB) je přenos přizpůsobovacího článku a Z_1 (Ω) je charakteristická impedance zkoušeného kabelu.

Při měření bez použití přizpůsobovacího členu i tlumícího rezistoru se rovnice (3.13) zjednoduší na vztah (3.14) [24]:

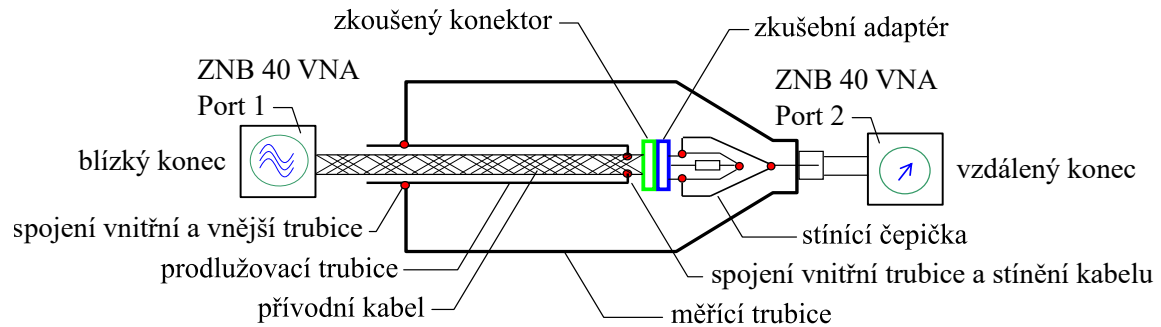
$$Z_T = \frac{R_1 + 50}{2 \cdot L_C} \cdot 10^{-\left(\frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20}\right)} \left(\frac{\Omega}{\text{m}}\right). \quad (3.14)$$

Útlum stínění a_S je měřen od kmitočtu $f_{\min-a_S}$ určeného vztahem (2.40) do teoretického maxima (3.11) nebo do kmitočtu který je konkretizován koncertnovou normou a jeho hodnotu lze určit vztahem (2.23) nebo (2.30). Od této hodnoty je nutné odečíst útlum k_m přizpůsobovacího členu, pokud byl použit.

3.3.6 Triaxiální metoda koncentrických trubek

Jedná se o rozšíření klasické triaxiální metody přidáním koncentrické trubky. Takzvaná metoda tube-in-tube (dosl. trubka v trubce) umožňuje měření povrchové přenosové impedance Z_T a útlumu stínění a_S konektorů či kabelových sestav [5], viz. kapitola 2.4.3.

Obecně jsou vysokofrekvenční konektory dlouhé 20 až 50 mm. Tato malá vazební délka způsobuje posun mezního kmitočtu pro elektricky krátké kabely do vysokých frekvenčních poloh typicky kolem 1 GHz a výše. Pod tímto kmitočtem by byla měřena povrchová přenosová impedance vzhledem ke krátké elektrické délce. Pokud ale bude požadováno měření útlumu stínění, jehož pásmo se pohybuje nad elektricky dlouhými délkami, v širokém frekvenčním rozmezí je nutné uměle posunout mezní kmitočet směrem k menším frekvencím a získat tak širší pásmo pro měření. Pro tento účel se právě používá koncentrická prodlužovací trubice.



Obrázek 3.12: Připojení zkušebního vzorku k triaxiální trubici (převzato s úpravami z [5]).

Na obrázku 3.12 je přívodní kabel zakončený konektorem vložen do prodlužovací trubice a spojen adaptérem, který vede k zakončovacímu rezistoru. Protože je prodlužovací trubice z kovu, energie vyzářená z přívodního kabelu nepronikne do vnější měřicí trubice. Do efektivní vazební délky je tedy zahrnut samotný konektor a adaptér. I přestože je vazební délka velmi malá, a mezní kmitočet krátkých kabelů by tím pádem měl být ve vyšší poloze, na postupnou vlnu z generátoru působí celá délka přívodního vodiče uloženého ve vnitřní trubce. Tímto je malá vazební délka konektoru a adaptéru elektricky prodloužena a mezní kmitočet pro krátké a dlouhé kabely se posune do směrem k nižším frekvencím. Lze tak měřit útlum stínění malých vazebních délek v širokém kmitočtovém spektru.

Kalibrace a postup měření (kromě vložení prodlužovací trubice) jsou shodné jako v kapitole 3.3.4 u klasické triaxiální metody. Stejně platí i pro vyhodnocování výsledků útlumu stínění. Hodnoty povrchové přenosové impedance při měření konektorů či kabelových sestav nejsou závislé na délce viz. 2.2.1, proto pro vztahy (3.13) a (3.14) platí $L_C = 1$.

3.4 Metoda absorpčních kleští

Metodou absorpčních kleští lze měřit útlum stínění a_S nesymetrických kabelů případně vazební útlum a_C kabelů symetrických. Frekvenční rozsah metody je dán použitými absorpčními kleštěmi [22]. Příslušný normativní dokument má označení ČSN EN 50289, viz. tabulka 3.1. Metoda absorpčních kleští pro měření vazebního útlumu je popsána v části 1-6: Elektrické zkušební metody - Elektromagnetické vlastnosti v kapitole 9.

3.4.1 Délka zkušebního vzorku

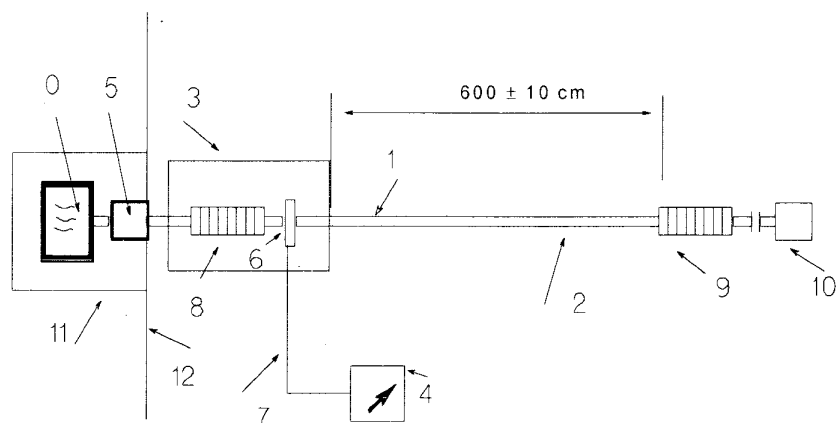
Účinná délka zkušebního vzorku je omezena absorpčními kleštěmi a feritovou trubkou, tak jako na obrázku 3.13 a odpovídá hodnotě $600 \text{ cm} \pm 10 \text{ cm}$. Koaxiální kabel musí být minimálně dlouhý jako součet účinné zkušební délky a plus délka kleští a absorberu a musí být zakončený svou charakteristickou impedancí. V případě měření symetrických vodičů musí být zkušební metoda zakončena alespoň 100 m svazkem kabelu se symetrickou zátěží [7] jako na obrázku 3.14.

3.4.2 Zkušební uspořádání

Zařízení musí být schopné měřit vazební útlum nebo útlum stínění v úplném kmitočtovém rozsahu od 30 MHz do 1 GHz nebo do vyššího kmitočtu stanoveného v příslušné specifikaci kabelu. Měřicí uspořádání může být realizováno pomocí síťového analyzátoru nebo alternativně pomocí generátoru diskretního signálu a selektivního přijímače. Přímo před generátor se musí umístit svislá kovová deska.

Zkušební uspořádání pro maximální vyzařovaný výkon na blízkém konci (pomocí diskretních přístrojů) je znázorněno na obrázku 3.13 a je tvořeno:

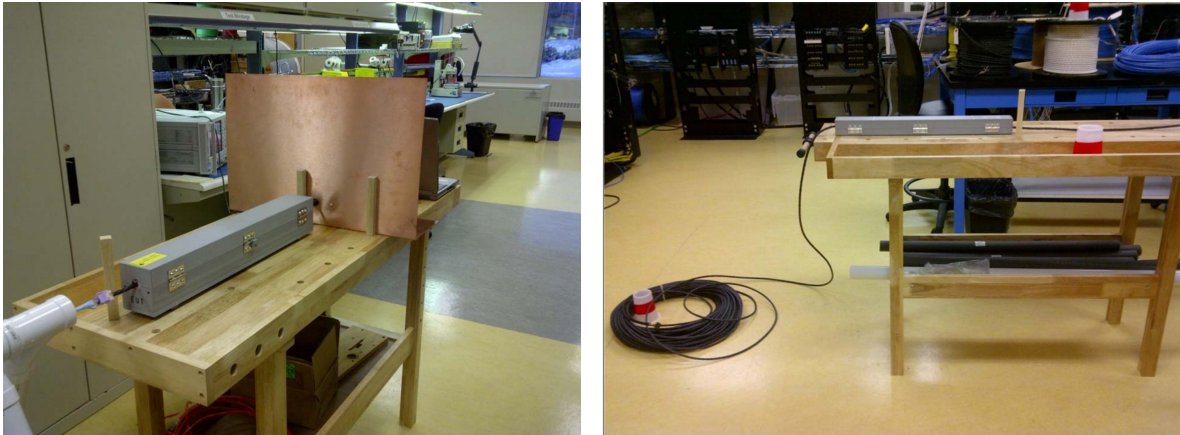
- absorpčními klešti s minimálním kmitočtovým rozsahem od 30 MHz do 1 GHz. Pokud se měření provádějí mimo tento kmitočtový rozsah, musí se použít příslušné absorpční zařízení,
- feritovým absorbérem s minimálním kmitočtovým rozsahem od 30 MHz do 1 GHz s útlumem $a_{\text{Ferrite}} \leq 10$ dB,
- kovovou odrazovou deskou (minimálně 420 mm x 420 mm),
- přijímačem s kalibrovaným stupňovým útlumovým článkem nebo analyzátozem sítě, navázaným pomocí nízkošumového zesilovače, pokud je to nutné pro požadavky velmi vysokého dynamického rozsahu,
- obvodem zatěžovacího odporu [7].



Obrázek 3.13: Měření povrchové vlny na blízkém konci vzorku (převzato z [7]).

Na obrázku 3.13 jsou jednotlivé části zkušební metody označeny: **0** jako generátor signálu se vstupní impedancí Z_0 , **1** jako zkoušený kabel s jmenovitou charakteristickou impedancí Z_1 , **2** jako vnější obvod zkoušeného kabelu s impedancí Z_2 , **3** jako absorpční kleště s impedancí Z_3 , **4** jako měřicí přijímač, **5** jako symetrizační člen (pokud lze použít), **6** jako proudový transformátor kleští, **7** jako kabel měřicího přijímače, **8** jako absorbér (feritová trubka) kleští s vloženým útlumem > 10 dB, **9** jako absorbér (nebo druhé kleště) s vloženým útlumem

> 10 dB, **10** jako zakončení zkoušeného kabelu, **11** jako stínění generátoru signálu a symetrického členu a **12** jako kovová odrazová deska [7].

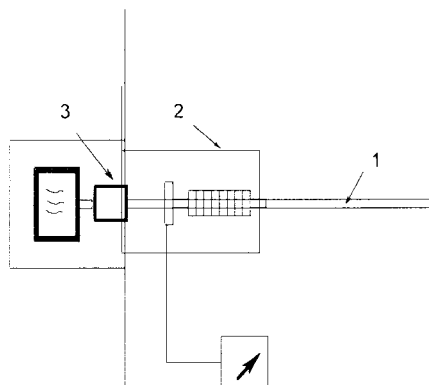


Obrázek 3.14: Zkušební uspořádání metody absorpčních kleští. Na obrázku vlevo je blízký konec s absorpčními klešti a generátorem za kovovou deskou, vlevo je pak konec vzdálený zakončený svazkem symetrického kabelu. (převzato z [26]).

3.4.3 Kalibrační postup

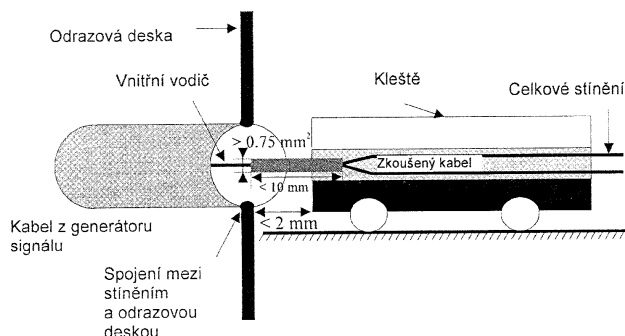
Útlum měřicího uspořádání je určen nejprve měřením provozního útlumu a_{cal} a poté útlumu odrazu absorpčních kleští v kalibračním uspořádání a_{ref} na obrázku 3.15. Kalibrace se provádí se stejným typem kabelu, který bude později testován. V případě koaxiálního kabelu se výkon přiváděný z generátoru přivádí přímo na stínění, v kalibračním uspořádání tedy není zakončen [7].

Připojení z výstupu generátoru na stínění kabelu musí mít nízký odpor (min. průřez mědi je $S = 0,75 \text{ mm}^2$) a musí být krátké (max. 10 mm od konce kabelu). Kabel musí být v absorpčních kleštích vycentrován. Stínění výstupního kabelu z generátoru signálu musí být připojeno na ochrannou stínící desku, aby se zajistila zpětná cesta pro signál. To lze provést připojením koaxiální průchodky na stínící desku a připojením generátoru k tomuto konektoru pomocí kabelu s nízkým útlumem [7].



Obrázek 3.15: Kalibrační uspořádání (převzato z [7]).

Na obrázku 3.15 jsou jednotlivé části kalibračního uspořádání označeny: **1** jako stínění nebo vnější vodič zkušební vzorku, **2** absorpční kleště a **3** konektor připevněný na odrazovou desku.



Obrázek 3.16: Zakončení kabelu během kalibrace (převzato z [7]).

Útlum absorpčních kleští a_{cl} včetně provozního útlumu zkušebních přívodů se určí dle rovnice (3.15):

$$a_{cl} = a_{cal} - a_{rff} \text{ (dB)}, \quad (3.15)$$

kde a_{cal} (dB) je provozní útlum přívodních kabelů a a_{rff} (dB) je útlum odrazu.

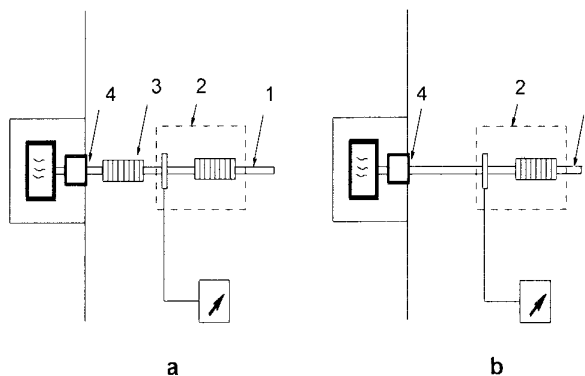
Útlum odrazu a_{rff} se určí měřením rozptylového parametru S_{11} vyjádřeného jako činitel odrazu

$$a_{rff} = -10 \cdot \log_{10} |1 - (S_{11})^2| \text{ (dB)}. \quad (3.16)$$

Provozní útlum se pak určí dle postupů popsanych v kapitole 3.1.

Měření obou rozptylových parametrů se zde obvykle provádí síťovým analyzátozem. Kalibrační rovinou pro měření útlumu odrazu je vstupní kolík průchodky na stínící desce. Celkový kalibrační útlum a_{cl} se potom musí odečíst od všech měření zkušebního kabelu [7].

Vložený útlum použitého feritu na vzdáleném konci zkušební uspořádání musí zajistit potlačení odražené vlny úseku kabelu za tímto feritem. Je proto nutné ověřit, zda je hodnota vloženého útlumu použitého feritu (absorbéru) vyšší než 10 dB [7].



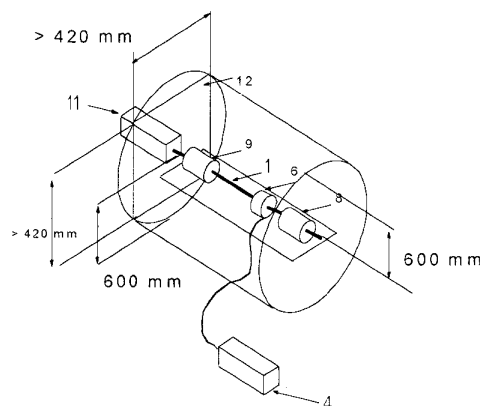
Obrázek 3.17: Měření vloženého útlumu absorbérů (převzato z [7]).

Na obrázku 3.17 jsou jednotlivé části měřicího uspořádání pro ověření vloženého útlumu absorbéru označeny: **1** jako vzorek kabelu, **2** jako absorpční kleště, **3** jako zkoušený absorbér a **4** jako připojení přívodního koaxiálního kabelu generátoru.

Měřený absorbér se musí umístit co nejbližší připojovacímu bodu **4** na obrázku 3.17. Pomocí absorpčních kleští se potom měří útlum uspořádání, jak ukazuje obrázek 3.17a. Zkoušený absorbér se poté vyjme a s absorpčními kleštěmi se znovu změří proud kleští jako na obrázku 3.17b. Rozdíl úrovní je potom hodnota vloženého útlumu použitého absorbéru, která by měla být vyšší, než 10 dB. Zde se použije vzorek kabelu již pro samotná měření, tedy impedančně zakončen dle obrázku 3.13 [7].

3.4.4 Postup měření

Zkoušený koaxiální kabel je připojen přímo ke generátoru signálu. Žádný kovový předmět nebo osoba nesmí být blíže než minimálně 600 mm ke zkoušenému kabelu v jakémkoli směru, který je kolmý k ose kabelu. Délka každé strany stínící desky přes kterou je přiveden přívodní kabel generátoru do zkušební vzorku by musí být větší, než 420 mm [7].



Obrázek 3.18: Uspořádání pro měření na vzdáleném konci. Označení jednotlivých položek je na obrázku 3.13 (převzato z [7]).

V obou případech musí být proudová sonda absorpčních kleští směřována k absorbéru. Hodnota vazebního útlumu a_C je měřena při lineárním rozmítání kmitočtu v celém stanoveném kmitočtovém rozsahu a ve stejných kmitočtových bodech jako u kalibračního postupu, přičemž je měření prováděno na blízkém a vzdáleném konci, kdy se vymění poloha absorpčních kleští a samotného feritu (či druhých kleští). Měření na blízkém konci je pro referenci na obrázku 3.13 [7].

3.4.5 Vyhodnocení výsledků zkoušky

Změřené výkony, respektive napětí udávané použitým přijímacím zařízením **4** na obrázku 3.13 jsou postupně určené hodnoty měření na blízkém P_n a vzdáleném P_f konci, resp. U_n a U_f . K vyhodnocení se bere v potaz pouze největší změřený výkon buď na blízkém či vzdáleném

konci, tzn. nejhorší hodnota, pro kterou by bylo stínění méně kvalitní. Vazební útlum a_c se potom vyjádří vztahem (3.17):

$$a_c = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{gen}}}{\max[P_n; P_f]} \right) - a_{\text{cl}} + a_{\text{cab}} \text{ (dB)}, \quad (3.17)$$

respektive jako změřený poměr napětí rovnicí (3.18):

$$a_c = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{\text{gen}}}{\max[U_n; U_f]} \right) - a_{\text{cl}} + a_{\text{cab}} \text{ (dB)}, \quad (3.18)$$

kde P_{gen} (W), U_{gen} (V) je výkon resp. napětí generátoru signálu, P_n (W), U_n (V) je výkon resp. napětí změřené na blízkém konci, P_f (W), U_f (V) je výkon resp. napětí změřené na vzdáleném konci, a_{cl} (dB) je kalibrační útlum měřicího uspořádání a a_{cab} (dB) je útlum kabelu z přípojovacího bodu na stínící desce do místa proudového čidla absorpčních kleští.

Při měření na blízkém konci může být útlum kabelu a_{cab} zanedbán. U měření nesymetrických kabelů je vazební útlum a_c rovný útlumu stínění a_s , stejně jako v (2.28).

4 Měření triaxiální metodou

V této kapitole je popsána vypracovaná metodika pro měření účinnosti stínění kabelů pomocí triaxiální metody a účinnosti stínění konektorů pomocí modifikované triaxiální metody, která je doplněna koncentrickou trubkou, viz. kapitola 3.3.6. Měřenou veličinou je útlum stínění a_S , který se používá pro kvantifikaci účinnosti stínění ve frekvenčních polohách pro elektricky dlouhé kabely. Jedná se zároveň o parametr, který je v dokumentaci o měření na metalických kabelech nejčastěji vyžadován. Měření bude prováděno soustavou vazebních trubek **CoMeT** (Coupling Measuring Tube), což je implementace triaxiální metody německé firmy **bedea**. Celé uspořádání je tvořeno převážně hliníkem, tedy neferomagnetickým materiálem, jako je vyžadováno v kapitole 3.3.3.

4.1 Zkušební kabelové vzorky

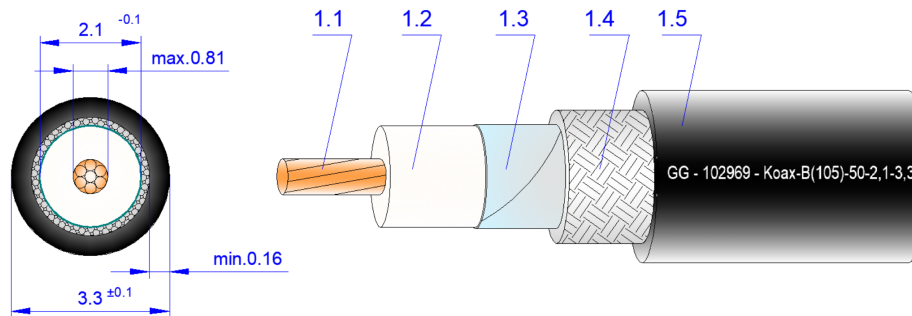
Před samotným měřením bylo nutné požádat výrobní sektor o zhotovení kabelových vzorků. Vzhledem k tomu, že se pro měření útlumu stínění používá trubice v délkovém rozmezí 1 m až 3 m a maximální přesah vzorku od zakončení k trubici nesmí být dle EN-50289-1-6 větší než 0,5 m. Celkové délky vzorků jsou tedy 1,5 m a 3,5 m, kde každá délka byla zhotovena po třech kabelech, aby bylo možné provést případné statistické vyhodnocení.



Obrázek 4.1: Svazky označených kabelových vzorků.

Předmětem zkoumání byla také stálost naměřených průběhů pro nízkoztrátové kabely se strojově nalisovanými vysokofrekvenčními anténními konektory FAKRA a ručně nalisovanými

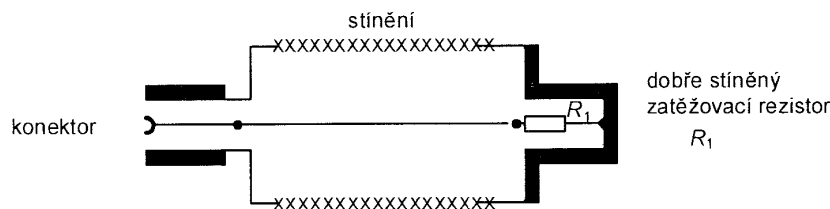
konektory SMA na obou koncích kabelu. Celkem je tak k dispozici 12 vzorků.



Obrázek 4.2: Detail uspořádání použitého nízkoztrátového koaxiálního kabelu s označením výrobce GG CoSpeed 5031/9 a externí specifikací N.909.934. Jednotky jsou v mm. (převzato z [27]).

Na obrázku 4.2 jsou jednotlivé části označeny: **1.1** jako vnitřní měděný vodič (Cu-ETP1-A019-P), **1.2** jako polypropylenová izolace, **1.3** jako hliníková stínicí fólie a **1.4** jako vnější vodič tvořený měděným opleteným stíněním (Cu-ETP1-A013-C). Jedná se o nízkoztrátový koaxiální kabel s charakteristickou impedancí 50Ω .

Dle normy je požadováno, aby měl zkušební vzorek jeden konektor pro připojení ke generátoru signálu přičemž se opačný konec opatří impedančním zakončením. Používá se například SMD rezistor s nízkou tolerancí naletovaný mezi stíněním koaxiálního kabelu a vnitřním vodičem.



Obrázek 4.3: Příprava zkušební vzorku dle ČSN-EN-50289-1-6 (převzato z [7]).

Ve zkušebním ústrojí CoMeT lze vzorek zakončit pomocí nástavce, který je zakončen impedancí 50Ω , viz. obrázek 4.24. Jedná se tedy o rozebíratelné spojení vylučující nutnost letování a celý proces přípravy vzorku se tak značně urychlí. Z tohoto důvodu byly měřené zkušební kabelové vzorky na obou koncích opatřeny konektory.

