

Úloha č. 7 - Přenosové vlastnosti optických vláken

1 Teoretický úvod

Optické vláknové vlnovody jsou důležitou komponentou optických komunikačních sítí. Jejich nejvýznamnějšími parametry jsou měrný útlum a přenosová kapacita, která je omezená zejména disperzí. Cílem praktika je seznámit se s možnostmi měření důležitých charakteristik optických vláken a analyzovat vlivy, které omezují přenosové vlastnosti vlnovodů. Pro účely měření útlumu bude v rámci praktika využívána metoda OTDR. Vidová disperze mnohovidového vlákna bude měřena ve frekvenční oblasti pomocí analýzy přenosu harmonických signálů.

OTDR - Optical Time Domain Reflectometry

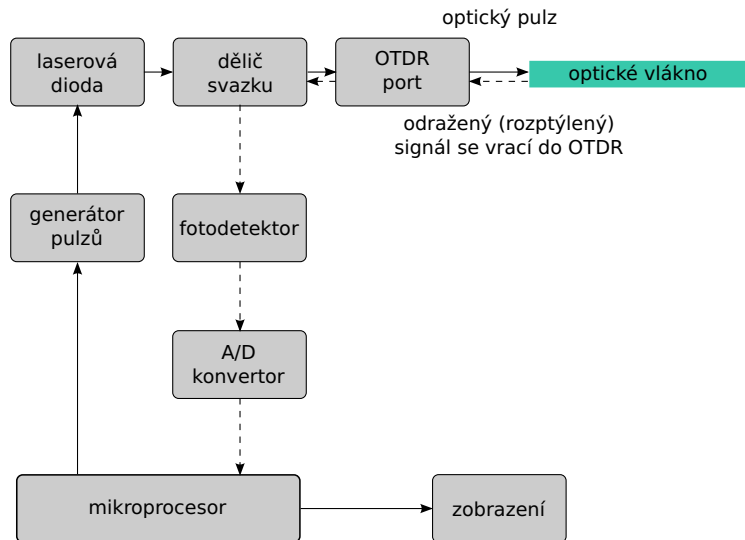
Měření parametrů optických vláken metodou zpětného rozptylu představuje v současnosti velmi důležitý nástroj pro zajišťování spolehlivého provozu a údržby přenosových systémů s optickými vlákny. Metoda zpětného rozptylu, nazývaná také optická reflektometrie (OTDR), je metoda založená na měření optického výkonu, který je rozptýlen resp. odražen v různých bodech vlákna zpět ke vstupnímu čelu vlákna. Měřicí přístroj vysílá do vlákna příslušný signál a měří zpětně rozptýlenou resp. odraženou energii v závislosti na čase. Ze známé rychlosti šíření potom určí polohu daného rozptylového centra. Z podstaty vyplývá, že touto metodou je možné měřit útlum vlákna, analyzovat útlum jak v celé délce, tak i v jednotlivých úsecích, zjišťovat podélnou homogenitu vlákna, útlum svárů a konektorů, délku vlákna a zároveň i lokalizovat poruchy. OTDR se používá rovněž ke zjišťování optické kontinuity trasy. Základními fyzikálními procesy, které umožňují fungování metody jsou Rayleighův rozptyl a Fresnelův odraz. K Rayleighově rozptylu dochází po celé délce vlákna a je proto možné měřit jeho útlum spojitě i v úsecích, kde se nevyskytují žádné makroskopické nečistoty, resp. poruchy. K Fresnelově odrazu dochází v místech se skokovou změnou indexu lomu jako jsou sváry, konektory, konec vlákna, apod. Pro využití OTDR v technické praxi existuje v současné době řada různě dokonalých měřicích přístrojů. Převážnou většinou přístrojů OTDR lze měřit následující parametry:

- celkový útlum trasy
- délka trasy
- kontinuita tras pro ověření správnosti montáže optické trasy a optických rozvaděčů
- nehomogenita vláken
- útlum (zpětný odraz) všech svárů a spojek
- měrný útlum všech vláken jednotlivých kabelových délek trasy