4.2 Vlastní výroba vzorku s SMA konektory

Pro porovnání výsledků měření se strojově nalisovanými konektory je nutné zhotovení konektorů vlastnoručním lisováním. Znatelné rozdíly výsledků měření by se měly projevovat také napříč jednotlivými vzorky s SMA konektorem. I přestože byl kladen důraz na to, aby byl každý individuální vzorek zhotoven stejně, ruční zpracování jednoduše nebude tak přesné

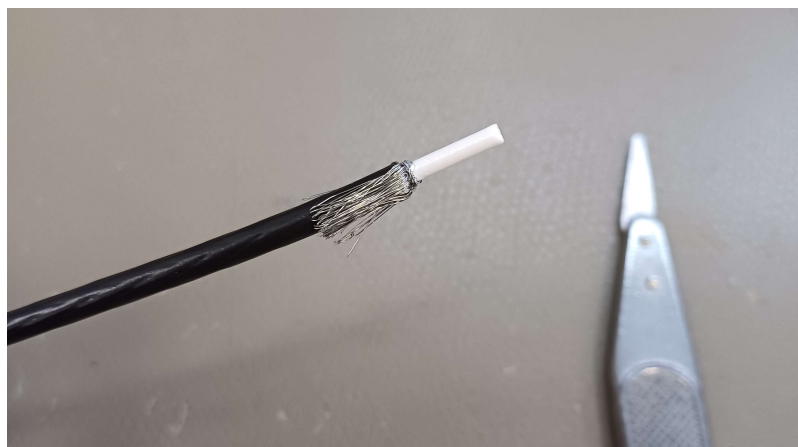
jako to strojové. Osazení konektory bylo provedeno na obou stranách kabelu, aby bylo možné připojení do zkušebního uspořádání, jedním koncem na měřicí hlavici ve které se nachází impedanční zakončení a druhým na bránu síťového analyzátoru jakožto generátoru signálu.



Obrázek 4.4: Potřebné vybavení pro ruční zhotovení SMA-M konektoru. Na obrázku je zleva skalpel, štípací kleště, lisovací kleště pro *lowloss* kabely a částmi SMA konektoru včetně jehličky.

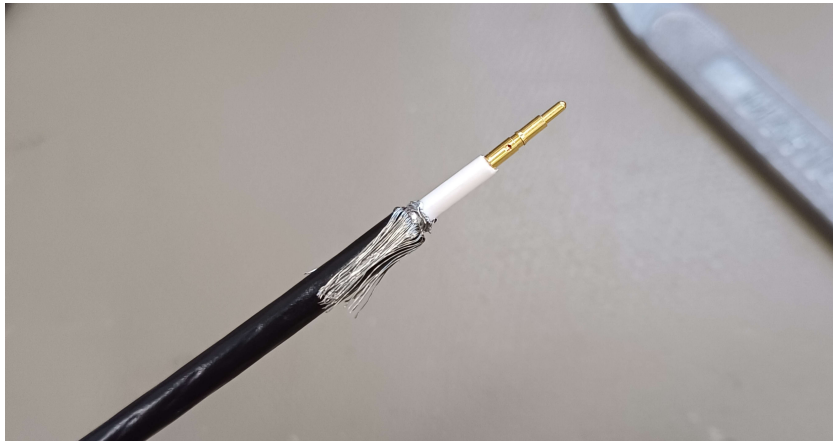
Postup osazení je následující:

1. Od konce kabelu vyměříme vzdálenost přibližně 1 cm.
2. Pomocí skalpelu odstraníme plášť izolace. Přitom je nutné dbát na nepoškození pleťového vodiče, který se nachází pod izolací.



Obrázek 4.5: Odpláštěný konec kabelu s odebranou hliníkovou fólií a obnaženým dielektrikem ještě bez řezu pro osazení kontaktní jehličkou.

- Po odpláštění stínění zahneme dle obrázku 4.5 a ve stejné vzdálenosti pak pomocí štípacích kleští odstraníme hliníkovou fólie.
- Od začátku kabelu vyměříme přibližně 3 mm a dle této vzdálenosti zkrátíme obnažené dielektrikum.



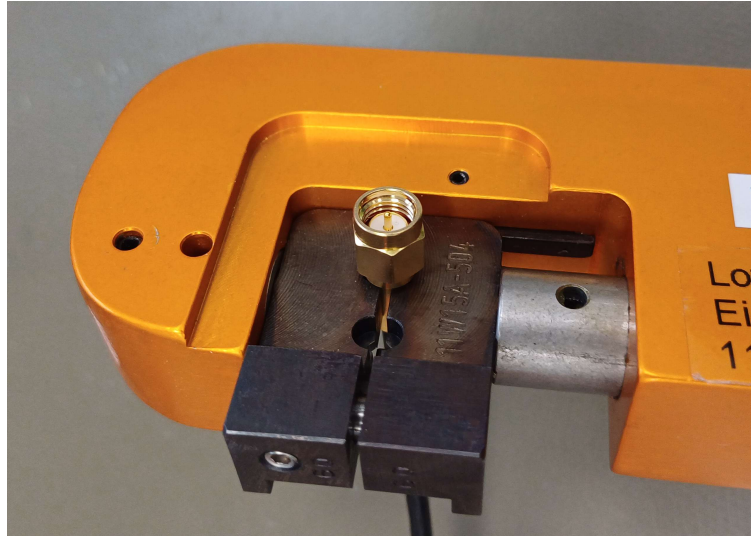
Obrázek 4.6: Nasazená kontaktní jehlička připravená k lisování.

- Na vodič nasadíme kontaktní jehličku dle obrázku 4.6 a provedeme lisování po kterém je nutné zkontrolovat, aby byla jehla na vodiči pevně uchycena.
- Přes zahnuté opletení vložíme lisovací prstenec.
- Na kontaktní jehlu nasadíme konektor dle obrázku 4.7. Musí se použít taková síla, aby byla po nasazení jehla a konektor ve stejné úrovni.



Obrázek 4.7: Nasazený konektor a lisovací prstenec.

- Opletení zkrátíme štípacími klešti zhruba o polovinu a zahneme zpět do jeho původní pozice.
- Přes opletení nasuneme lisovací prstenec. Opletení by po zkrácení z předchozího kroku nemělo prstenec přesahovat.



Obrázek 4.8: Kontaktování pomocí lisovacích kleští.

10. Prstenec umístíme do lisovacích kleští a provedeme nakontaktování.
11. Zhotovený zkušební vzorek označíme připraveným štítkem s číslem, délkou kabelu a typem konektoru.

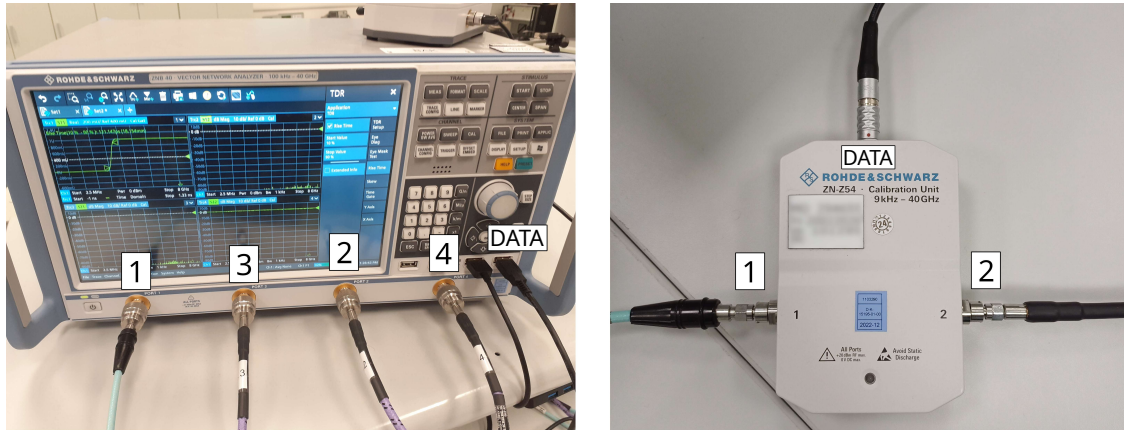


Obrázek 4.9: Hotový vzorek s nalisovaným konektorem.

Tento postup je opakován pro ostatních pět vzorků. Příslušným štítkem musí být opatřeny i strojově vyrobené kabely s FAKRA konektory.

4.3 Kalibrace vektorového analyzátoru

Následující postup popisuje plnou dvojbrannou kalibraci vektorového síťového analyzátoru ZNB 40 za použití automatické kalibrační sady ZN-Z54 a také následné ověření úspěšnosti kalibrační procedury. Kalibraci je nezbytné provádět před každým měřením či změně parametrů měření, například při změně frekvenčního rozsahu.

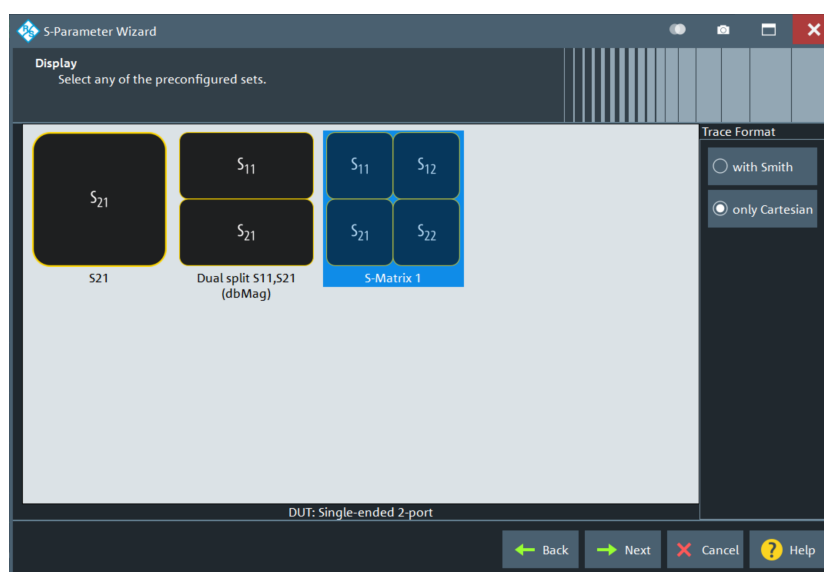


Obrázek 4.10: Kalibrační uspořádání s vektorovým síťovým analyzátelem ZNB 40 vlevo a automatickou kalibrační sadou ZN-Z54 vpravo pro plnou dvojbrannou kalibraci.

Před jakoukoli prací na vektorovém analyzátoru je nutné použití antistatického náramku a/nebo obuvi pro práci s ESD.

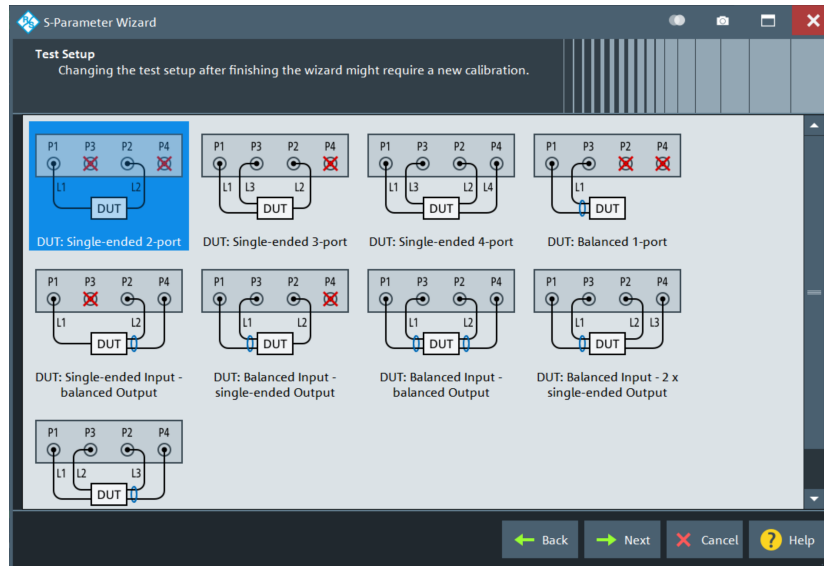
4.3.1 Kalibrační postup

1. Na hlavním panelu v oddílu *CHANNEL* stiskneme tlačítko *CAL*. Na obrazovce se po pravé straně objeví dialogové okno.
2. V dialogovém okně zvolíme položku *Start CAL*. Průvodce kalibrací je spuštěn zvolením *Start Cal Unit (Wizard)*. Objeví se okno *S-Parameter Wizard*.
3. V okně **Display** zvolíme kalibraci pro výpis kompletní matice S parametrů.
4. Přejdeme na další obrazovku pomocí *Next*.



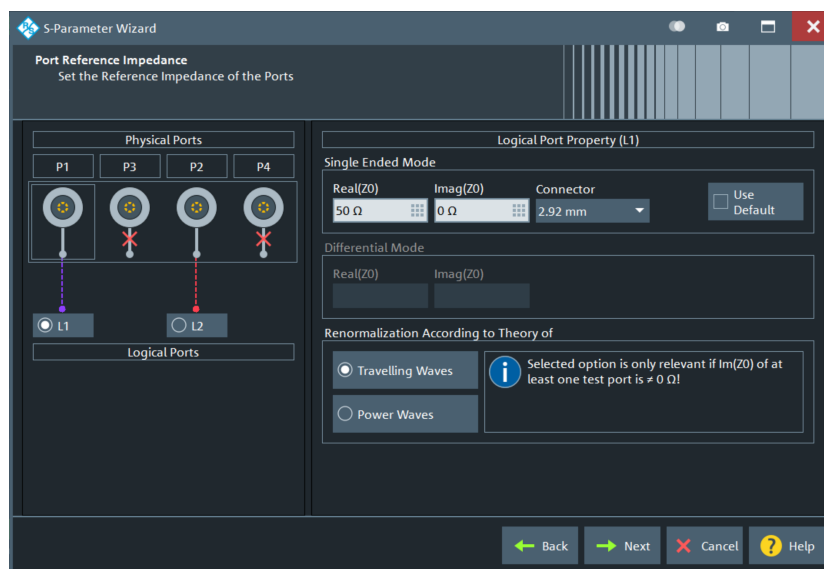
Obrázek 4.11: Volba S parametrů v průvodci kalibrací.

5. V okně **Test Setup** zvolíme zkušební uspořádání jako nesymetrické na branách $P1$ a $P2$ pomocí volby *DUT: Single-ended 2-port*.
6. Přejdeme na další obrazovku pomocí *Next*.



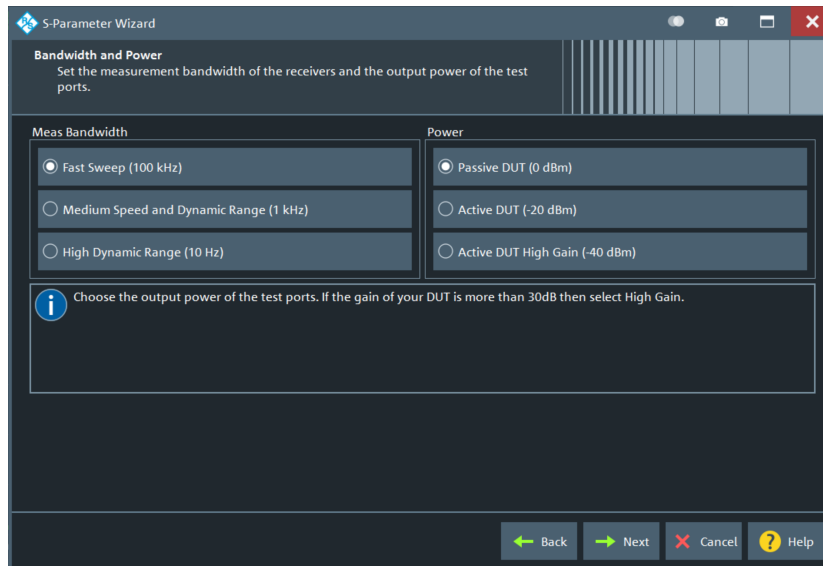
Obrázek 4.12: Volba zkušební uspořádání v průvodci kalibrací.

7. V okně **Port Reference Impedance** nastavíme impedanci brány Z_0 na 50Ω pro reálnou složku. Imaginární složku impedance ponecháme na nulové hodnotě.
8. Navolíme používaný konektor, v tomto případě se používá konektor 2,92 mm.
9. Logické bráně přiřadíme shodné číslo jako má brána fyzická.
10. Přejdeme na další obrazovku pomocí *Next*.



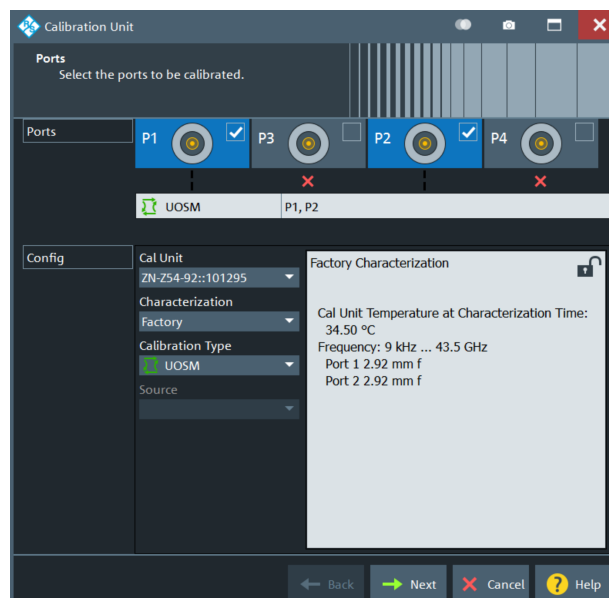
Obrázek 4.13: Nastavení referenční impedance a přiřazení fyzických bran k logickým v průvodci kalibrací.

11. V okně **Bandwidth and Power** v sekci *Meas Bandwidth* volíme hodnotu šířky pásma označenou jako *Fast Sweep* dle specifikace LAH.V03.825, a to 100 Hz.
12. V sekci *Power* zvolíme pasivní zkušební uspořádání pomocí volby *Passive DUT (0 dBm)*.
13. Přejdeme na další obrazovku pomocí *Next*.



Obrázek 4.14: Nastavení šířky pásma rozmítání a aktivního či pasivního zkušebního uspořádání v průvodci kalibrací.

14. V okně **Ports** vybereme *UOSM* jako typ kalibrace.



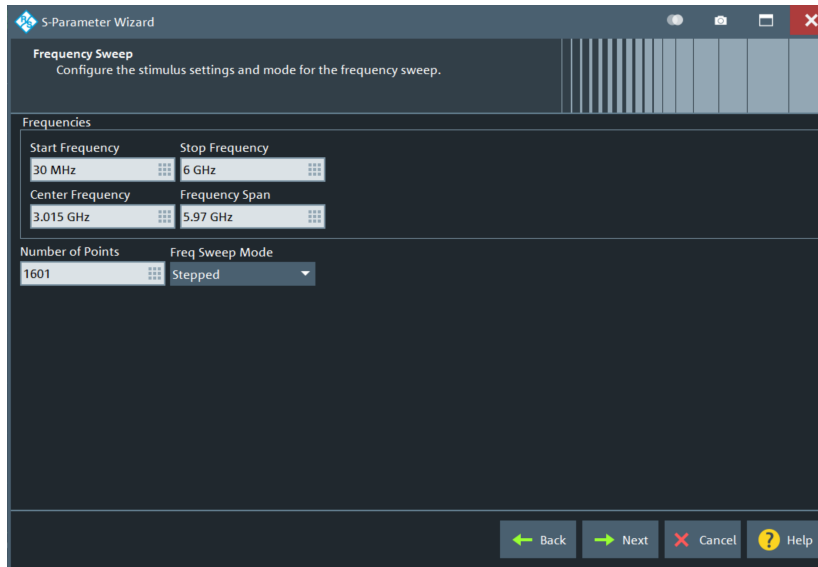
Obrázek 4.15

15. Při volbě počátečního a konečného kmitočtu rozmítání a bodů měření se v okně **Frequency Sweep** odkazujeme na koncernovou specifikaci LAH.V03.V825. Pro kabel s charakteristickou impedancí 50Ω (tedy pro měřený kabel N.909.934) volíme počáteční kmitočet

rozmitání v poli *Start Frequency* jako 30 MHz a konečný kmitočet v poli *Stop Frequency* 6 GHz.

16. Počet měřicích bodů v poli *Number of Points* volíme 1601.

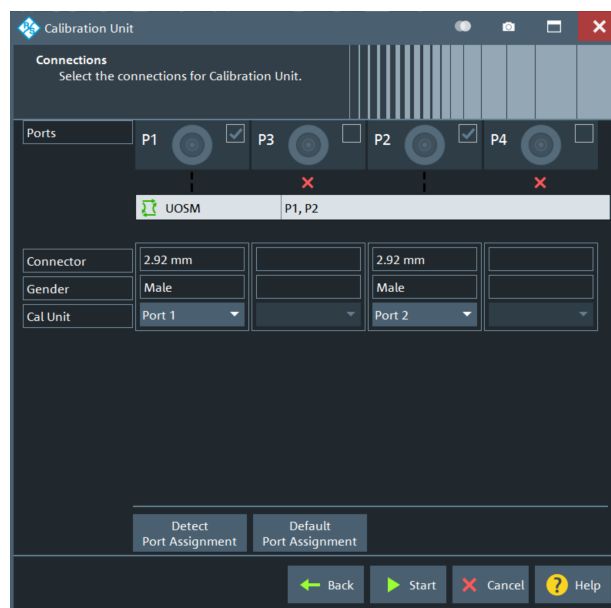
17. Přejdeme na další obrazovku pomocí *Next*.



Obrázek 4.16: Nastavení frekvenčního rozsahu kalibrace a počtu bodů měření dle LAH.V03.825 v průvodci kalibrací.

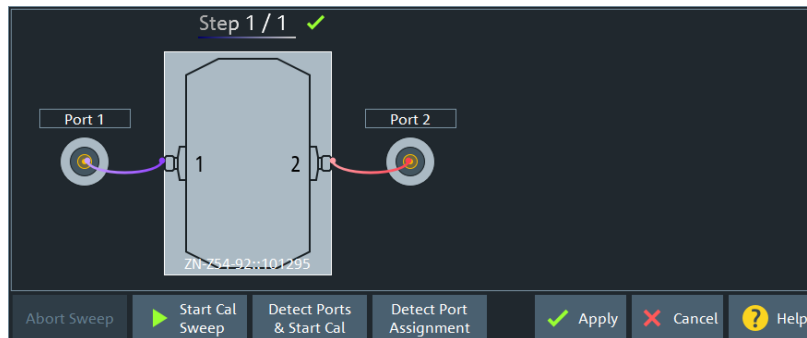
18. V posledním okně průvodce kalibrací **Connections** zkontrolujeme zvolený typ kalibrace a zvolené konektory přívodních vodičů.

19. Pokud je vše v pořádku, započneme automatický kalibrační proces pomocí tlačítka *Start*.



Obrázek 4.17: Rekapitulační okno průvodce kalibrací.

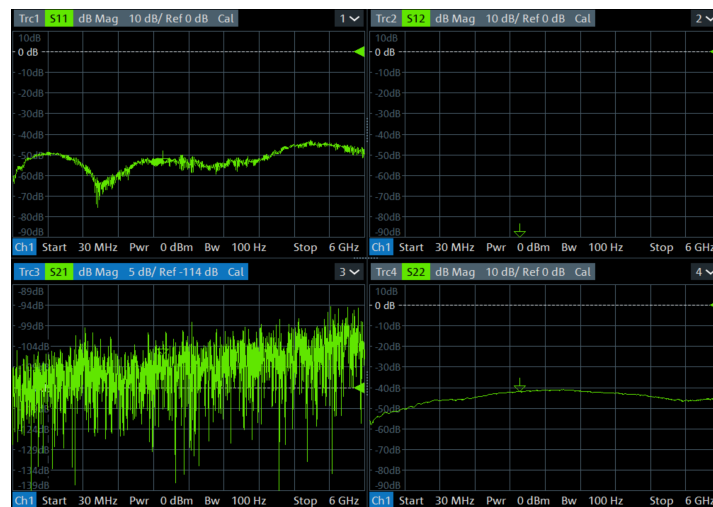
20. Po dokončení kalibračního procesu zvolíme *Apply*. Kalibrační proces je tímto krokem ukončen.



Obrázek 4.18: Dokončení kalibračního procesu.

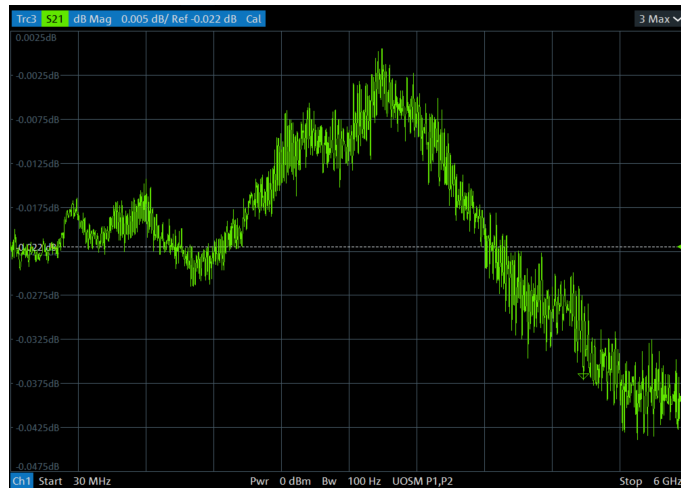
4.3.2 Ověření kalibračního postupu

Po úspěšném provedení je nutno správnost kalibrace ověřit. Dle doporučení laboratoře musí být naměřená úroveň parametrů S_{11} a S_{22} nižší, než -35 dB. Dle obrázku 4.19 je tato podmínka splněna. V horní části jednotlivých oken na obrázku 4.19 je v pruhu *Trc* zřejmé označení *Cal*, které indikuje provedenou kalibraci přístroje pro příslušný parametr.



Obrázek 4.19: Hlavní obrazovka měřených S parametrů bezprostředně po kalibraci.

Parametr přenosu S_{21} by měl být při spojených branách P1 a P2, na kterých proběhla kalibrace, ideálně nulový. Z obrázku 4.20 je zřejmé, že se napěťové úrovně pohybují v rozmezí $-0,0025$ dB až $-0,0425$ dB což je pro splnění této podmínky dostačující.



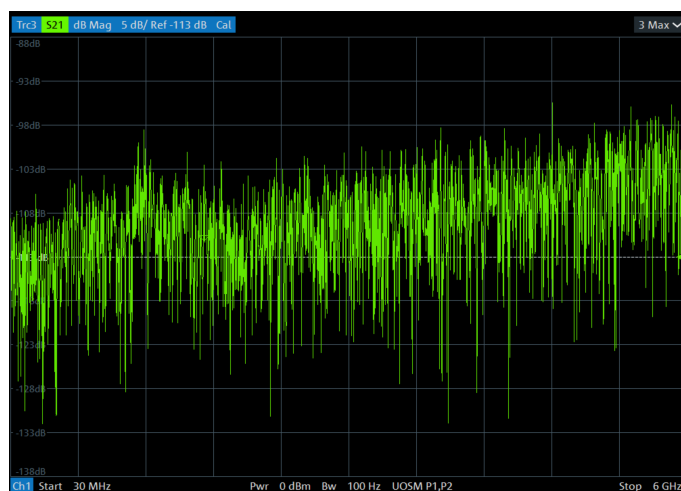
Obrázek 4.20: Detail naměřeného průběhu S_{21} při spojených branách P1 a P2.

Na závěr je nutno ověřit dynamický rozsah měření. To bylo provedeno při zatížení obou kalibrovaných bran precizními zakončovacími rezistory o hodnotě 50Ω . Na obrázku 4.22 se naměřená úroveň S_{21} pohybuje bezpečně pod -90 dB v celém kmitočtovém rozsahu.



Obrázek 4.21: Precizní zakončovací rezistor o hodnotě 50Ω od firmy Rosenberger.

Dle specifikace LAH.V03.825 je pro měřený kabel s externím označením N.909.934 vyžadovaný útlum stínění $a_S \leq -60$ dB v kmitočtovém rozmezí 30 MHz - 4 GHz a $a_S \leq -50$ dB v rozmezí 4 GHz až 6 GHz. Ověřený dynamický rozsah je tady vyhovující a měl by být dostačující pro vykreslení naměřené křivky útlumu stínění v celém kmitočtovém pásmu.



Obrázek 4.22: Detail naměřeného průběhu S_{21} při zatížení bran P1 a P2 precizním rezistorem.

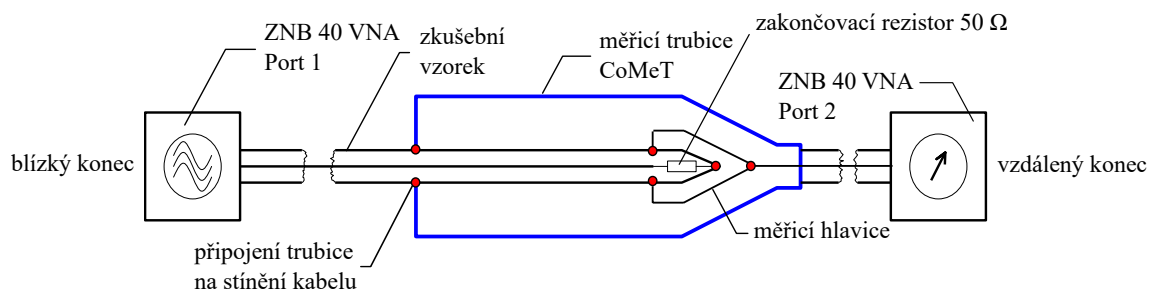
Tímto je ověření postupu kalibrace u konce a lze přistoupit k samotnému měření.

4.4 Měření útlumu stínění kabelu

Po zhotovení zkušebních vzorků a provedené kalibraci síťového analyzátoru je možné započít samotné měření. Protože budou jednotlivé vzorky několikrát měřeny z důvodu statistického vyhodnocení, je dobré si předem připravit metodiku pro pojmenování jednotlivých vzorků. Při pozdější práci s daty bude pro každé měření nutné z názvu souboru bezpečně rozeznat číslo vzorku, jeho délku, konektor jímž je vzorek opatřen a délku měřicí trubice.

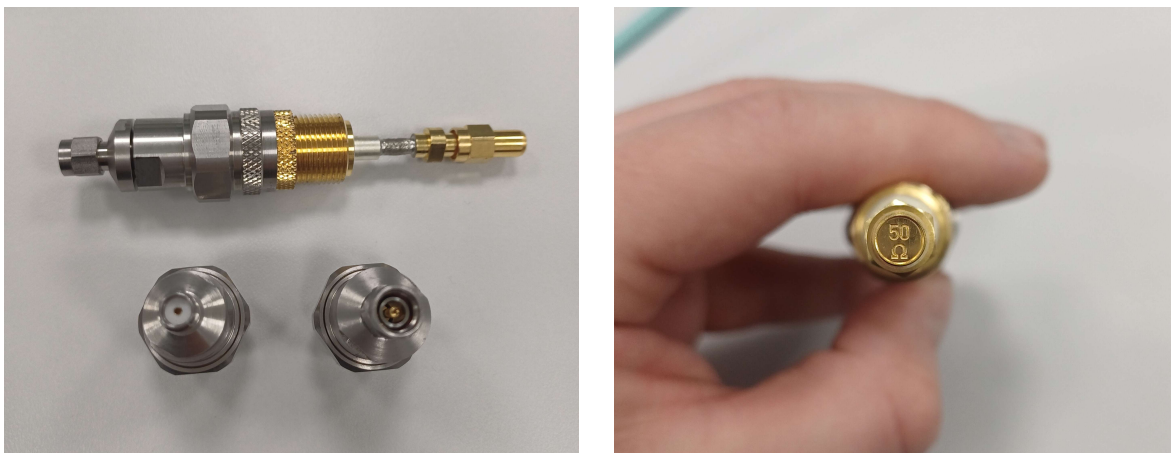
4.4.1 Zkušební uspořádání

Na blízkém konci se nachází generátor signálu, který zajišťuje VNA na své bráně **1** jako na obrázku 4.23, spolu se zkratem stínění a zkušební trubice. Přijímač je opět na bráně VNA číslo **2**. Označení bran VNA odpovídá fyzickému uspořádání na obrázku 4.10.



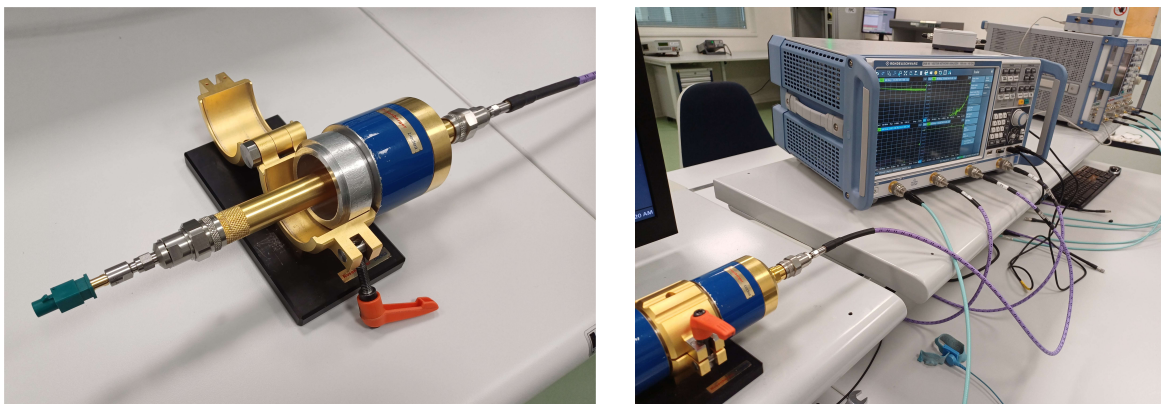
Obrázek 4.23: Principiální uspořádání triaxiální metody pro měření útlumu stínění kabelů.

Protože je charakteristická impedance měřeného kabelu rovna 50Ω , není mezi generátor a trubicí vložen přizpůsobovací člen a kabel je svou charakteristickou impedancí zakončen v měřicí hlavici, viz. obrázky 4.23 a 4.24.



Obrázek 4.24: Nástavec pro kontaktování a impedanční zakončení zkušebního vzorku napájeného generátorem jakožto součást měřicí hlavice s momentálně upnutým adaptérem na konektory SMA.

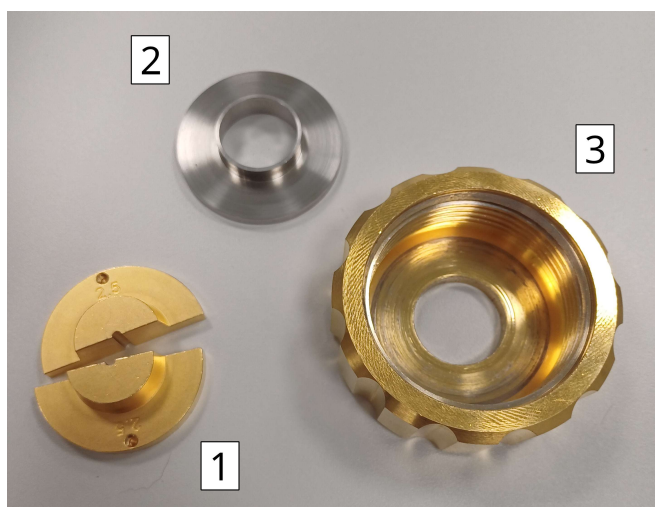
Pro měření útlumu stínění je použita měřicí soustava o délce 1 m a 3 m, kdy je pak tvořena třemi 1m trubicemi uloženými do rozebíratelných spojení s aretačním mechanismem, pomocí něhož se připojí i měřicí hlavice jak je patrné na obrázcích 4.25.



Obrázek 4.25: Na obrázku vlevo je měřicí hlavice s nástavcem pro impedanční zakončení s adaptérem pro připojení zkušebního vzorku s konektorem FAKRA. Obrázek vpravo pak ukazuje připojení trubice na přijímací bránu VNA.

Podle schémat popisující triaxiální metodu na obrázcích 3.7 a 4.23 je vývod trubice z měřicí hlavy označován jako vzdálený konec, který je připojen na **přijímací** bránu VNA, jako na obrázku 4.25 vpravo. Je tedy zřejmé, že pojmy *blízký* a *vzdálený* konec nemají žádnou souvislost s fyzickým umístěním VNA, nýbrž se samotným zapojením bran generátoru a přijímače.

Jak již bylo několikrát zmíněno, pro měření útlumu stínění a_S triaxiální metodou musí být zajištěn zkrat na blízkém konci trubice, tedy na straně připojovacího bodu ke generátoru. Zkratem je myšleno připojení trubice na stínění zkoušeného kabelu po celém obvodu v místě odpláštění, viz. principiální uspořádání na obrázku 4.23.



Obrázek 4.26: Upínací mechanismus na blízkém konci trubice.

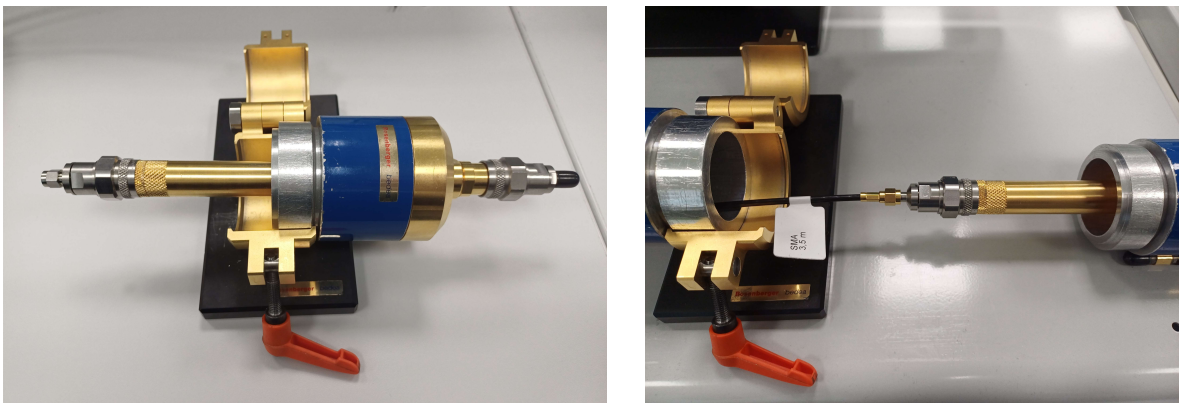
Upínací mechanismus na obrázku 4.26 slouží k uložení stínění a zajištění vodivého spojení s trubicí. Do koncových svorek **1** se vkládá odpláštěná část kabelu. Na svorky je pak nasazen

prsteneč **2**. Pomocí převlečné matice **3** se celé upevnění našroubuje na konec trubice. V měřicí sadě jsou koncové svorky dostupné pro různé průměry zkoušených kabelů.

4.4.2 Postup přípravy zkušební vzorku pro měření

Spíše než odměření místa, kde má dojít k odpláštění pomocí svinovacího metru, je výhodnější míru na kabelovém vzorku označit přímo ve zkušebním uspořádání. Postup přípravy vzorku pro měření útlumu stínění kabelu by potom vypadal následovně:

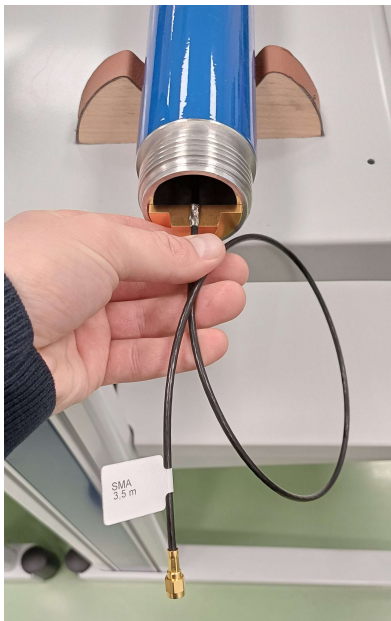
1. Vyjmeme měřicí hlavici a odstavíme ji mimo zkušební uspořádání.
2. Zvolíme vhodný adaptér pro připojení zkušební vzorku a upevníme ho k měřicí hlavici dle obrázku 4.27, popřípadě dle obrázku 4.25 vlevo v případě měření kabelu s FAKRA konektorem.
3. Na adaptér připojíme zkušební vzorek dle obrázku 4.27 vpravo, který následně provlečeme trubicí.



Obrázek 4.27: Měřicí hlavice s upevněným adaptérem pro zkušební vzorky s SMA konektorem.

Poznámka: Aby bylo možné správně odměřit místo odpláštění, je nutné vzorek na konci trubice napnout. Toto je důležité pro pozdější měření, které by mohlo být případnými průvěsy kabelu podél délky trubice ovlivněno.

4. Kabel napneme a uložíme do vhodně zvolené koncové svorky.
5. Na místech, která jsou v úrovni s podélnými hranami koncové svorky, provedeme na plášti kabelu dvě viditelná označení.
6. Vyjmeme koncovou svorku.
7. Vyjmeme měřicí hlavici a vzorek odpojíme.
8. Mimo měřicí uspořádání provedeme pomocí skalpelu odpláštění mezi označenými místy z kroku číslo 5.



Obrázek 4.28: Vodivý kontakt zkušební vzorku s trubicí na blízkém konci.

Výsledné odpláštění by mělo vypadat jako na obrázku 4.28. Příprava kabelového vzorku je tímto ukončena, nyní je možné provést samotné měření.

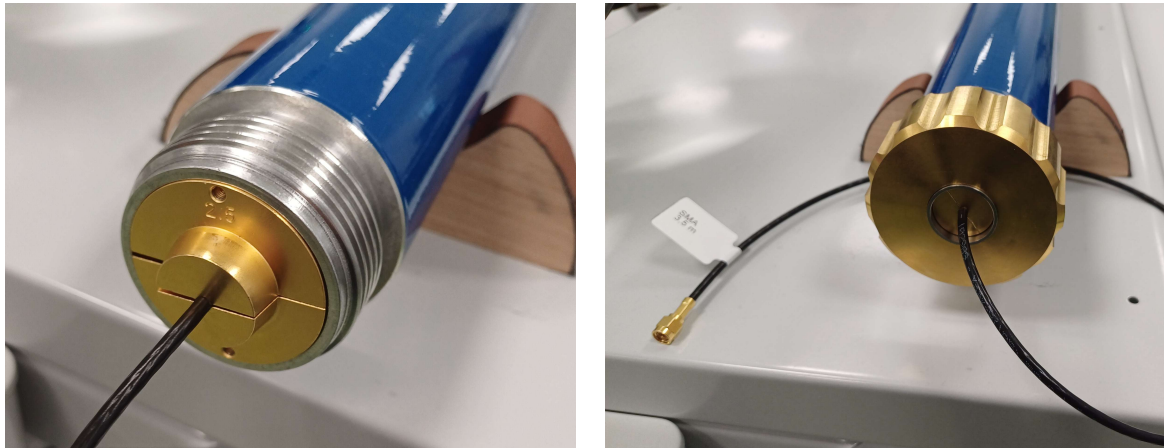
4.4.3 Postup měření

Postup měření účinnosti stínění kabelu je následující:

1. Na měřicí hlavici upevníme požadovaný adaptér.
2. Zkušební vzorek provlečeme trubicí a připojíme ho k měřicí hlavici.



Obrázek 4.29: Distanční kroužek vložený do trubice v místě rozebíratelného spojení.



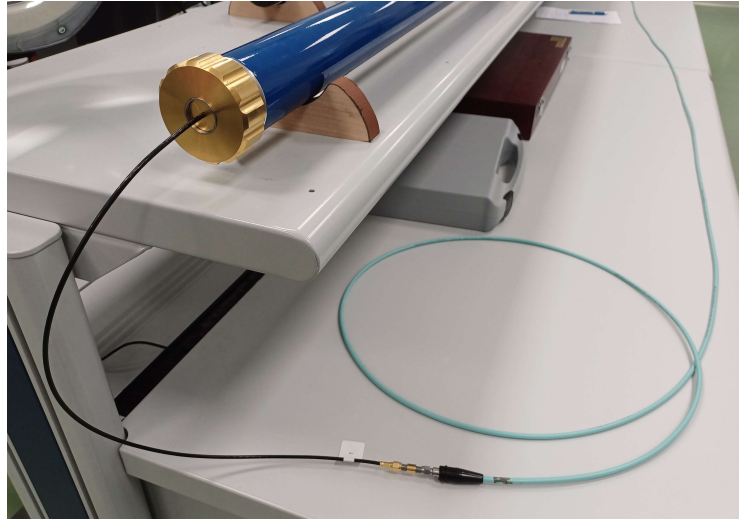
Obrázek 4.30: Odpláštěná část kabelu vložená do koncových svorek pro stínění o průměru 2,5 mm vlevo a celkové upevnění pomocí matice vpravo.

3. Do každého rozebíratelného spojení umístíme distanční kroužek pro další minimalizaci průvřesů podél trubice, viz. obrázek 4.29.
4. Na blízkém konci uložíme kabel do vhodně zvolených koncových svorek, jako na obrázku 4.30 vlevo.

Poznámka: Ačkoli je průměr stínění měřeného kabelu cca. 3,2 mm, lze záměrně volit koncové svorky pro průměry menší, což zajistí pevnější kontakt po našroubování převlečné matice.

5. Na koncové svorky nasadíme nejdříve prstenec a poté převlečnou matici, viz. obrázek 4.26.
6. Matici pevně utáhneme jako je tomu na obrázku 4.30 vpravo.
7. Pomocí oranžové páčky upevníme všechny spoje.
8. K upevněnému kabelu na blízkém konci trubice připojíme pomocí přívodních kabelů VNA bránu generátoru **1** a v případě potřeby použijeme adaptér. Pokud nemáme speciální **obuv pro práci s ESD**, použijeme **antistatický náramek**.

Poznámka: V tomto uspořádání bylo nutno použít redukci z konektoru přívodních kabelů VNA 2,92 mm na konektor zkušebního vzorku SMA (obr. 4.31) či FAKRA podle momentálního měření.



Obrázek 4.31: Připojení zkušební vzorku ke generátoru na blízkém konci trubice.

9. Vzdálený konec připojíme pomocí přívodních kabelů k VNA na přijímací bránu **2** stejně jako na obrázku 4.25. Opět je vyžadované použití antistatické ochrany.
10. Vyčkáme, než analyzátor zpracuje celý průběh.
11. Při exportu naměřeného průběhu jako `.csv` dbáme na správně zvolený oddělovací znak.
12. Soubor vhodně pojmenujeme, například `3m_3,5m_SMA_vzorek1_mereni3`.

Poznámka: Název souboru by měl obsahovat všechny parametry měření jakožto délka měřicí trubice, délka zkušební vzorku, konektor, číselné označení vzorku a číslo měření. Do souboru názvu souboru je doporučeno ukládat všechny parametry. Pokud bude z důvodu potřeby soubor umístěn mimo svůj adresář, z jeho názvu bude jasný jeho původ i všechny parametry, při kterých měření probíhalo.

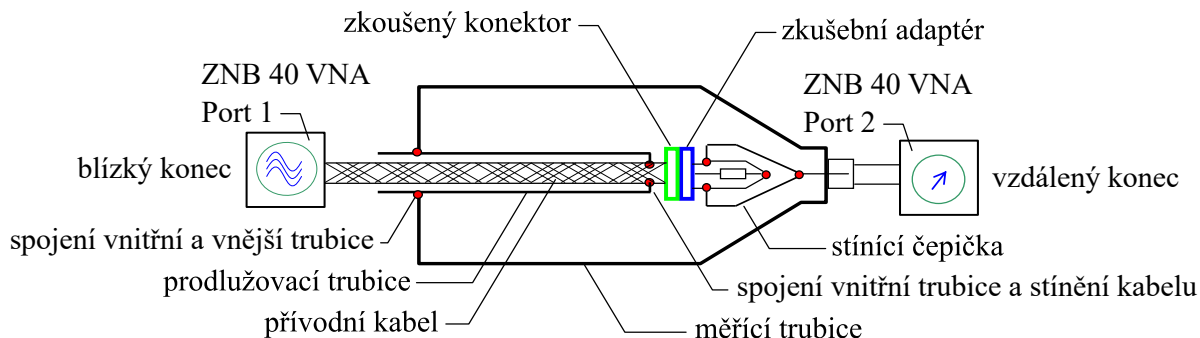
Tímto krokem je měření účinnosti stínění kabelu u konce.

4.5 Měření útlumu stínění konektoru pomocí tube-in-tube

Triaxiální metoda koncentrických trubek, tzv. tube-in-tube, je modifikací klasické triaxiální metody pro měření útlumu stínění konektorů, viz. 3.3.6. Postup měření se v podstatě liší jen o vložení koncentrické trubice.