Blokové schéma metody je na obrázku 1. Pro matematickou závislost detekovaného výkonu rozptýleného ve vlákně platí:

$$P_b(z) = \frac{1}{2} P_0 \Delta t S \alpha_R e^{-2\alpha z}, \quad (1)$$

kde P_0 je navázaný výkon, P_b měřený (detekovaný) výkon, Δt je šířka pulsu, S je koeficient zpětného rozptylu, α_R je ztráta rozptylem, z je vzdálenost (km) a α jsou ztráty (dB/km). Koeficient zpětného rozptylu S závisí na materiálových vlastnostech (čistotě a homogenitě vlákna), geometrickém provedení (průměru vidového pole) optického vlákna, ale také na parametrech měřicího impulsu (spektrální šířce). Pro orientaci se hodnota S pohybuje pro jednovidová (SM) vlákna okolo $S \approx -50$ dB, pro mnohovidová (MM) okolo $S \approx -23$ dB. Výhodou této metody měření je její relativní jednoduchost a možnost monitorovat průběh (profil) nehomogenit v celé



Obrázek 1: Blokové schéma OTDR.

délce měření včetně lokalizace poruchy. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady a nutnost měřit z obou stran vlákna.

Pro vyjádření ztráty resp. útlumu většinou nevyužíváme jednotky výkonu, ale jednotky dB, kdy ztráta, resp. útlum mezi body 1 a 2 jsou definovány jako

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [dB]}. \quad (2)$$

Ztráta je tedy definována jako kladná veličina. V případě odrazu od sváru, spojky, resp. konce vlákna definujeme reflexi jako

$$R = 10 \cdot \log \frac{P_r}{P_i} \text{ [dB]}, \quad (3)$$

kde P_i a P_r jsou dopadající, resp. odražený výkon. Odraz je tedy záporný, přičemž menší číslo v dB značí menší reflexi.

Přístroje OTDR lze charakterizovat několika parametry, které udávají možnosti měření pomocí daného zařízení. Mezi nejdůležitější z nich patří:

- *Délková přesnost* - Přesnost měřícího přístroje závisí na přesnosti zadané hodnoty indexu lomu vlákna (hodnota by měla být zadána s přesností alespoň 10^{-3}), přesností časové základny a samotné chybě způsobené měřením rozptylu. Vzdálenost d je určena vztahem

$$d = \frac{c \cdot t}{n \cdot 2}, \quad (4)$$

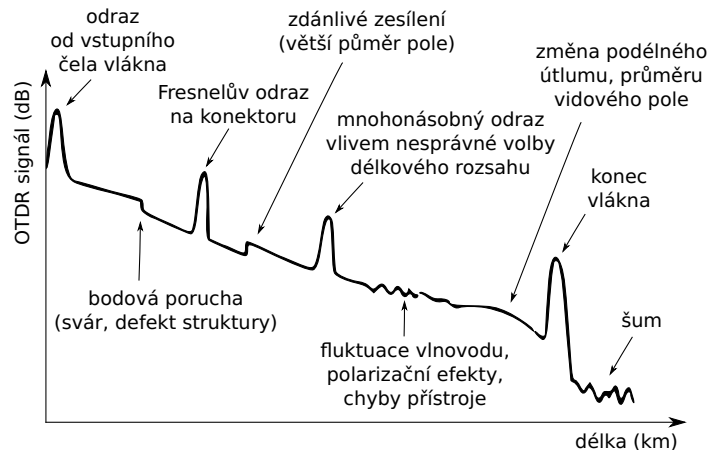
kde c je rychlost světla, n index lomu vlákna a t je časový interval, který uběhne od vyslání signálu k jeho přijetí.