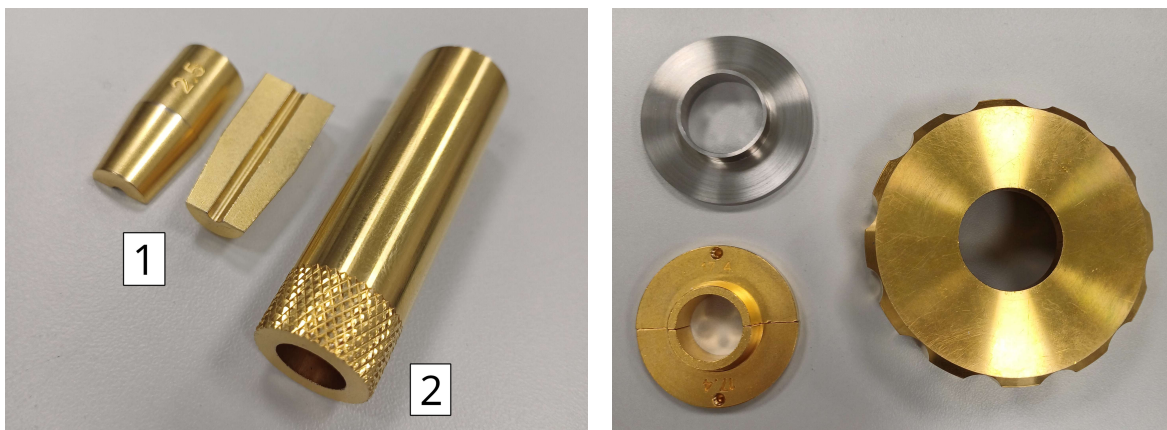
4.5.1 Zkušební uspořádání

Stejně jako u předchozího zkušební uspořádání pro klasickou triaxiální metodu se na blízkém konci nachází generátor signálu, který zajišťuje VNA na své bráně **1** spolu se zkratem koncentrické a měřicí trubice, viz. obrázek 4.32. Přijímač je opět na bráně VNA číslo **2**. Fyzické uspořádání a označení bran VNA odpovídá obrázku 4.10.



Obrázek 4.32: Principiální uspořádání triaxiální metody koncentrických trubek pro měření útlumu stínění konektorů (převzato s úpravami z [5]).

Oproti měření útlumu stínění se na blízký konec k měřicí trubici neupíná samotné stínění, nýbrž přídatná koncentrická trubice. Stínění kabelu je upnuté až v bezprostřední blízkosti konektoru u měřicí hlavice na vzdáleném konci.



Obrázek 4.33: Upínací mechanismy pro vodivé spojení vnitřní trubice a stínění kabelu na vzdáleném konci vlevo a pro spojení vnitřní a vnější měřicí trubice vpravo.

Funkce částí upínacího mechanismu na obrázku 4.33 vpravo je stejná jako na obrázku 4.26, místo upnutí stínění kabelu je však mechanismus upraven na upnutí vnitřní koncentrické trubice. Na obrázku 4.33 je potom upnutí stínění kabelu na vzdáleném konci, které je tvořeno upínacími svorkami **1** a kontaktní čepičkou **2**. Svorky zajišťují vodivé spojení stínění s čepičkou, která tvoří kontakt s vnitřní trubicí.

Použité délky trubice jsou stejné, jako při měření útlumu stínění.

Veškerý bližší popis triaxiálního uspořádání lze nalézt v kapitole 4.4.

4.5.2 Postup přípravy zkušební vzorku pro měření

Jelikož je pro tuto metodu odpláštění prováděno až u konektoru, lze místo řežu určit mimo zkušební uspořádání bez nutnosti napnutí kabelu, jak tomu bylo v přípravě vzorku u předchozí metody. Odpláštění je opět možné provádět bez svinovacího metru či jiné míry.

Při samotném měření bude nutné odebrat plastového krytu konektoru FAKRA na jednom z konců. Kryt je totiž rozměrově větší než průměr vnitřní koncentrické trubice a bez rozebrání konektoru by vzorek nemohl být protažen. Při přípravě vzorku je tedy výhodné odebrat kryt rovnou na straně odpláštění, což povede i k lepší manipulaci při řezu.

Postup přípravy vzorků pro měření metodou tube-in tube je následující:

1. V případě přípravy vzorku s konektorem FAKRA sundáme plastový kryt.
2. Pomocí upínacích svorek odměříme požadovanou vzdálenost k odpláštění od železného těla konektoru k hraně upínací svorky.



Obrázek 4.34: Odpláštěný vzorek s demontovaným krytem FAKRA vložený do upínací svorky.

3. Pomocí skalpelu provedeme na označeném místě odpláštění dle obrázku 4.34.
4. Pokud budeme měření účinnosti konektoru provádět bezprostředně, plastový kryt nemusíme nasazovat zpět.

4.5.3 Postup měření

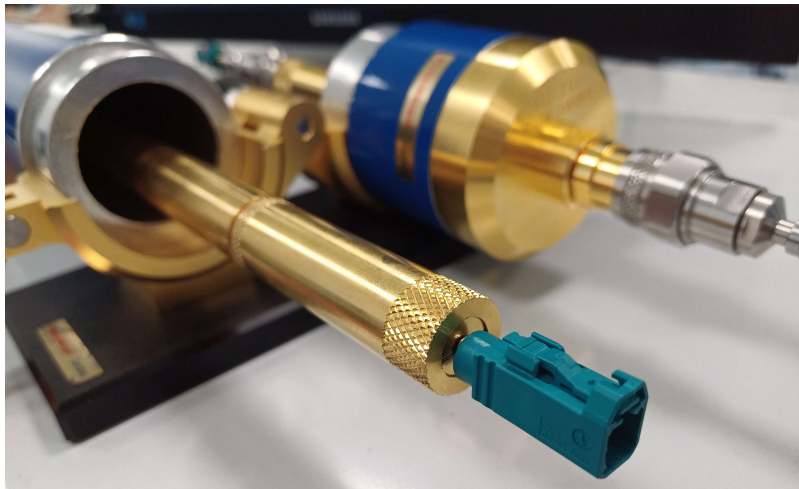
Postup měření účinnosti stínění konektoru je následující:

1. Z měřicí sady vyjmeleme požadovaný počet článků mosazné tyče jejichž spojením zhotovíme vnitřní koncentrickou trubici.
2. Podél trubice rovnoměrně rozmístíme distanční kruhy, aby bylo dosaženo co nejlepší koncentričnosti vnitřní a vnější trubice.
3. Distanční kruhy upevníme pomocí šroubů, které se nacházejí po obvodu.



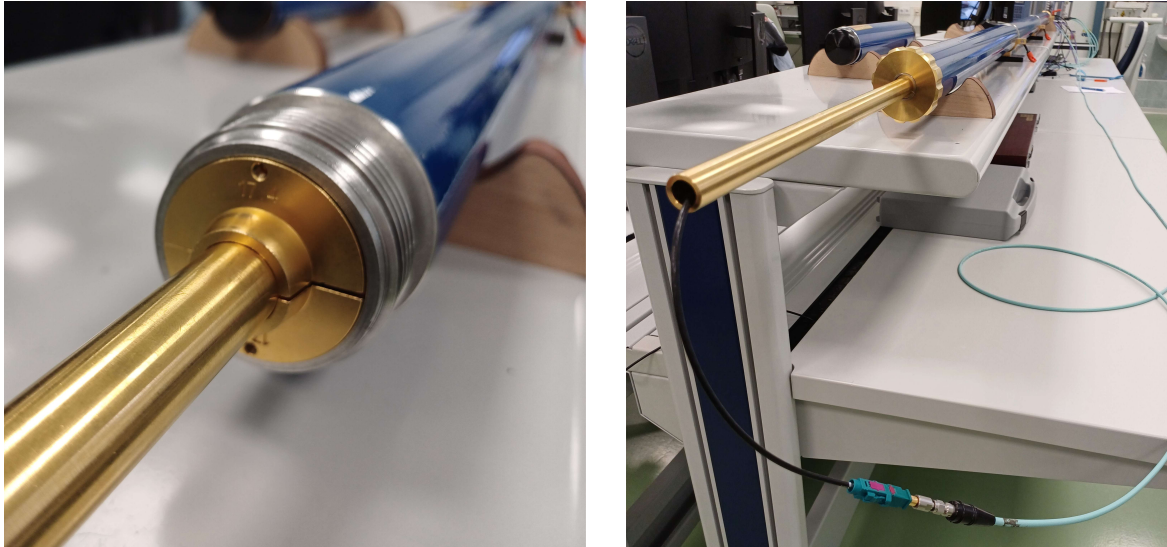
Obrázek 4.35: Přídavné vybavení pro měření metodou tube-in-tube. Vnitřní trubice s distančním kruhem je na obrázku vlevo a sada koncentrických tyčí vpravo.

4. Vnitřní trubici s distančními kruhy vsuneme do vnější trubice.
5. Pokud je plastový kryt u vzorků s konektory FAKRA nasazen, provedeme demontáž konektoru u konce kabelu, kde bylo provedeno odpláštění.
6. Zkušební vzorek protáhneme vnitřní trubicí.
7. Odpláštěnou část kabelu vložíme do svorek, které společně s kabelem provlečeme kontaktní čepičkou.



Obrázek 4.36: Upevněný kabel s konektorem FAKRA připravený k nakontaktování s měřicí hlaví.

8. Kontaktní čepičku upevníme na vnitřní trubicí dle obrázku 4.36.
9. Připojíme měřicí hlavici s vhodným adaptérem ke konektoru a nasuneme ji do trubice.
10. Na blízkém konci vložíme mezi vnitřní trubici svorky dle obrázku 4.37 vlevo.



Obrázek 4.37: Uspořádání na blízkém konci. Upevnění vnitřní trubice do svorek je na obrázku vlevo a následné připojení ke generátoru vpravo.

11. Na svorky vložíme prstenec a převlečnou matici, jako na obrázku 4.37 vpravo.
12. Ke kabelu na blízkém konci vnitřní trubice připojíme pomocí přívodních kabelů VNA bránu generátoru **1** a v případě potřeby použijeme adaptér. Pokud nemáme speciální **obuv pro práci s ESD**, použijeme **antistatický náramek**.
13. Vzdálený konec připojíme pomocí přívodních kabelů k VNA na přijímací bránu **2** stejně jako na obrázku 4.25. Opět je vyžadované použití antistatické ochrany.
14. Vyčkáme, než analyzátor zpracuje celý průběh.
15. Při exportu naměřeného průběhu jako *.csv* dbáme na správně zvolený oddělovací znak.
16. Při pojmenování souboru se budeme řídit stejnými doporučeními, jako v 4.4.3. Název souboru navíc upravíme aby bylo zřejmé, že bylo měření provedeno pomocí metody tube-in-tube, například **3m-TIT_3,5m_SMA_vzorek1_mereni3**.

5 Vyhodnocení výsledků měření

V této kapitole se nachází naměřené hodnoty útlumu stínění a jejich vyhodnocení. Měření probíhalo na opatřených vzorcích, jejichž parametry a označení je blíže popsáno v kapitole 4.1. Kromě vypočtených hodnot jsou ve výsledcích měření uvedené i náležití grafické reprezentace zkoumaných průběhů. Měření obecně probíhalo pro různé vazební soustavy a konektory, případně pro různá odpláštění či přesah vzorku vůči vazební soustavě.

5.1 Vyhodnocovací kritéria

Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny pomocí dvou kritérií, která vychází z definice útlumu stínění dle standardů IEC 62153-4 a koncernové specifikace LAH.V03.825.

5.1.1 Normativní standardy

Prvním kritériem odpovídá klasické definici pro vyhodnocení útlumu stínění dle standardů IEC 62153-4. To znamená, že se útlum stínění vyjadřuje jako maximální hodnota obalové křivky z naměřeného průběhu. Pro vyhodnocení jsou používány normalizované hodnoty, viz. kapitola 2.3.1. Protože se pojem *útlum stínění* či *efektivnost* ve standardech i specifikacích používá zaměnitelně pro obecnou a špičkovou hodnotu poměru dvou výkonů, bude v následujícím vyhodnocení použito označení a_{Sm} pro hodnotu špičkovou a a_S pro hodnotu obecnou. Špičková hodnota je dána pro celé měřené kmitočtové pásmo. Křivka vyznačující tuto hodnotu není v grafických závislostech pro přehlednost uvedena protože je hodnota a_{Sm} udána vždy v příslušné tabulce.

5.1.2 Limitní křivka

Jiné vyhodnocovací kritérium v podobě limitní křivky určuje například koncernová specifikace LAH.V03.825, která uvádí limitní hodnoty útlumu stínění a_S při měření metodou koncentrických trubek tube-in-tube (viz. kapitola 4.5) pro vysokofrekvenční konektory FAKRA s příslušným přívodním kabelem. Protože měření probíhalo na nízkoztrátovém kabelu N.909.934, byl k sestrojení limitní křivky použit druhý řádek tabulky 5.1. Limitní křivka je ve výsledcích potom aplikována na příslušné výsledky.

Tabulka 5.1: Tabulka útlumu stínění dle koncernové specifikace LAH.V03.825 (převzato z [19]).

Frequency range f	Shielding effectiveness a_S (dB)		Cable
	FAKRA 180° contact/connector	FAKRA 90° contact/connector	
30 MHz - 4 GHz	≤ -60 dB		N.909.934
4 GHz - 6 GHz	≤ -50 dB		
30 MHz - 4 GHz	≤ -45 dB		N.105.784
4 GHz - 6 GHz	≤ -40 dB		
30 MHz - 4 GHz	≤ -60 dB		N.108.223
4 GHz - 6 GHz	≤ -50 dB		
30 MHz - 3 GHz	≤ -38 dB		N.107.410

Jelikož se limitní křivka skládá ze dvou frekvenčních rozsahů, bude každý vyhodnocen zvlášť. Vyhodnocení má podobu hodnoty odstupu od limitní křivky, tzv. *margin*. Kladné hodnoty špičkové hodnoty a_{60} znamenají, že ve frekvenčním pásmu 30 MHz - 4 GHz je útlum stínění nižší než -60 dB, tedy vyhovuje limitu s rezervou. Záporné hodnoty pak vyjadřují, o kolik jednotek dB měřený konektor v tomto pásmu nevyhovuje. Podobně je vyhodnoceno pásmo 4 GHz - 6 GHz s limitní hodnotou -50 dB. Špičkové hodnoty útlumu stínění jsou zde označeny jako a_{50} .

5.1.3 Statistické vyhodnocení

K dalšímu vyhodnocení naměřených hodnot byly použity základní statistické funkce aritmetického průměru a rozptylu.

Variance σ^2 (též rozptyl) vzorku je definována dle rovnice (5.1):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}, \quad (5.1)$$

kde x_i ($-$) je hodnota v množině dat, \bar{x} ($-$) je průměr hodnot v množině dat a N je počet hodnot v množině dat.

Pro úplnost je aritmetický průměr \bar{x} dán rovnicí (5.2):

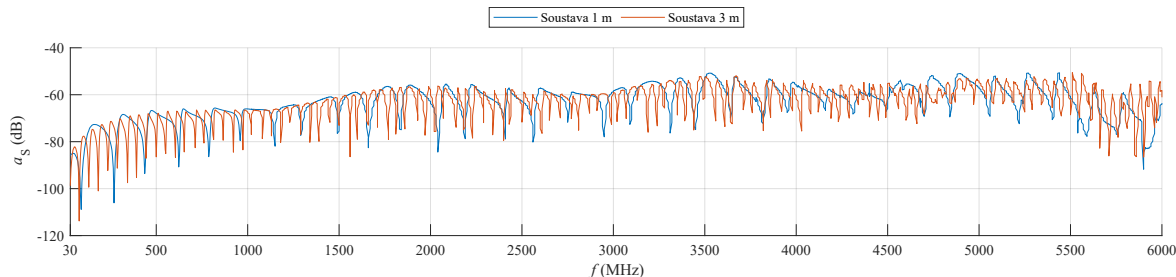
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}. \quad (5.2)$$

5.1.4 Ostatní parametry

Posledním parametrem pro vyhodnocení je rozsah a_r , který určuje celkový rozkmit hodnot daného měření. Jedná se o rozdíl maximální a minimální hodnoty obálek při opakovaném měření jednoho vzorku.

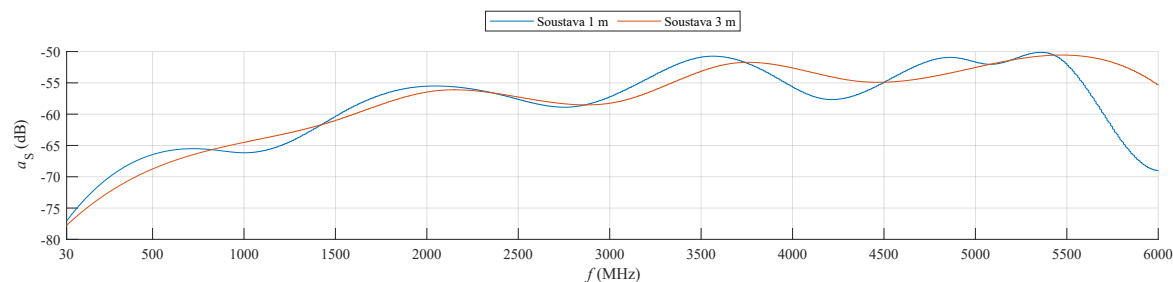
5.2 Interpretace výsledků

Změřené průběhy pomocí VNA mají po normalizačním přepočtu tvar dle obrázku 5.1, na kterém je zřejmý i počet zákmitů průběhu v závislosti na vazební soustavě.



Obrázek 5.1: Porovnání průběhů pro vazební soustavy o délce 1 m a 3 m.

Aby bylo možné změřené průběhy útlumu stínění přehledně graficky znázornit, jsou při dalším vyhodnocování použity obálkové křivky těchto průběhů jako na obrázku 5.2, kde jsou jasně viditelná maxima a minima naměřeného průběhu, tudíž je výhodné vyhodnocovat právě hodnoty obalové křivky.



Obrázek 5.2: Porovnání průběhů obálek pro vazební soustavy o délce 1 m a 3 m.

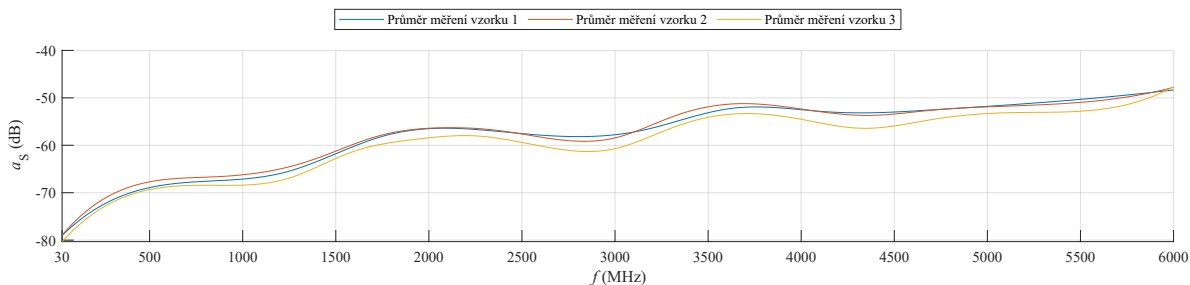
5.3 Měření útlumu stínění kabelů

Pro vyhodnocování měření útlumu stínění kabelů bylo použito kritérium dle IEC, viz. kapitola 5.1.1.

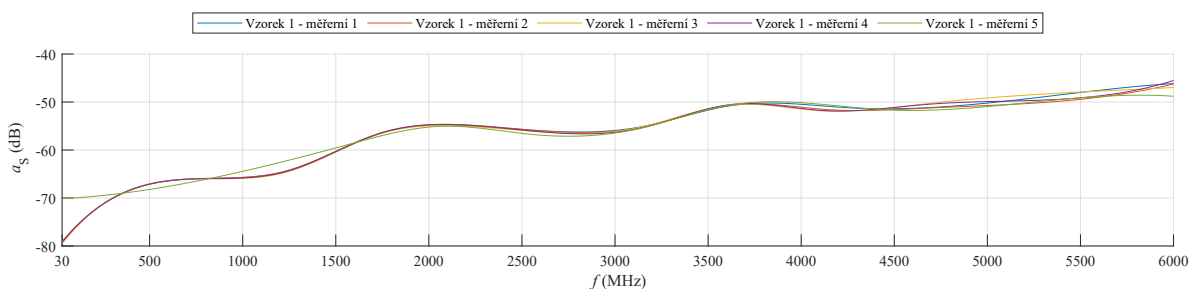
5.3.1 Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 1 m

Tabulka 5.2: Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m.

n	Vzorek 1 a_{S_m} (dB)	Vzorek 2 a_{S_m} (dB)	Vzorek 3 a_{S_m} (dB)
1	-46,1510	-50,2596	-50,9672
2	-54,2334	-44,5228	-50,2258
3	-46,9810	-44,1463	-50,7488
4	-45,5077	-49,9625	-49,0150
5	-48,5771	-49,9897	-49,0332
σ_n^2 (dB ²)	12,3591	9,9019	0,8629
\bar{x}_n (dB)	-48,2900	-47,7762	-49,9980
a_r (dB)	33,7105	32,5180	33,2031



Obrázek 5.3: Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkofrekvenčních kabelů N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m.



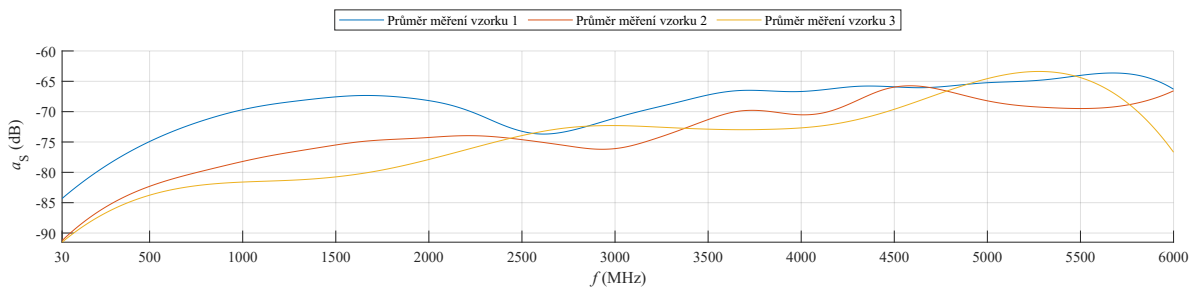
Obrázek 5.4: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkofrekvenčního kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m.

Obrázky 5.3 a 5.4 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze I.

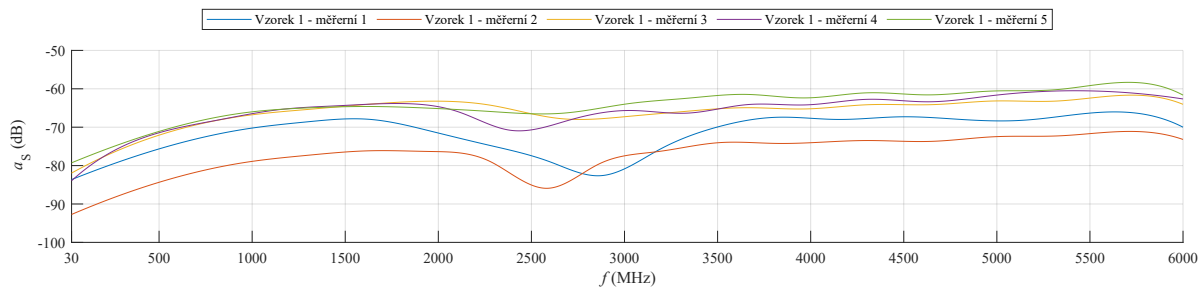
5.3.2 Měření s konektory SMA ve vazební soustavě 1 m

Tabulka 5.3: Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkofrekvenční kabely N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m.

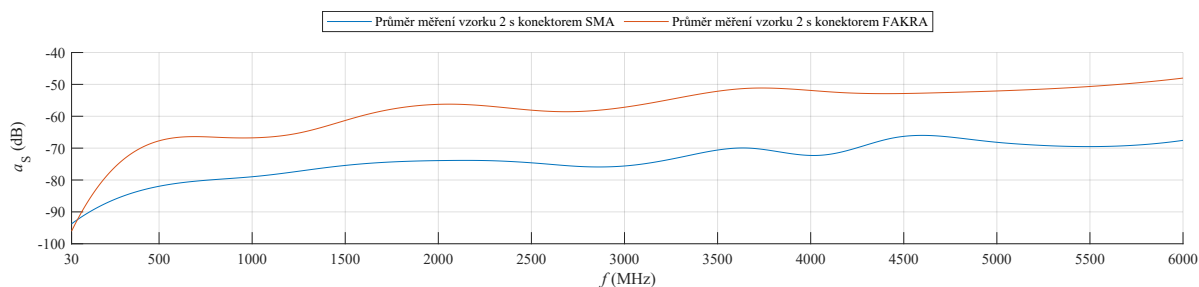
n	Vzorek 1 a_{S_m} (dB)	Vzorek 2 a_{S_m} (dB)	Vzorek 3 a_{S_m} (dB)
1	-66,0168	-67,9047	-61,1843
2	-63,1013	-67,3895	-64,7395
3	-61,6519	-63,0152	-63,1951
4	-60,5056	-60,1786	-63,4933
5	-58,3208	-66,1304	-61,6277
σ_n^2 (dB ²)	8,3016	10,6452	2,0930
\bar{x}_n (dB)	-61,9193	-64,9237	-62,8480
a_r (dB)	23,4518	32,4518	44,6023



Obrázek 5.5: Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkofrekvenčních kabelů N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m.



Obrázek 5.6: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m.



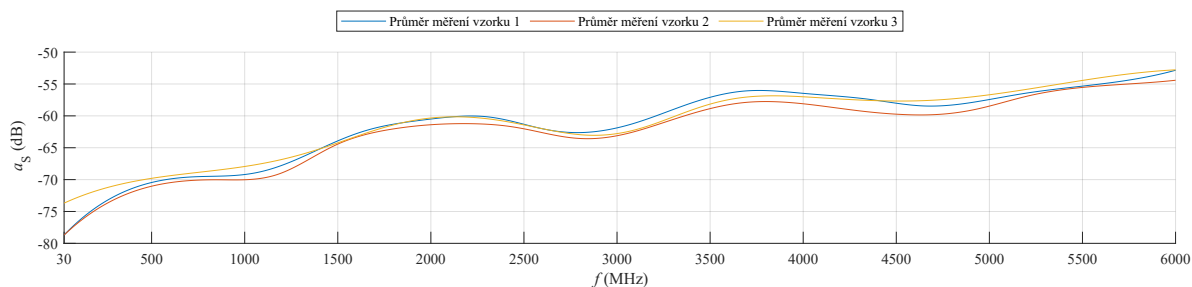
Obrázek 5.7: Porovnání průběhů obálek útlumu stínění průměrů měření vzorku 2 pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 1,5 m s konektory SMA a FAKRA ve vazební soustavě 1 m.

Obrázky 5.5 a 5.6 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze II.

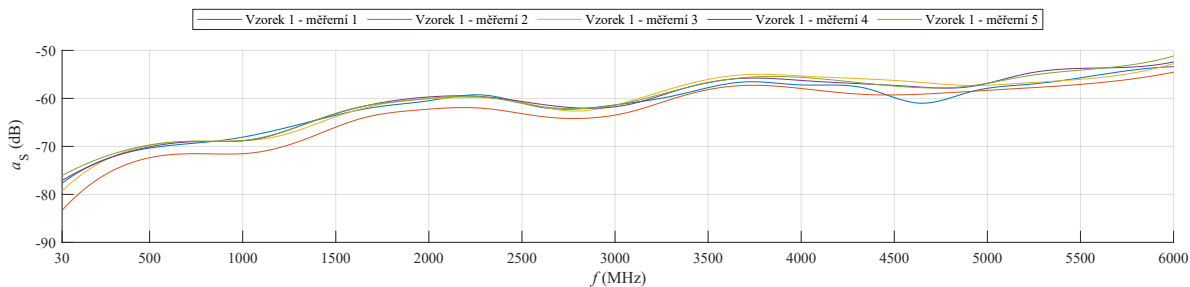
5.3.3 Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 3 m

Tabulka 5.4: Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m.

n	Vzorek 1 a_{S_m} (dB)	Vzorek 2 a_{S_m} (dB)	Vzorek 3 a_{S_m} (dB)
1	-53,3454	-55,0930	-56,1915
2	-54,5396	-55,3672	-51,8240
3	-52,7306	-54,5056	-53,6304
4	-52,3945	-52,8811	-51,6339
5	-51,1505	-53,3551	-52,4665
σ_n^2 (dB ²)	1,5522	1,1746	3,5015
\bar{x}_n (dB)	-52,8321	-54,4204	-53,1493
a_r (dB)	29,8944	26,9007	23,9007



Obrázek 5.8: Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkoztrátových kabelů N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m.



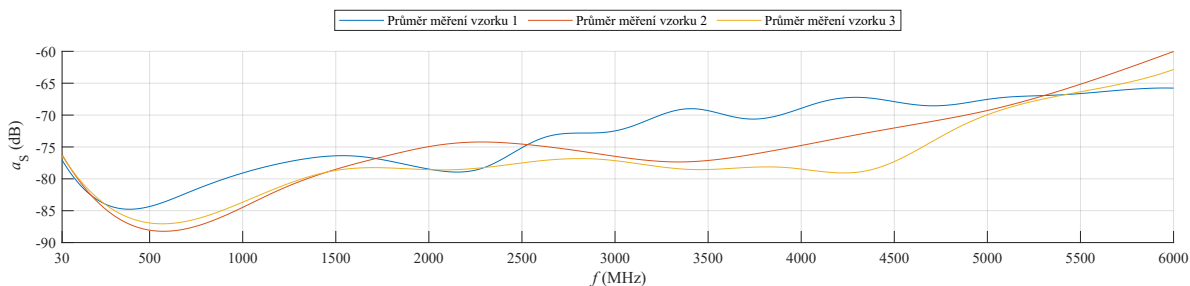
Obrázek 5.9: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m.

Obrázky 5.8 a 5.9 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze III.

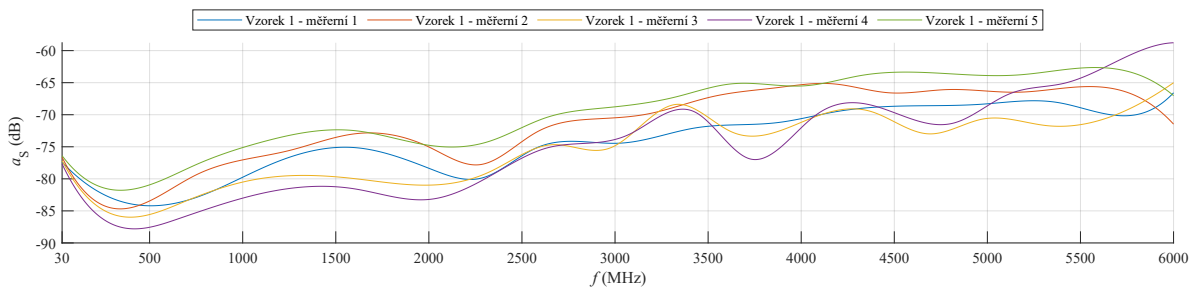
5.3.4 Měření s konektory SMA ve vazební soustavě 3 m

Tabulka 5.5: Naměřené a vypočítané hodnoty pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.

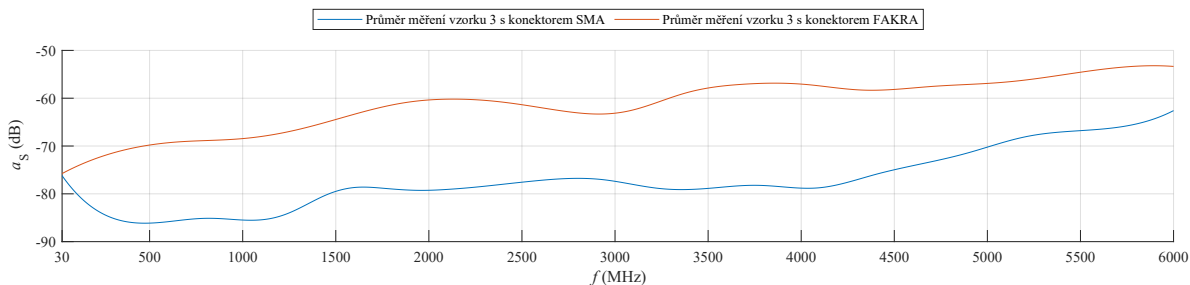
n	Vzorek 1 a_{S_m} (dB)	Vzorek 2 a_{S_m} (dB)	Vzorek 3 a_{S_m} (dB)
1	-66,7720	-54,7552	-59,0125
2	-73,1515	-61,8425	-64,1331
3	-65,0076	-59,5370	-63,3047
4	-58,7395	-62,8048	-63,3811
5	-62,7801	-61,1890	-64,2876
σ_n^2 (dB ²)	28,3219	10,0986	4,7312
\bar{x}_n (dB)	-65,2901	-60,0257	-62,8238
a_r (dB)	29,0756	31,3079	28,7428



Obrázek 5.10: Průběhy obálek průměrů útlumu stínění nízkoztrátových kabelů N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.



Obrázek 5.11: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.



Obrázek 5.12: Porovnání průběhů obálek útlumu stínění průměrů měření vzorku 3 pro nízkoztrátové kabely N.909.934 o délce 3,5 m s konektory SMA a FAKRA ve vazební soustavě 3 m.

Obrázky 5.10 a 5.11 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze IV.

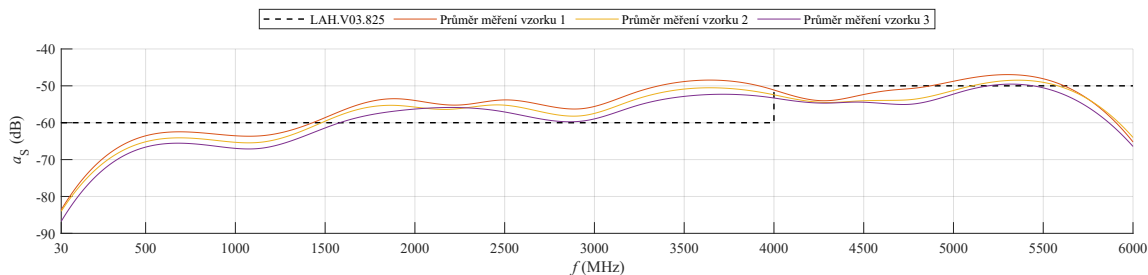
5.4 Měření útlumu stínění konektorů

Pro vyhodnocování měření útlumu stínění konektorů FAKRA byla použita kritéria dle IEC 62153-4, viz. kapitola 5.1.1 a LAH.V03.825, viz. kapitola 5.1.2. Pro vyhodnocení útlumu stínění konektorů SMA pak již pouze dle IEC 62153-4.

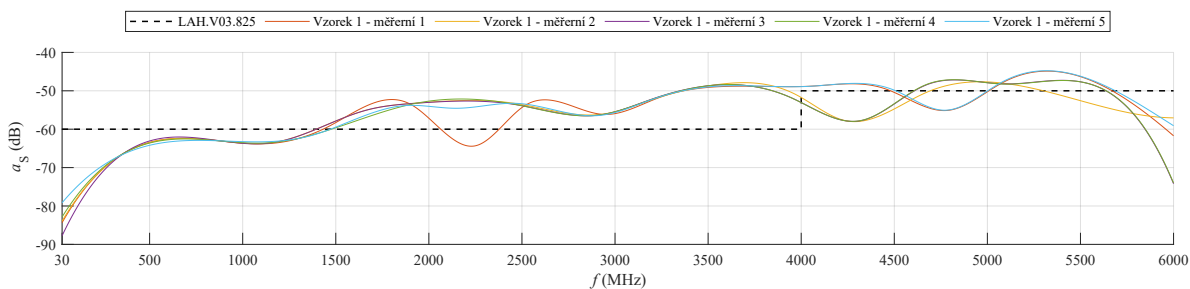
5.4.1 Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 0,5 m

Tabulka 5.6: Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m.

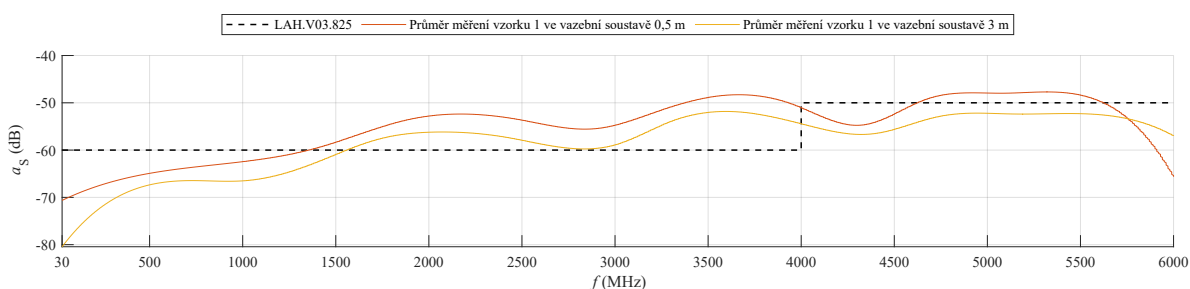
n	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)
1	-46,9756	-3,0244	-11,9418	-51,0944	1,0944	-6,0685	-51,8776	1,8776	-6,1738
2	-47,9689	-2,0311	-11,5628	-47,8736	-2,1264	-10,9730	-50,9055	0,9055	-5,9987
3	-45,6471	-4,3529	-11,3886	-49,2208	-0,7792	-10,4430	-48,0917	-1,9083	-11,4359
4	-45,4898	-4,5102	-11,3954	-48,5791	-1,4209	-10,6821	-47,7935	-2,1682	-12,2065
5	-47,0331	-2,9669	-12,0502	-49,3893	-0,6107	-10,3165	-52,2325	2,2325	-5,7984
σ_n^2 (dB ²)	1,0851	1,0851	0,0961	1,4412	1,4412	4,1762	4,4193	4,3739	10,2916
\bar{x}_n (dB)	-46,6229	-3,3771	-11,667	-49,2314	-0,7686	-9,6966	-50,1802	0,1878	-8,3226
a_r (dB)		30,0798			24,1698			26,5110	



Obrázek 5.13: Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m.



Obrázek 5.14: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m.



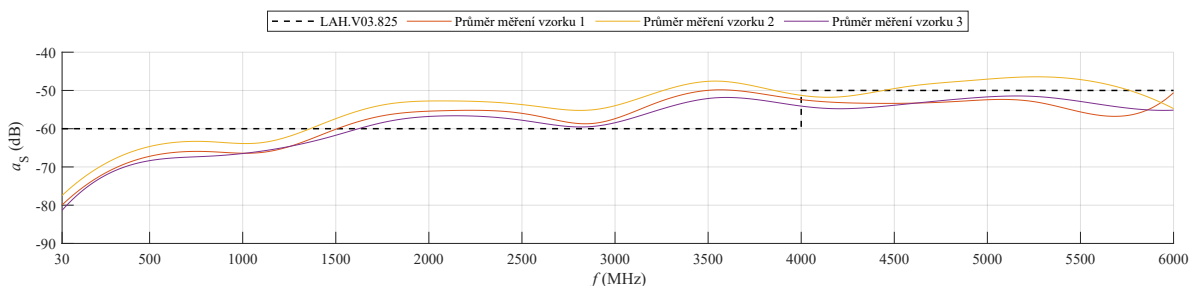
Obrázek 5.15: Porovnání průběhů obálek útlumu stínění průměrů měření vzorku 1 pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m a 3 m.

Obrázky 5.13 a 5.14 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze V.

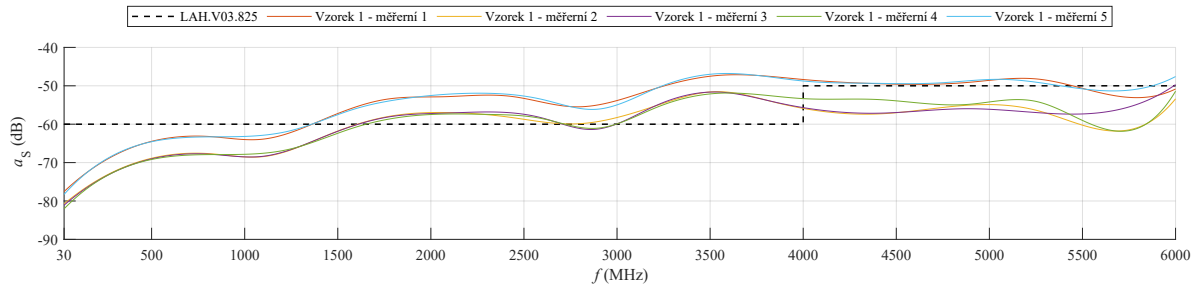
5.4.2 Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 1 m

Tabulka 5.7: Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m.

n	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)
1	-46,9491	-1,9276	-13,0509	-45,7579	-4,2421	-13,7887	-53,1604	3,1604	-4,8530
2	-51,4974	-4,7350	-8,5026	-45,8718	-4,1282	-13,1482	-48,9545	-0,3209	-11,0455
3	-49,3038	-0,6962	-8,4635	-49,4624	-0,5376	-9,3251	-45,4929	4,5071	-7,9304
4	-51,6206	2,2797	-8,3794	-45,4634	-4,5366	-14,1596	-48,6009	1,3991	-10,8071
5	-46,6396	2,5999	-13,3604	-45,1262	-4,8738	-13,5118	-52,2387	-2,2387	-6,8883
σ_n^2 (dB ²)	5,6926	9,3369	6,8031	3,1373	3,1373	3,8819	9,4706	7,2265	6,9587
\bar{x}_n (dB)	-49,2021	-0,4958	-10,3514	-46,3363	-3,6637	-12,7867	-49,6895	1,3014	-8,3049
α_T (dB)		31,2651			28,6394			34,1124	



Obrázek 5.16: Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m.

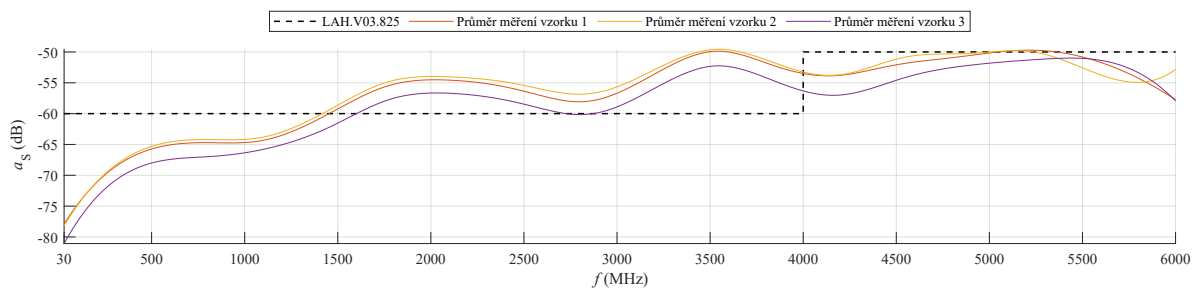


Obrázek 5.17: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m.

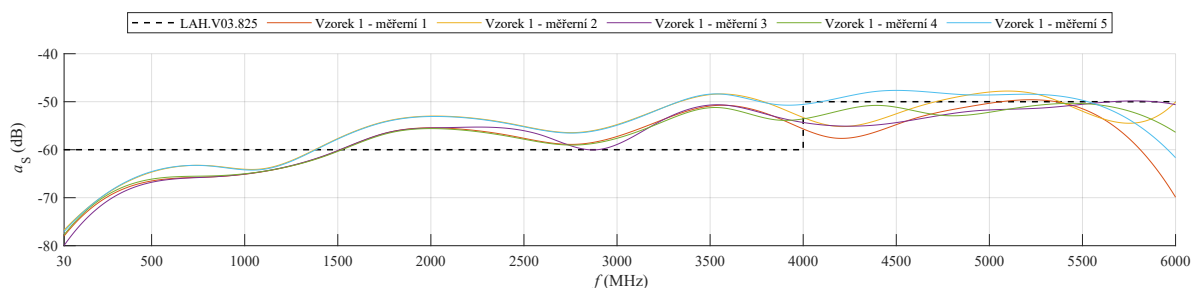
Obrázky 5.16 a 5.17 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze VI.

Tabulka 5.8: Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m.

n	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)
1	-49,4201	0,5799	-9,2358	-48,9141	0,9240	-11,0859	-53,5459	3,5459	-3,2863
2	-48,3004	-1,6996	-11,6159	-49,2656	-0,7344	-10,4847	-52,0580	2,0580	-5,9651
3	-49,4081	-0,5919	-9,4183	-48,5133	-1,4639	-11,4867	-44,3359	-5,6641	-11,0998
4	-49,9859	-0,0080	-10,0141	-48,6079	1,0266	-11,3921	-50,2289	0,2289	-7,9561
5	-46,7114	3,1873	-13,2886	-49,2222	-0,3260	-10,7778	-45,9112	4,0888	-11,4237
σ_n^2 (dB ²)	1,6916	3,3258	2,9490	0,1181	1,1576	0,1756	15,6469	15,5090	11,9196
\bar{x}_n (dB)	-48,7652	0,2936	-10,7146	-48,9046	-0,1148	-11,0455	-49,2160	0,8515	-7,9462
a_r (dB)		21,6399			20,6382			31,8802	



Obrázek 5.18: Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m.

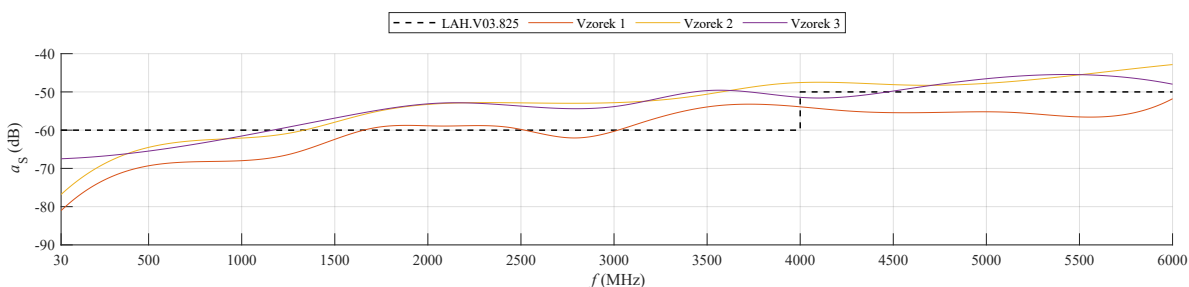
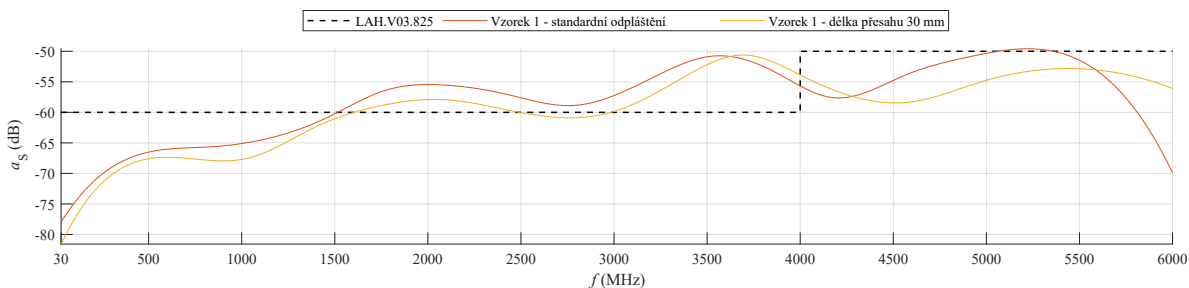


Obrázek 5.19: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m.

Obrázky 5.18 a 5.19 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze VII.

Tabulka 5.9: Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m s různou délkou přesahu odpláštění l .

l (mm)	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)
1	-46,9470	-2,8533	-13,0530	-47,0390	-2,9610	-12,8131	-46,7972	-3,2028	-12,6301
5	-46,5779	-3,0404	-13,4221	-44,1703	-5,8297	-11,9187	-46,8884	-3,1116	-12,7908
10	-52,2788	2,2788	-6,5109	-42,8487	-7,1513	-12,4423	-45,4498	-4,5502	-10,4446
20	-58,3266	8,3266	-0,8754	-44,9388	-5,0612	-11,6906	-52,2359	3,0038	-7,7641
30	-50,4833	1,9953	-9,5167	-46,4941	-1,9245	-13,5059	-45,0925	-4,9075	-9,2688
σ_1^2 (dB ²)	22,8831	21,7235	26,9820	2,9155	4,5194	0,5257	8,2704	10,2862	4,6894
a_r (dB)		31,0175			33,9746			32,4686	

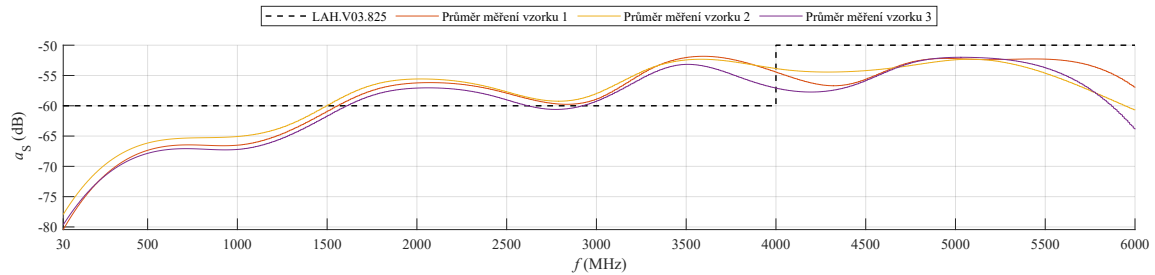
**Obrázek 5.20:** Průběhy obálek útlumu stínění konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m s délkou přesahu odpláštění 10 mm.**Obrázek 5.21:** Průběhy obálek útlumu stínění konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m se standardní délkou odpláštění a délkou přesahu odpláštění 30 mm.

Obrázky 5.20 a 5.21 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy jsou v přílohách VIII a IX.