- *Linearita (přesnost měření útlumu)* - Udává schopnost přístroje zachovat přímočarý průběh útlumu měřeného vlákna s lineární závislostí útlumu na délce a nezakřivovat ho přídavným zakřivením.
- *Dynamický, resp. měřicí rozsah* - Tento rozsah vypovídá o maximální hodnotě útlumu měřené trasy při určité přesnosti měření poruchy blízko jejího konce.
- *Mrtvá zóna* - Délka mrtvé zóny závisí na použité šířce impulsu, velikosti odrazu poruchy, provedení detekční části přístroje a na použitém algoritmu analýzy. Rozlišují se dvě mrtvé zóny, a to identifikační mrtvá zóna (event dead zone), která udává nejmenší vzdálenost dvou odrazných poruch, při které lze poruchu bezpečně rozlišit, a dále útlumová mrtvá zóna

(attenuation dead zone), která charakterizuje vzdálenost za poruchou s určitou velikostí odrazu, kde nelze spolehlivě měřit útlum vlákna. Podstatou existence mrtvých zón je saturace detektoru na jistou dobu po přijetí intenzivního signálu většinou způsobeného odrazem. Velikost mrtvé zóny lze ovlivnit volbou délky pulzu.

- *Vlnová délka použitého záření* - většina přístrojů umožňuje měřit na více typických komunikačních vlnových délkách, které byly zvoleny s ohledem na minima útlumu a disperze používaných materiálu pro výrobu vláken. Jedná se zejména o vlnové délky 1310nm a 1550nm.

Typický výstup z měření pomocí OTDR je zobrazen na obrázku 2.



Obrázek 2: Příklad měření optické trasy pomocí OTDR. Na obrázku jsou demonstrovány projevy některých základních součástí optické trasy.

Měření disperzních vlastností vlnovodů

Přenosové vlastnosti optických vláken jsou zásadně ovlivněny disperzí. Disperze ovlivňuje časové rozšíření přenášených pulzů a tím limituje přenosovou kapacitu vlákna. Disperze ve vláknech může být způsobena různými faktory, podle nich rozlišujeme:

- vidovou disperzi,
- chromatickou disperzi (materiálová + vlnovodová),
- polarizační disperzi.

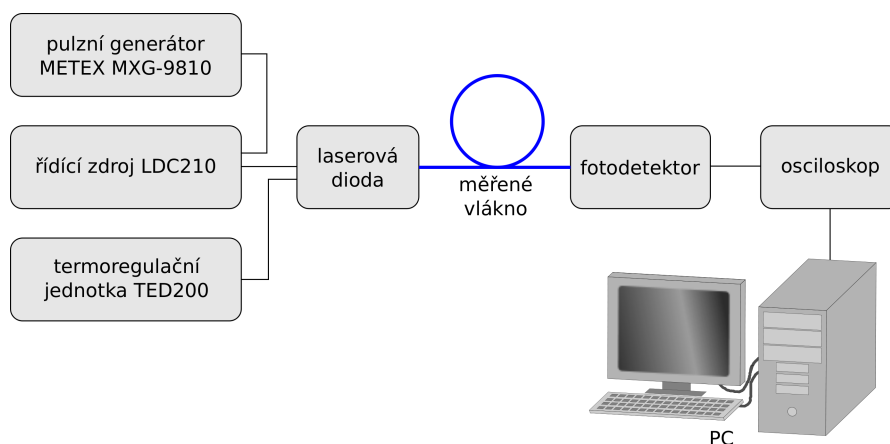
Zatímco chromatická a polarizační disperze se v principu vyskytují u všech vlnovodů (jednovídných i mnohovidových), vidová disperze je doménou mnohovidových vlnovodů. Vzhledem k tomu, že její vliv je většinou řádově větší než vliv chromatické a polarizační disperze, je vidová disperze pro mnohovidová vlákna dominantním faktorem limitujícím přenosovou charakteristiku. Omezení šířky pásma mnohovidových vlnovodů je tak způsobeno různou skupinovou rychlostí vedených vidů. Vyšší vidy mají menší konstantu šíření a šíří se pomaleji. Přivedeme-li na vstup vlnovodu časový impulz, šíří se vlnovodem rozložen do mnoha vidů a díky jejich nestejně rychlosti šíření dochází k jeho deformaci. Ve frekvenční oblasti můžeme vidovou disperzi interpretovat jako zmenšení šířky přenosového pásma. Vidovou disperzi lze značně potlačit vhodnou volbou profilu indexu lomu ve vlákne. Vyšší vidy, které mají menší konstantu šíření mají oproti nižším vidům větší část svojí energie rozloženou mimo osu vlákna. Snížením indexu lomu vlákna na krajích tedy můžeme kompenzovat rozdíl v rychlosti šíření vidů. Tento efekt je podstatou tzv. gradientních vláken, které mají potlačenou vidovou disperzi a tím dosahují dostatečné šířky přenosového pásma.