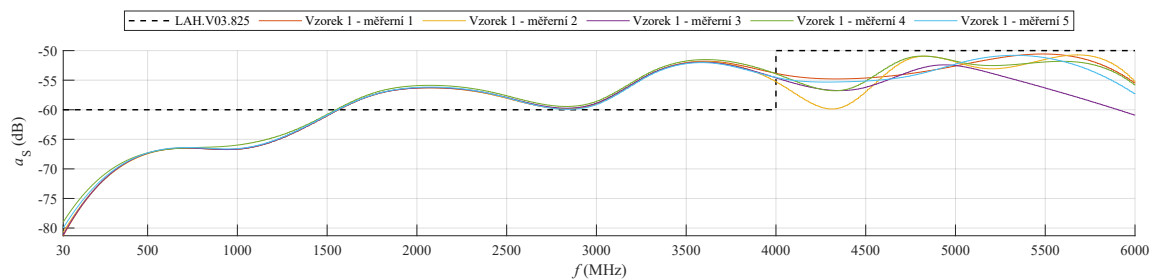
5.4.3 Měření s konektory FAKRA ve vazební soustavě 3 m

Tabulka 5.10: Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.

n	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3		
	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)	a_{S_m} (dB)	a_{50} (dB)	a_{60} (dB)
1	-50,5589	0,5589	-8,1643	-49,7778	0,1425	-10,2222	-52,8657	2,8657	-5,8820
2	-50,8284	0,8284	-8,1945	-54,7212	5,7562	-5,2788	-48,0770	-1,9230	-10,5995
3	-52,0242	2,1100	-7,9758	-50,2977	0,2977	-8,2456	-51,7184	1,7184	-6,3412
4	-51,3787	1,3787	-8,4965	-50,1140	0,1773	-9,8860	-52,7043	2,7043	-6,4833
5	-50,7801	0,7801	-7,8666	-54,5718	4,7839	-5,4282	-50,9040	0,9040	-5,7440
σ_n^2 (dB ²)	0,3499	0,3904	0,0581	6,3396	7,8153	5,5995	3,7832	3,7832	4,1210
\bar{x}_n (dB)	-51,1141	1,1312	-8,1395	-51,8965	2,2315	-7,8122	-51,2539	1,2539	-7,0100
a_r (dB)		29,1683			32,9498			30,1162	



Obrázek 5.22: Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.



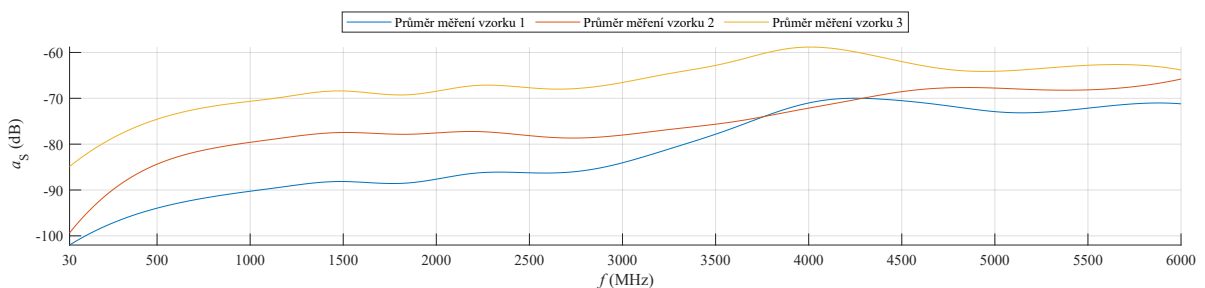
Obrázek 5.23: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.

Obrázky 5.22 a 5.23 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze X.

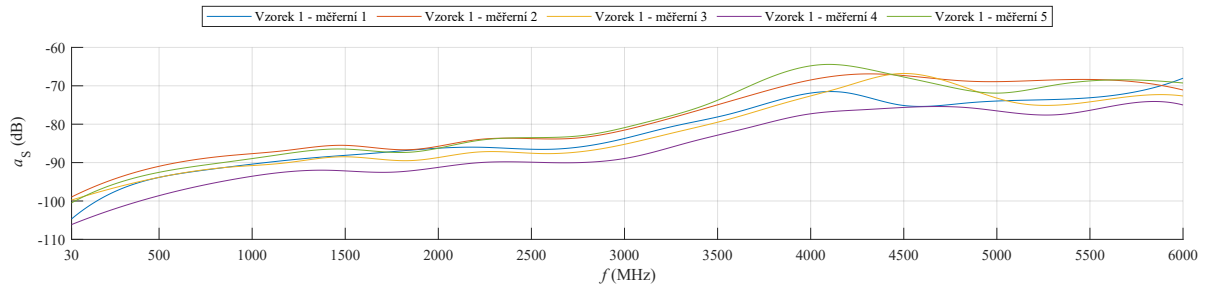
5.4.4 Měření s konektory SMA ve vazební soustavě 3 m

Tabulka 5.11: Naměřené a vypočítané hodnoty pro konektory SMA s kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.

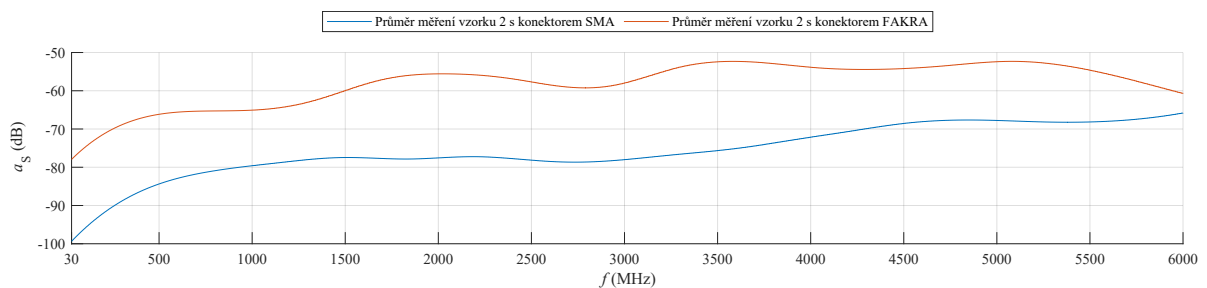
n	Vzorek 1 a_{S_m} (dB)	Vzorek 2 a_{S_m} (dB)	Vzorek 3 a_{S_m} (dB)
1	-63,8534	-62,2752	-62,7307
2	-66,9119	-62,6643	-57,6304
3	-66,8047	-70,4578	-58,2543
4	-74,7186	-67,2808	-55,4421
5	-62,0823	-70,1354	-57,5471
σ_n^2 (dB ²)	23,4071	15,5080	7,2035
\bar{x}_n (dB)	-66,8742	-66,5627	-58,3209
a_r (dB)	38,2184	36,6808	30,5111



Obrázek 5.24: Průběhy obálek útlumu stínění průměrů měření konektorů SMA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.



Obrázek 5.25: Průběhy obálek útlumu stínění pro opakovaná měření konektorů SMA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.



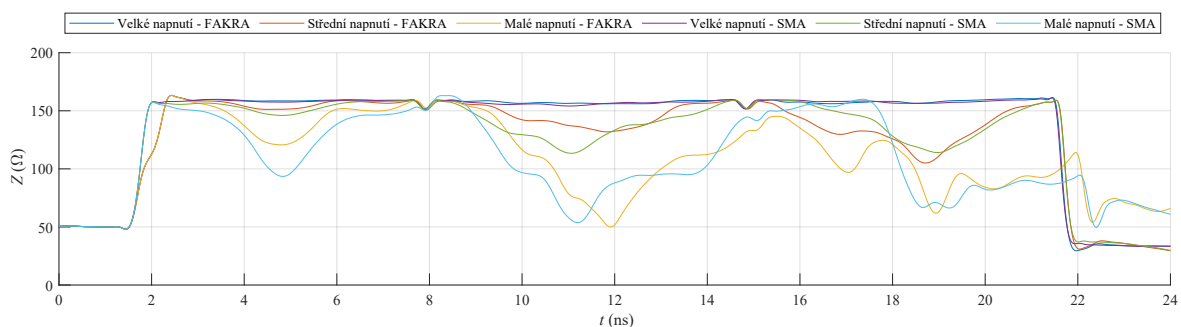
Obrázek 5.26: Porovnání průběhů obálek průměrů měření vzorku 2 pro konektory SMA a FAKRA s nízkoztrátovými kabely N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m.

Obrázky 5.24 a 5.25 jsou ukázkou naměřených dat. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze XI.

5.5 Možná vylepšení zkušební postupu

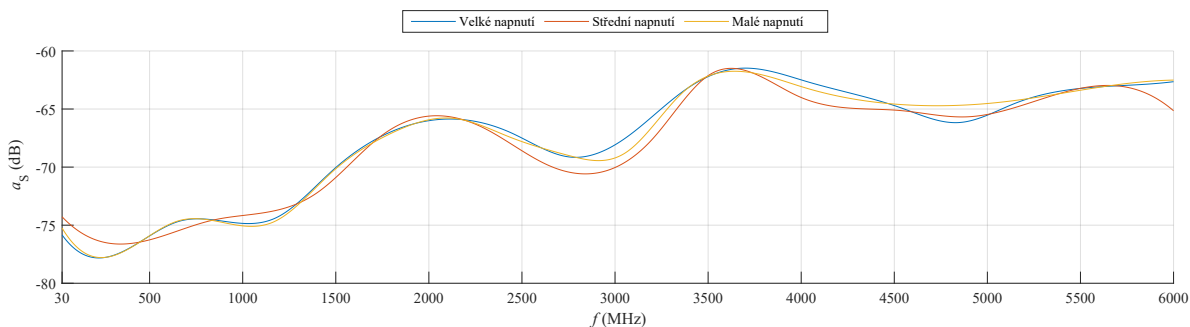
5.5.1 Měření reflektometrem

Pro určení možného vylepšení zkušební postupu bylo provedeno několik měření pomocí reflektometru v časové oblasti, který je implementovaný v používaném VNA. Pro následné porovnání útlumu stínění kabelů s konektory SMA a FAKRA bylo nutné dodržet stejnou míru velkého, středního a nízkého napnutí. To lze zajistit uložením průběhů do paměti a při měření porovnávat průběhy v časové oblasti, podobně jako na obrázku 5.27.

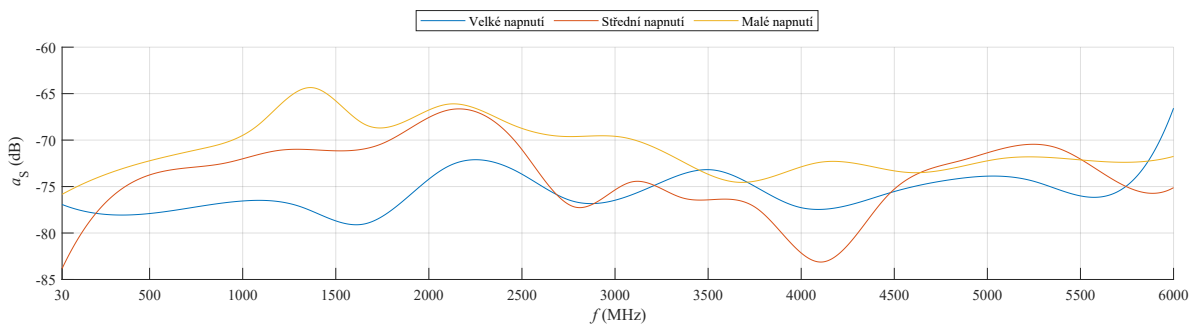


Obrázek 5.27: Porovnání průběhů TDR při různém napnutí kabelu s konektory SMA a FAKRA.

Po dosažení požadovaného napnutí byl změřen útlumu stínění těchto kabelů, jehož průběhy jsou na obrázcích 5.28 a 5.29. Ostatní průběhy lze nalézt v příloze XII.



Obrázek 5.28: Průběhy obálek měření při různém napnutí nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m.



Obrázek 5.29: Průběhy obálek měření při různém napnutí nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m.

5.5.2 Použití paměti při měření

Při měření je výhodné provést uložení referenčního průběhu do paměti VNA. Vlivem nedokonalého vložení zkušební vzorku do zkušební uspořádání se může měřený průběh výrazně lišit od předchozího měření. To se projevuje výrazným vertikálním odsazením od ostatních průběhů. Při opakovaném měření je tedy pomocí uložení referenčního průběhu možné provést případnou korekci.

6 Závěr

V závěru práce jsou shrnuty výsledky měření a výpočtů z kapitoly 5.

6.1 Měření útlumu stínění kabelů

Průběhy obálek útlumu stínění pro kabely s konektory FAKRA jsou velmi stálé. Opakovaná měření v rámci jednoho vzorku se téměř neliší, podobně je tomu i při porovnání průměrů měření všech vzorků. Toto chování lze pozorovat v obou vazebních soustavách 1 m a 3 m. Obálky průběhů obecně dosahují nižšího rozptylu špičkové hodnoty útlumu stínění a_{S_m} . Hodnoty rozsahů průběhu a_r jsou v rámci vazební soustavy 1 m velmi stálé, ve vazební soustavě 3 m se již mírně liší.

Průběhy obálek útlumu stínění pro kabely s konektory SMA se naopak značně odlišují a dosahují obecně vyšších hodnot rozptylu špičkové hodnoty útlumu stínění a_{S_m} než u kabelů s konektory FAKRA. Odlišnost obálek útlumu stínění a_S je zřejmá v rámci jednoho vzorku i při porovnání průměrů měření všech vzorků ve vazebních soustavách 1 m a 3 m. Lze pozorovat i odlišnost průběhů obálek útlumu stínění a_S při porovnání měření kabelů s konektory SMA a FAKRA, které mají v kmitočtovém rozsahu 500 MHz - 6 GHz odstup téměř 20 dB. Možné zdůvodnění tohoto chování je použití redukce FAKRA - SMA.

Z průběhů vyplývá, že strojová výroba konektorů FAKRA je nesrovnatelně lepší v porovnání s manuálně nalisovanými konektory SMA, kde jsou průběhy velmi nestálé.

6.2 Měření útlumu stínění konektorů

Z hlediska stálosti průběhů a statistického vyhodnocení jsou výsledky měření útlumu stínění a_S konektorů velmi podobné jako u měření útlumu stínění kabelů.

Limitní křivku dle LAH.V03.825 určenou pro konektory FAKRA se nepodařilo pro limitní hodnotu -60 dB v kmitočtovém rozsahu 30 MHz - 4 GHz splnit u žádného z měřených vzorků. Odstupy nad limitní křivkou se v tomto pásmu pohybují od 5 dB do 15 dB.

V pásmu 4 GHz - 6 GHz je kritérium pro limitní hodnotu -50 dB splněno pro výrazně více jednotlivých měření, ovšem pro průměrné průběhy ze všech měření je limitní křivka v tomto pásmu splněna pouze pro měření ve vazební soustavě 3 m s přívodním kabelem dlouhým 3,5 m. Zde se odsazení od limitní křivky pohybuje od 1 dB a výše. U ostatních křivek je vychýlení od limitní křivky v případě nesplnění limitu až -5 dB. Tato hodnota je v porovnání odstupů v pásmu limity 30 MHz - 4 GHz výrazně menší. Důvodem nesplnění limitních požadavků může být samotné zpracování vzorků s konektory FAKRA.

Porovnáním průběhů pro délku odpláštění lze usoudit, že větší délka odpláštění při měření metodou koncentrických trubek nemá na měření znatelný vliv. Ke stejnému závěru lze dojít při porovnání průběhů pro měření s přívodním kabelem, jehož přesah je větší, než dovoluje norma, tj. 0,5 m. Měření ve vazební soustavě 1 m s přívodním kabelem dlouhým 3,5 m se nijak výrazně neliší od ostatních průběhů, kde byla míra přesahu dodržena.

6.3 Reflektometrie a nejistota měření

Výsledky měření pomocí reflektometrie v časové oblasti ukazují, že při různých mírách napnutí se průběhy útlumu stínění a_S kabelů s konektory FAKRA nijak zásadně neliší. Změna je ovšem znatelná na průbězích s konektory SMA. U velkého napnutí jsou zřejmé obecně menší hodnoty a stálost obáلكové křivky, u malého napnutí je tomu naopak. Kontrolu napnutí pomocí reflektometru by tedy bylo výhodné používat hlavně pro kabely s konektory SMA.

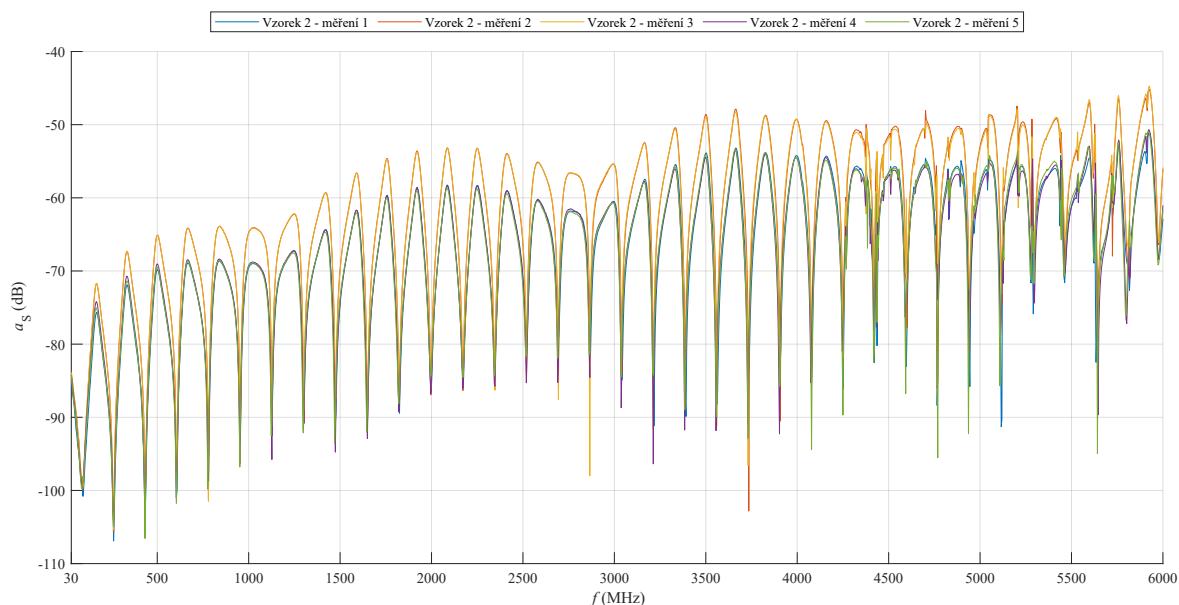
Protože bylo provedeno pět měření u každého vzorku, mohl by se dále z naměřených dat provést výpočet nejistoty měření a v podstatě tak určit dvě limitní obáلكové křivky pro každý z průběhů. V tomto případě by se jednalo o nejistotu typu A, která vychází z několikanásobného počtu měření. Dále by tento výsledek bylo možné porovnat s předepsanou nejistotou měření používanou ve zkušební laboratoři.

Seznam použité literatury

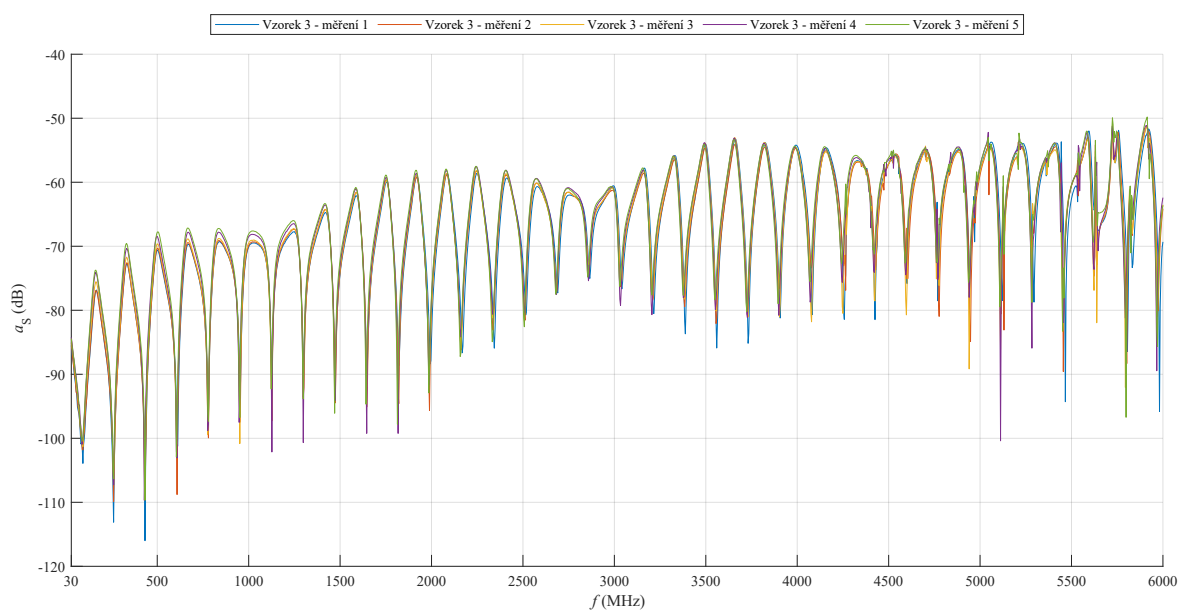
- [1] Václav Kůs, Jiří Skála a Jiří Hammerbauer. *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. Praha: BEN, 2013.
- [2] Jiří Svačina. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Brno: Vysoké učení technické, Ústav radioelektroniky, 2001.
- [3] Jeremy Tatum. *Impedance*. URL: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Physical_Optics_\(Tatum\)/02%3A_Reflection_and_Transmission_at_Boundaries_and_the_Fresnel_Equations/2.05%3A_Impedance](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Physical_Optics_(Tatum)/02%3A_Reflection_and_Transmission_at_Boundaries_and_the_Fresnel_Equations/2.05%3A_Impedance) (cit. 27.02.2024).
- [4] Jiří Dřínovský et al. *Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky ver. 2017/10/06*. Brno: Vysoké učení technické, Ústav radioelektroniky, 2017.
- [5] ČSN EN IEC 62153-4-7 (34 7003). *Zkušební metody metalických komunikačních kabelů a jiných pasivních komponentů, Část 4-7: Elektromagnetická kompatibilita EMC - Zkušební metoda pro měření přenosové impedance, útlumu stínění nebo vazebního útlumu konektorů a sestav - Triaxiální metoda koncentrických trubek*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha, 2022.
- [6] Balint T. Szentkuti. „Shielding quality of cables and connectors: some basics for better understanding of test methods“. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility 17-21 August (1992)*, s. 296.
- [7] ČSN EN 50289-1-6 (34 7819). *Komunikační kabely - Specifikace zkušebních metod, Část 1.6: Elektrické zkušební metody - Elektromagnetické vlastnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha, 2014.
- [8] EMI Software. *How to Select Cable Shielding for Electromagnetic compatibility - Part 3*. URL: <https://www.emissoftware.com/blogs/select-cable-shield-ing-electromagnetic-compatibility-3/> (cit. 29.02.2024).
- [9] Bernhard Mund. „Measuring the EMC on RF-connectors and connecting hardware. Tube in tube test procedure“. In: *International Wire & Cable Symposium 53rd IWCS/-Focus (1995)*, s. 397.
- [10] Bernhard Mund. *Screening attenuation*. bedea Berkenhoff & Drebes GmbH. Asslar, 2008.
- [11] Bernhard Mund. *Screening attenuation - Triaxial method according to IEC 62153-4-4 Ed.2*. bedea Berkenhoff & Drebes GmbH. Asslar, 2015.
- [12] B. Mund a T. Hähner. „Test methods for screening and balance of communication cables“. In: *EMC Zurich 10004 (1999)*, s. 354.
- [13] Bernhard Mund a Christian Pfeiler. „Balunless measurement of coupling attenuation of screened balanced cables up to 2 GHz“. In: *International Wire & Cable Symposium Proceedings of the 64th IWCS Conference (1999)*, s. 354.

-
- [14] Bernhard Mund, Thomas Hähner a Thomas Schmid. „Screening effectiveness of unscreened balanced pairs“. In: *Proc. of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility* September 02–06 (2019), s. 638.
- [15] ČSN EN IEC 62153-4-7 (34 7003). *Zkušební metody metalických komunikačních kabelů, Část 4-7: Elektromagnetická kompatibilita EMC - Zkušební metoda pro měření přenosové impedance, útlumu stínění nebo vazebního útlumu s triaxiálními články*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha, 2022.
- [16] Otto Breitenbach, Thomas Hähner a Bernhard Mund. *Screening of cables in the MHz to GHz frequency range extended application of a simple measuring method*. The Institution of Electrical Engineers. Savoy Place, London, 1998.
- [17] Kirkby Microwave Ltd. *What are the calibration kit coefficients?* URL: <https://www.kirkbymicrowave.co.uk/Support/What-are-the-calibration-kit-coefficients/> (cit. 29.04.2024).
- [18] Rohde & Schwarz. *Vector network analyzer accessories*. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/vna-accessories_231228.html#image200_60141 (cit. 21.04.2024).
- [19] Wolfgang Vei. *Component Performance Specification for Cables*. Volkswagen. 38436 Wolfsburg, Germany, 2016.
- [20] Anritsu. *Understanding VNA Calibration*. URL: https://anlage.umd.edu/Anritsu_understanding-vna-calibration.pdf (cit. 01.05.2024).
- [21] Rohde & Schwarz. *Whitepaper - Vector Analyzer (VNA) Calibration: The Basics*. URL: https://pchene.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/08/vna_calibration.pdf (cit. 01.05.2024).
- [22] Bernhard Mund. „EMC of cables & connectors with Triaxial test procedure“. In: *International Wire & Cable Symposium 68th IWCS Conference* (2019), s. 15.
- [23] Bernhard Mund. *Measuring of Transfer impedance and Screening or Coupling attenuation with the CoMeT system*. bedea Berkenhoff & Drebes GmbH. Asslar, 2018.
- [24] Bernhard Mund. *Transfer impedance - Triaxial method according to IEC 62153-4-3 Ed.2*. bedea Berkenhoff & Drebes GmbH. Asslar, 2013.
- [25] EMA 3D. *Transfer impedance measurement*. URL: <https://www.ema3d.com/testing-services-transfer-impedance-measurement-testing-of-cables/transfer-impedance-triaxial-measurement-featured-image/> (cit. 21.04.2024).
- [26] Paul Kish a Belden. „Coupling Attenuation Measurements for Cables & Channels“. In: *Contribution to IEEE 802.3bp* May (1995), s. 7–9.
- [27] Strasser. *GG CoSpeed-5031/9*. Gebauer & Griller. A-1190 Vienna, Austria, 2021.

Příloha I

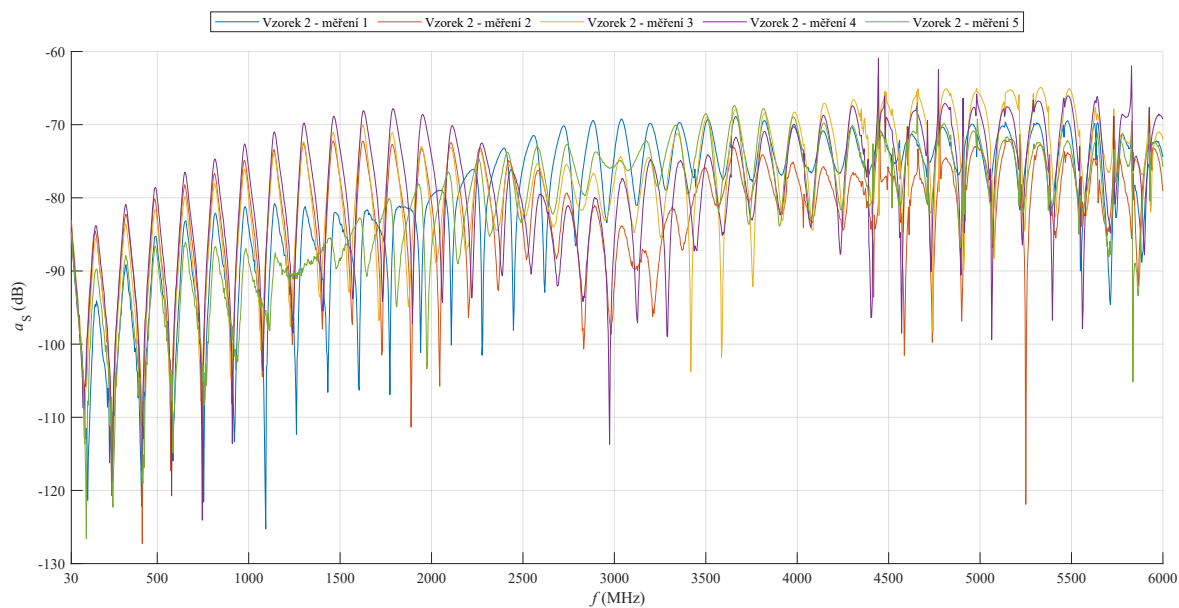


Obrázek 6.1: Průběhy útlumu stínění pro kabel nízkoztrátový N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.

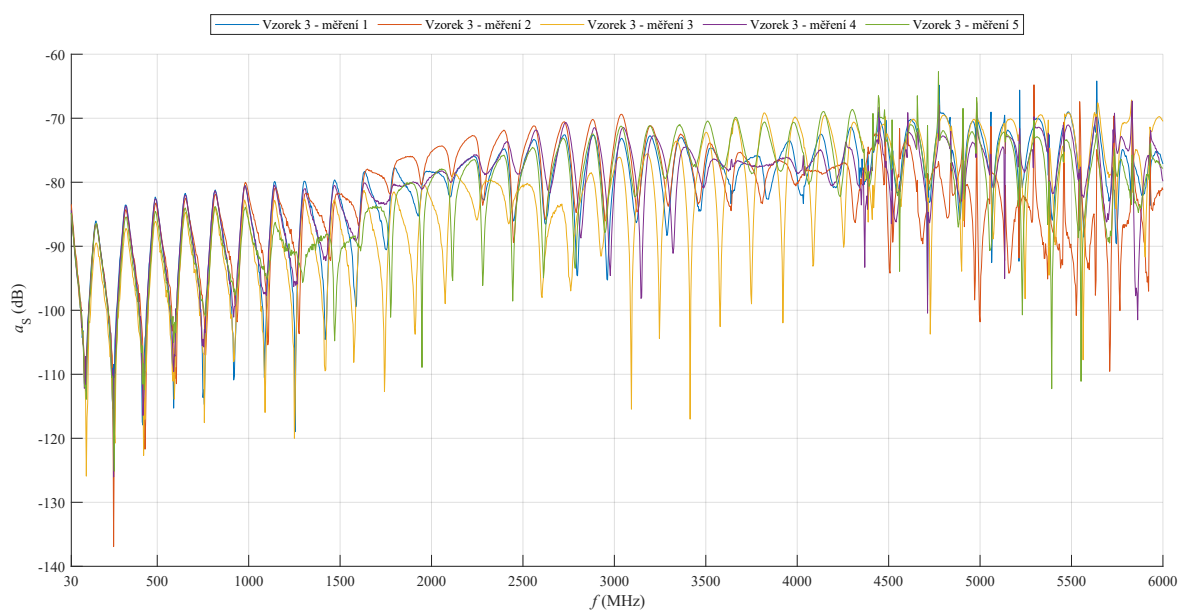


Obrázek 6.2: Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.

Příloha II

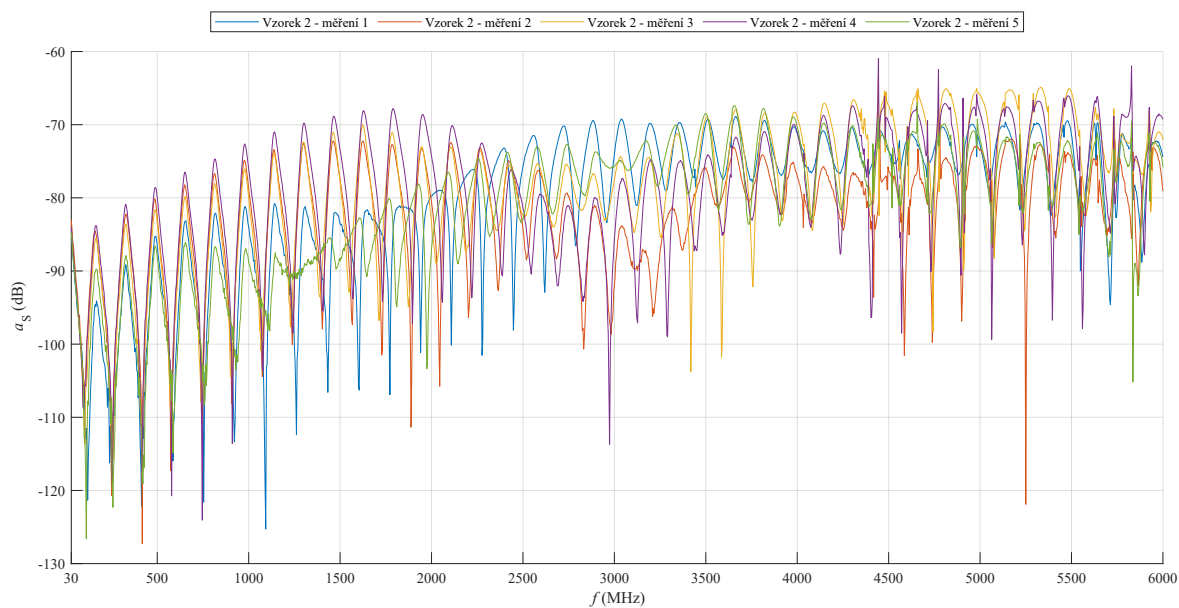


Obrázek 6.3: Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.

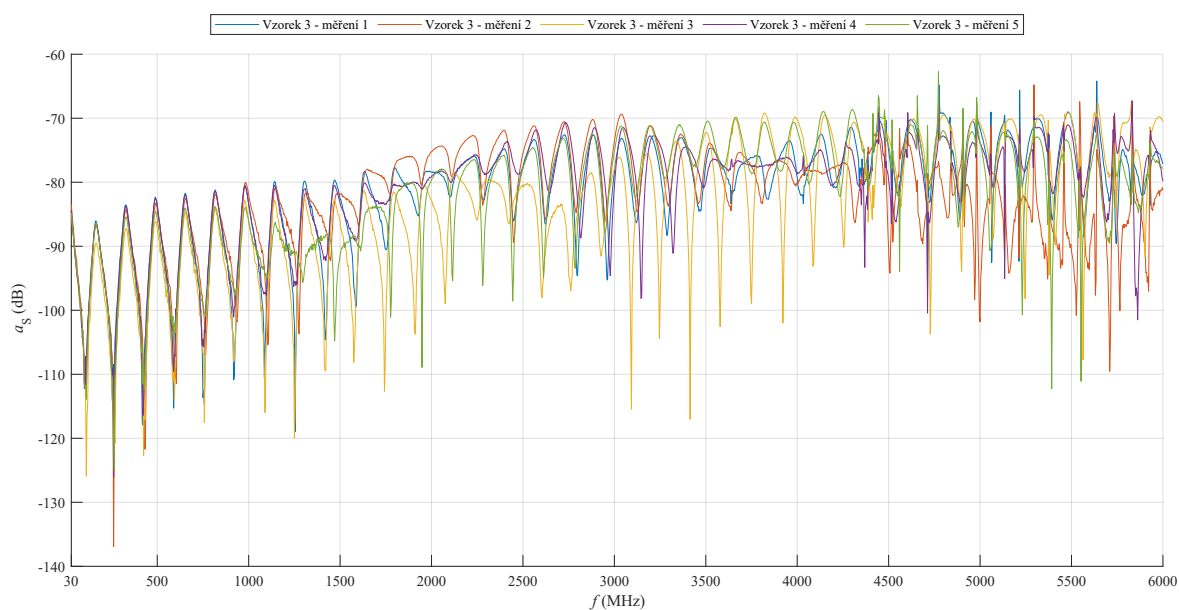


Obrázek 6.4: Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 1,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.

Příloha III

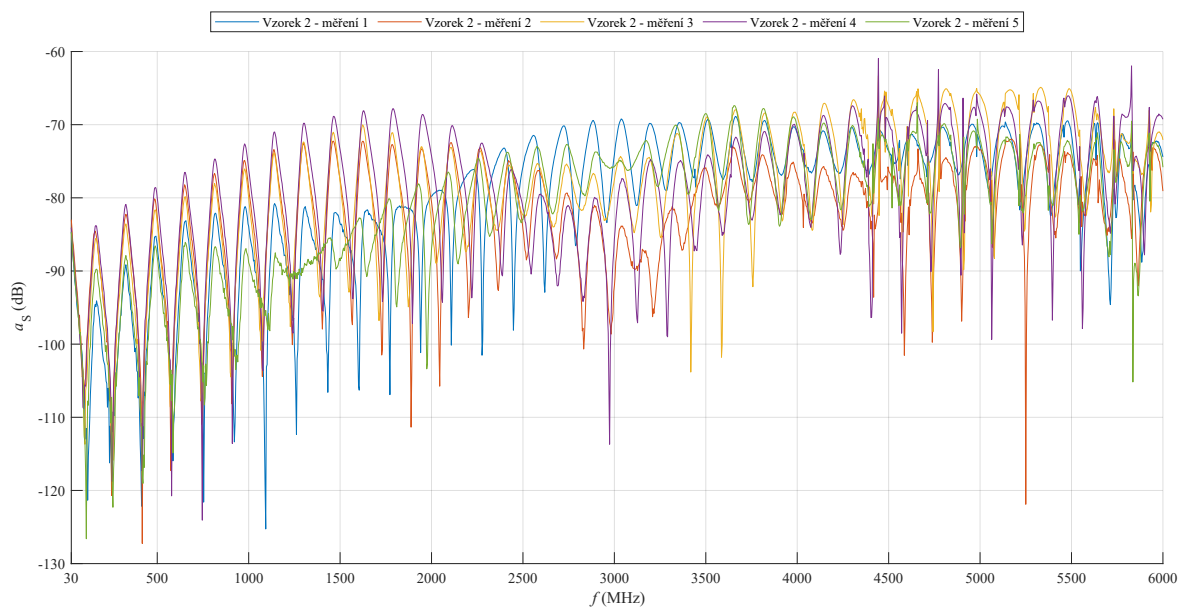


Obrázek 6.5: Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.

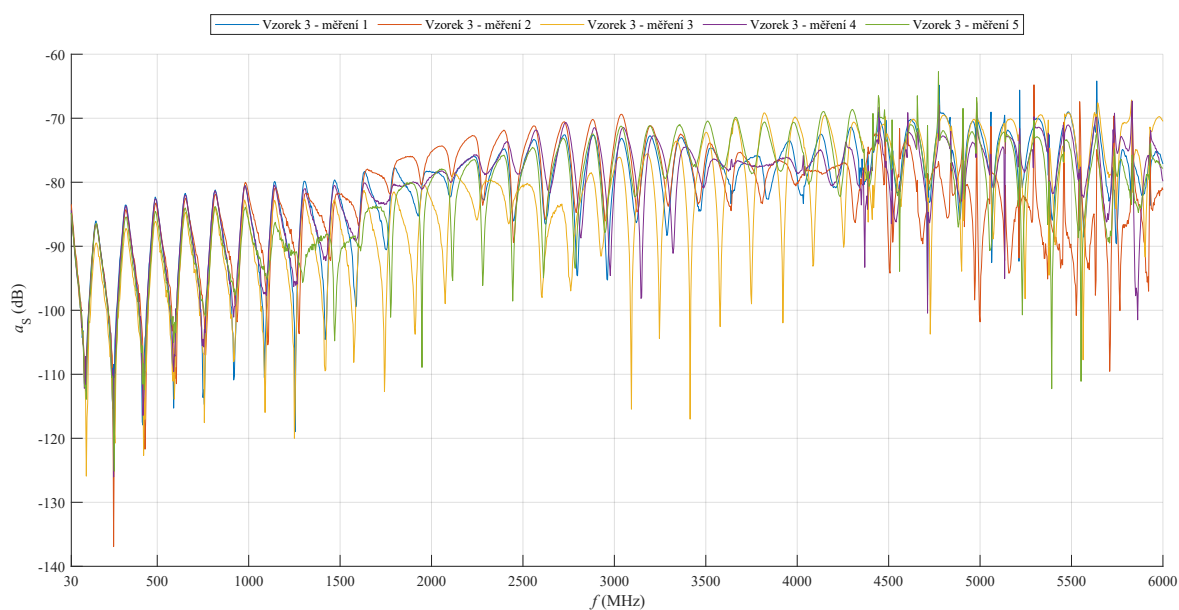


Obrázek 6.6: Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem FAKRA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.

Příloha IV

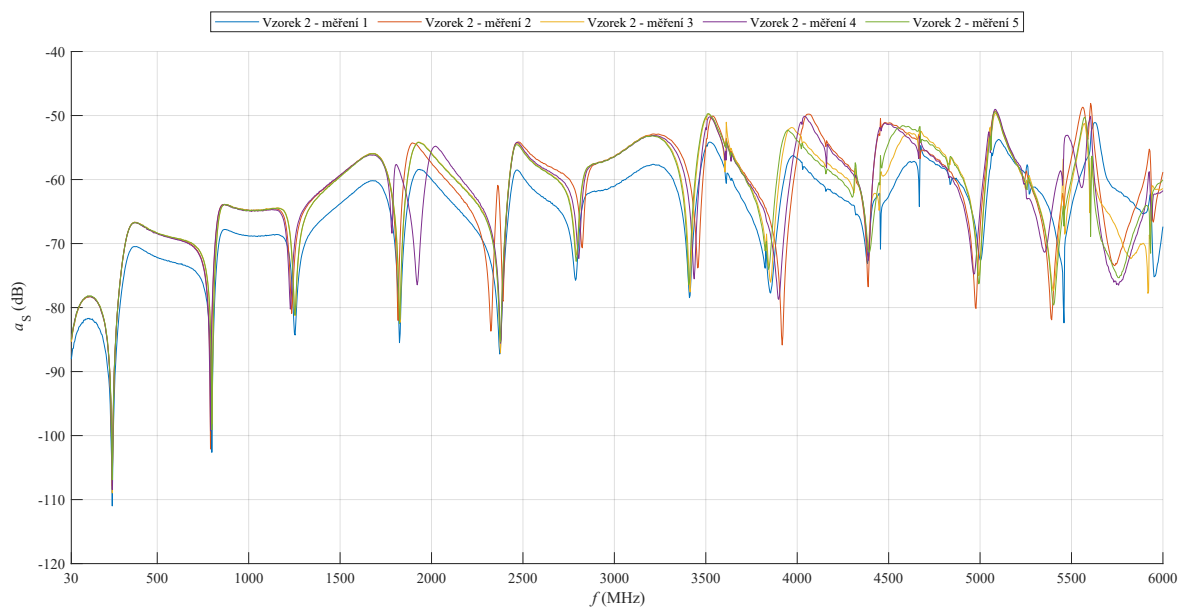


Obrázek 6.7: Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.

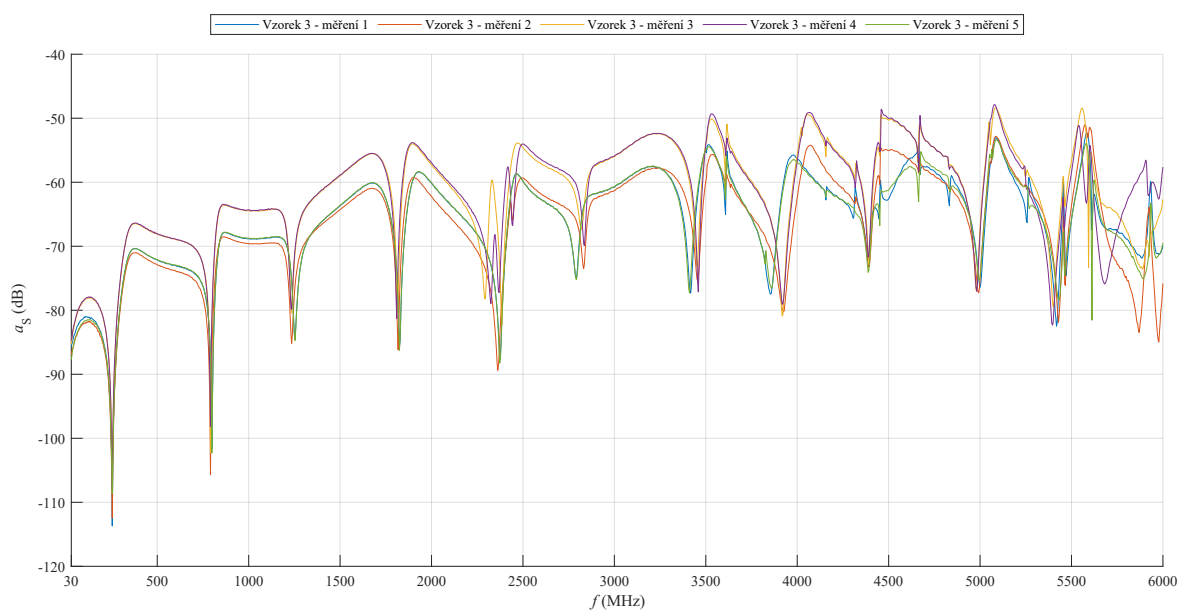


Obrázek 6.8: Průběhy útlumu stínění nízkoztrátového kabelu N.909.934 o délce 3,5 m s konektorem SMA ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.

Příloha V

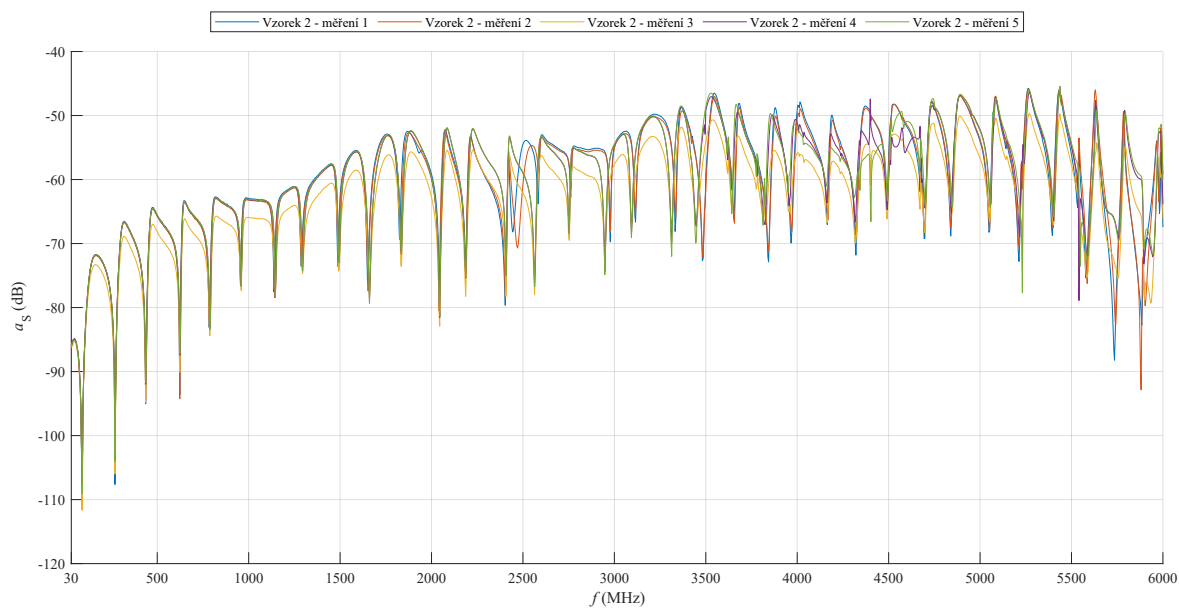


Obrázek 6.9: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m pro vzorek 2.

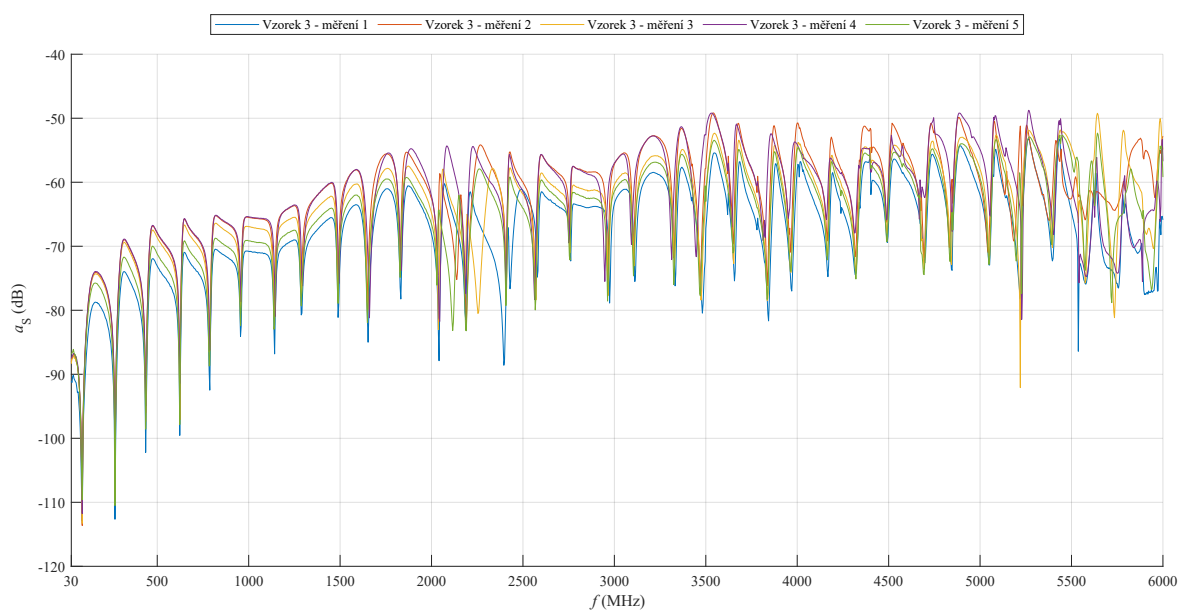


Obrázek 6.10: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 0,5 m pro vzorek 3.

Příloha VI

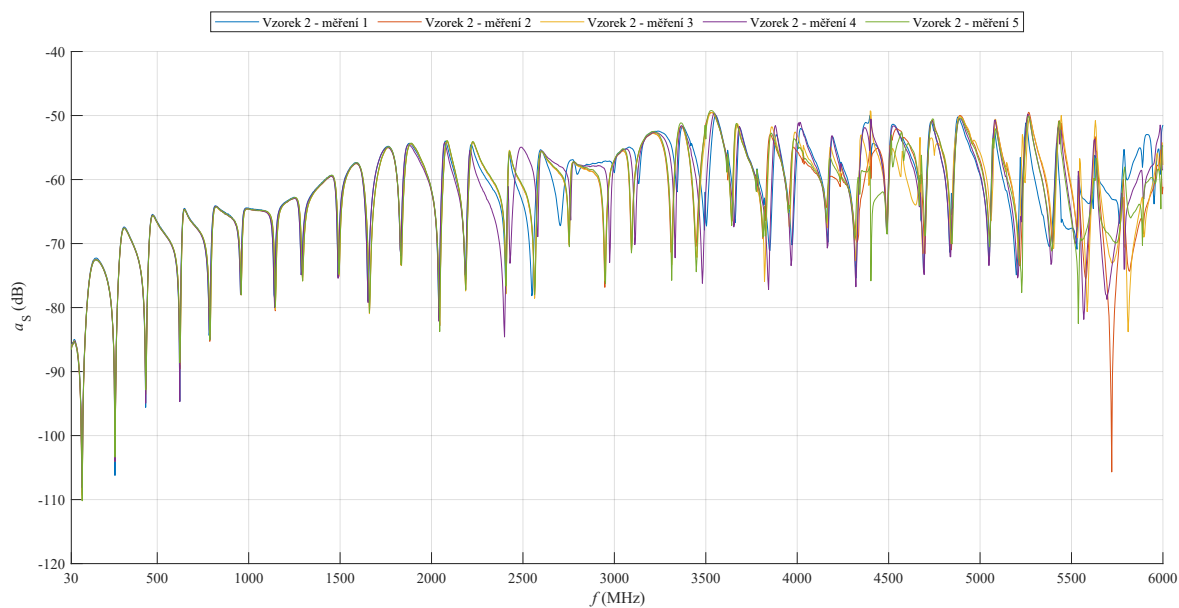


Obrázek 6.11: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.

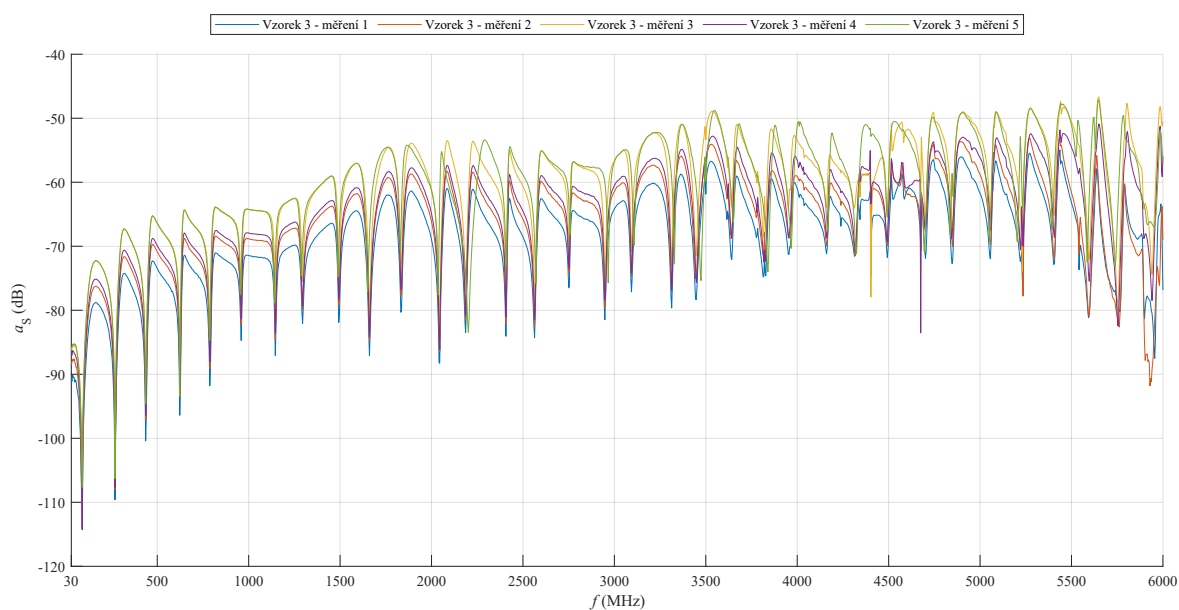


Obrázek 6.12: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.

Příloha VII

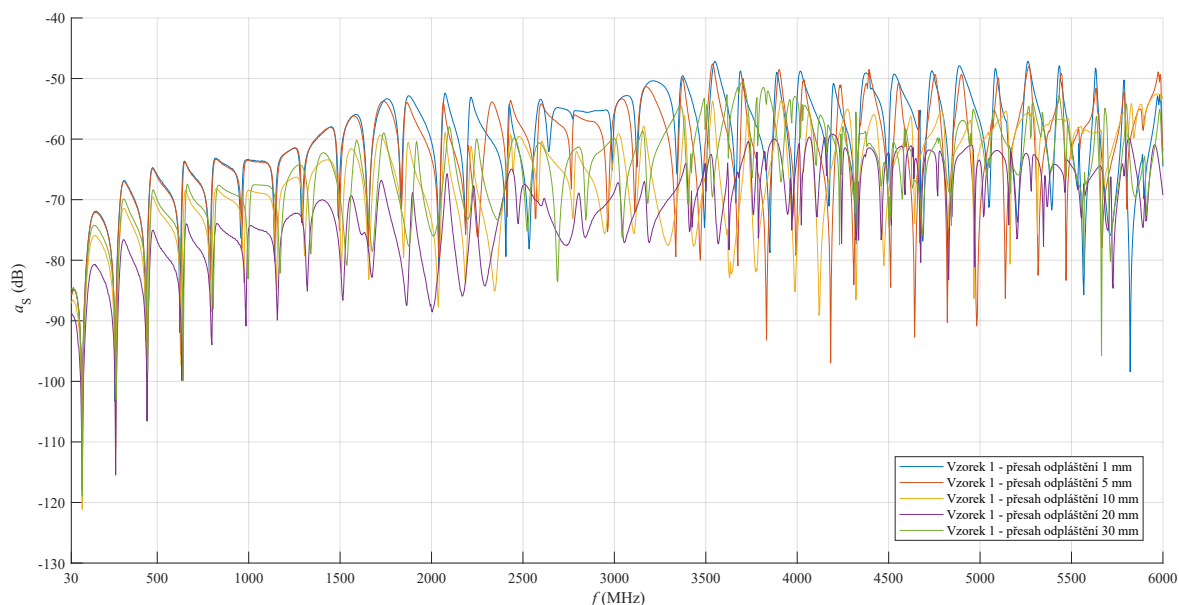


Obrázek 6.13: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2.

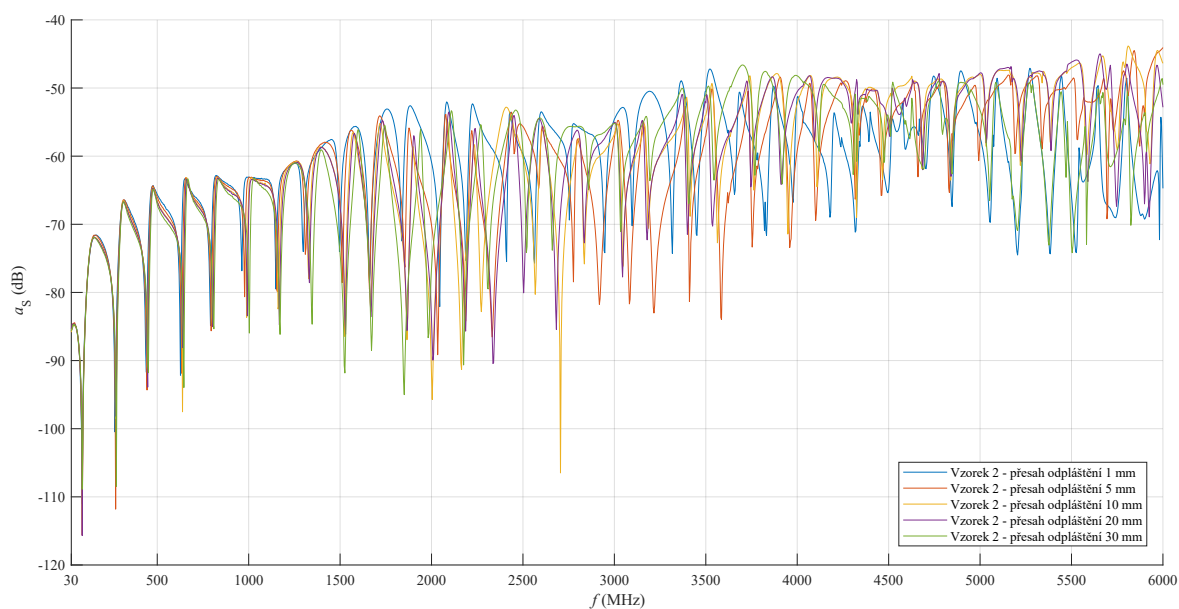


Obrázek 6.14: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3.

Příloha VIII

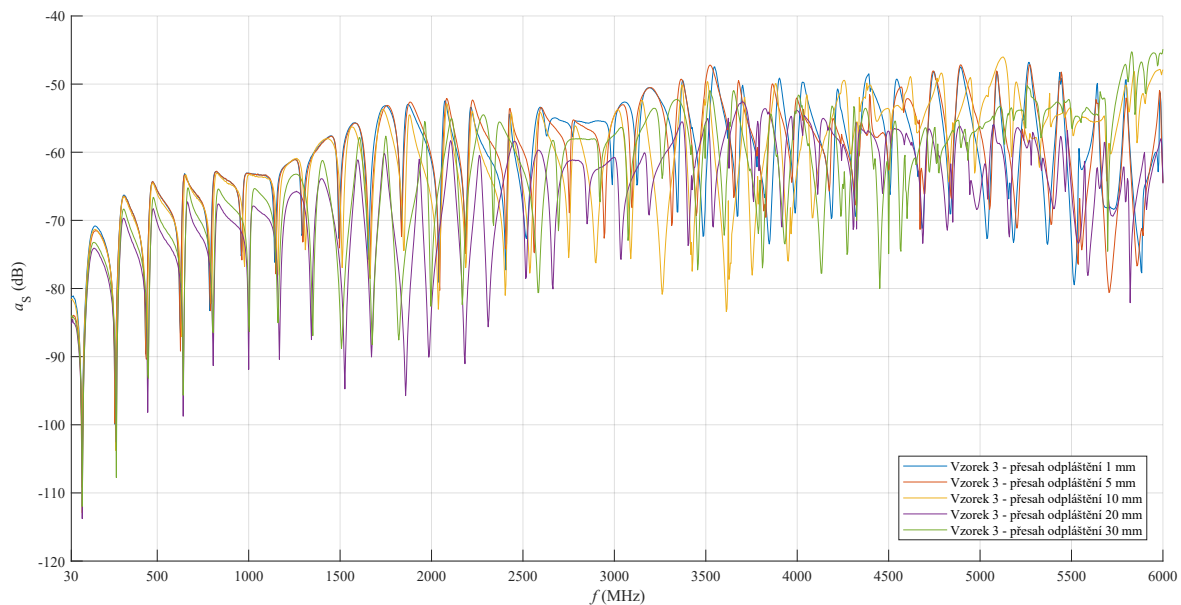


Obrázek 6.15: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 1 s různými přesahy odpláštění.



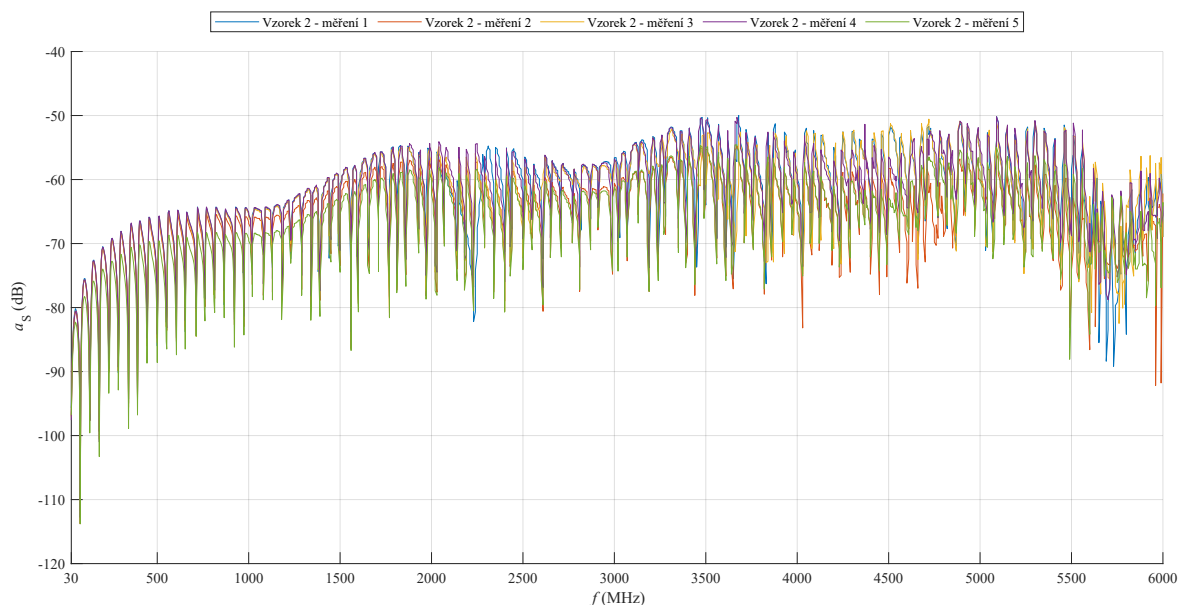
Obrázek 6.16: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 2 s různými přesahy odpláštění.

Příloha IX

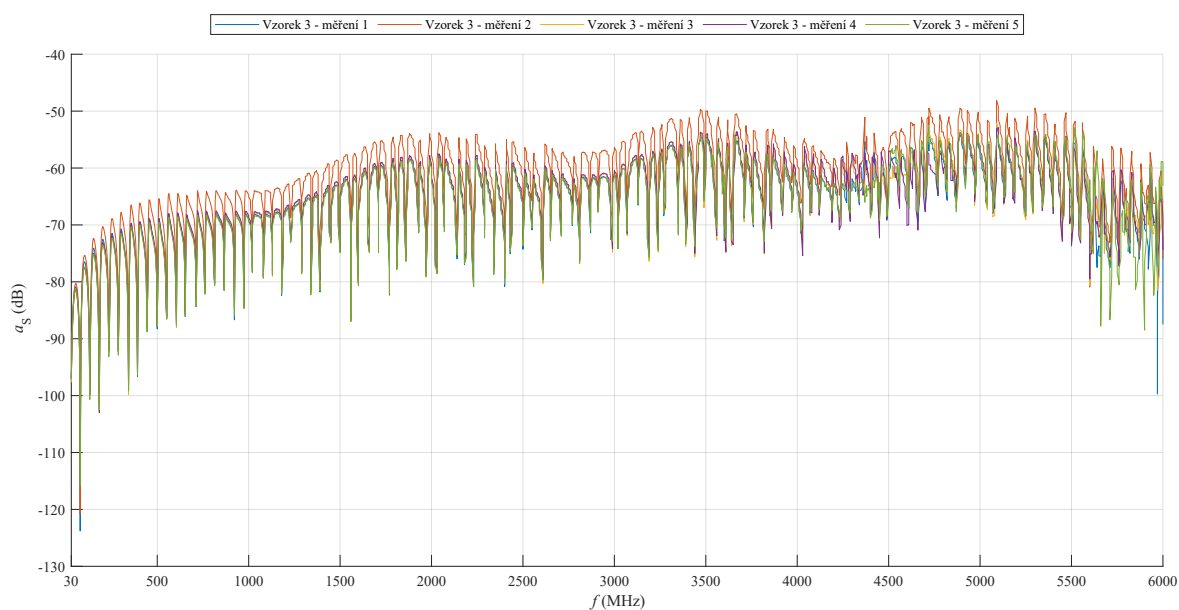


Obrázek 6.17: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 1,5 m ve vazební soustavě 1 m pro vzorek 3 s různými přesahy odpláštění.

Příloha X

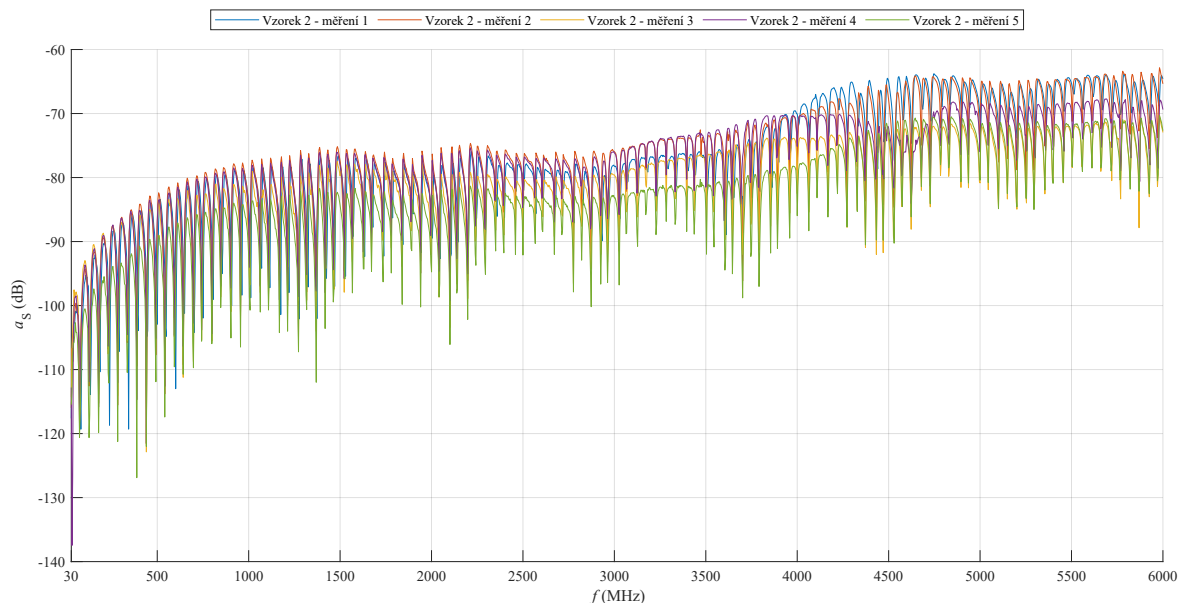


Obrázek 6.18: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.

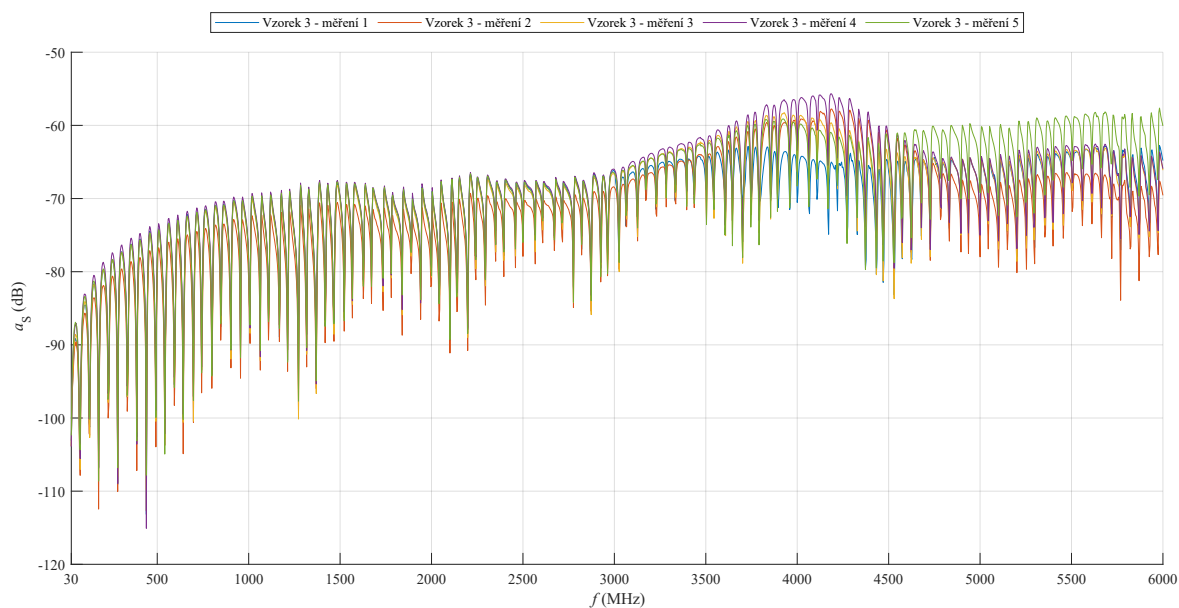


Obrázek 6.19: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.

Příloha XI

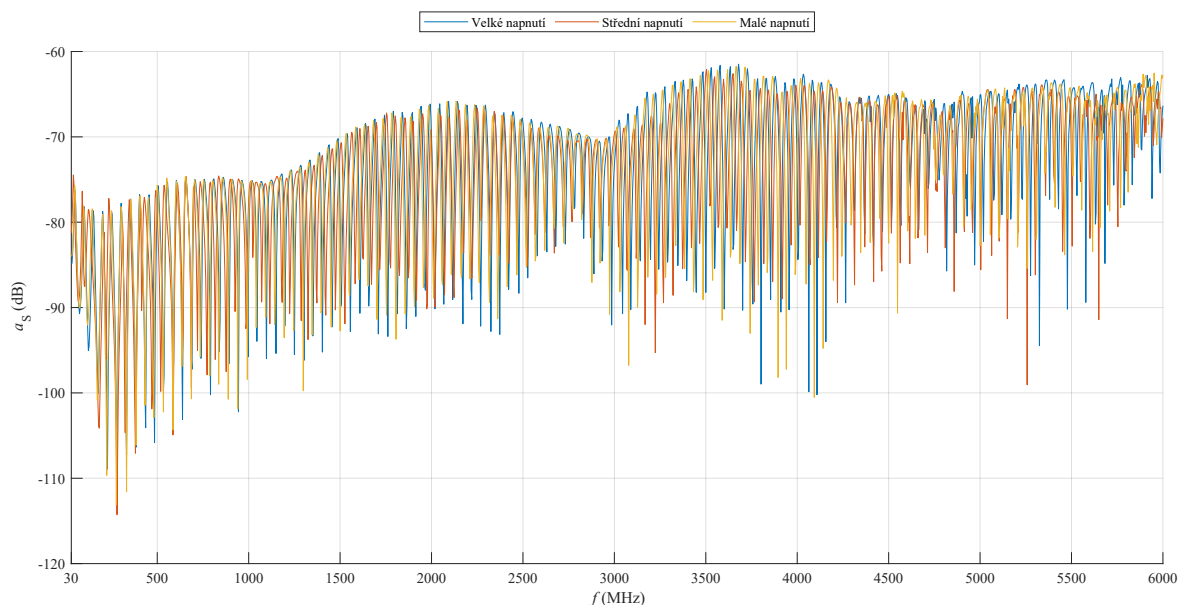


Obrázek 6.20: Průběhy útlumu stínění konektoru SMA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 2.



Obrázek 6.21: Průběhy útlumu stínění konektoru SMA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3,5 m ve vazební soustavě 3 m pro vzorek 3.

Příloha XII



Obrázek 6.22: Průběhy útlumu stínění konektoru FAKRA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3, 5 m ve vazební soustavě 3 m pro různá napnutí.



Obrázek 6.23: Průběhy útlumu stínění konektoru SMA s nízkoztrátovým kabelem N.909.934 o délce 3, 5 m ve vazební soustavě 3 m pro různá napnutí.