U vlnodů jednovidových jsou přenosové vlastnosti ovlivněny chromatickou disperzí a případně disperzí polarizační. Rozšíření impulzu je v případě chromatické disperze způsobeno závislostí rychlosti šíření optické vlny na vlnové délce a tedy na šířce spektrální čáry zdroje. Chromatická disperze je tvořena dvěma složkami. První složka, tzv. materiálová disperze souvisí se závislostí indexu lomu (jako materiálového parametru) na vlnové délce, druhá složka, tzv. vlnodová disperze pak souvisí s příčnou geometrií vlnovodu a profilem indexu lomu. I když se vláknem šíří pouze jeden vid, je jeho rozložení pole závislé na vlnové délce. Proto pro různé vlnové délky je podíl energie šířené jádrem a pláštěm různý a liší se i konstanty šíření. Chromatická disperze se může, jak již bylo řečeno, projevit i u vlnodů mnohovidových. A nakonec v obecném jednovidovém vlnovodu se mohou šířit dvě ortogonální složky vidu, které si můžeme představit jako dva skutečné ortogonální vidy. Různá rychlost šíření těchto vidů vede opět k rozšíření impulzu - polarizační disperzi a tím k omezení přenosové kapacity.

Měření všech druhů disperze lze principiálně provádět v časové oblasti ze změny tvaru impulsu nebo v oblasti frekvenční, kde se měří šířka přenášeného pásma při definované délce vlnovodu. Měření malých hodnot disperze klade značné nároky na vybavení. V úloze se proto omezíme na měření mezividové disperze celoplastového vláknového optického vlnovodu ve frekvenční oblasti.

Měření mezividové disperze ve frekvenční oblasti

Základní sestava pracoviště pro měření ve frekvenční oblasti je na obrázku 3. Zdrojem optického



Obrázek 3: Blokové schéma zařízení pro měření disperzních vlastností optických vláken.

signálu je laserová dioda řízená generátorem pulzů, který umožňuje vytvářet harmonické i neharmonické (pravoúhlé pulzy, trojúhelníkový profil, ...) signály ve frekvenčním pásmu od 1Hz do 10MHz. Signál z diody je naveden do vlákna a na jeho druhém konci přiveden k fotodetektoru připojenému k digitálnímu osciloskopu. Sestava umožňuje měnit charakter signálu na vstupu a současně pozorovat vliv přenosu systémem na jeho výstup. Bohužel, jak lze snadno experimentálně ukázat, signál je značně ovlivněn již samotným vysílačem a detektorem, kdy dochází k jeho deformaci oproti řídicímu napět'ovému signálu z generátoru i bez přítomnosti optického vlákna. Proto je nutné vliv těchto součástí eliminovat dalším měřením. Předpokládejme, že se celý systém chová jako lineární přenosová soustava¹, kde pro přenos napět'ových signálů platí:

$$u_o(t) = \mathcal{L}\{u_i(t')\}, \quad (5)$$

kde \mathcal{L} je lineární operátor popisující chování systému. Necht' je dále tento systém tzv. časově invariantní, tedy jeho odezva není závislá na absolutní poloze impulzu v čase, což lze matematicky

¹Pro zajištění linearity je nutné správně zvolit intenzitu signálu na vstupu, velikost stejnosměrného offsetu signálu a také nastavit správně detekční část systému. Vzhledem k závislosti výkonu laserové diody na teplotě je nutné správně stabilizovat teplotu pomocí termoregulační jednotky tak, aby nedošlo k ovlivnění měření.

zapsat jako:

$$u_o(t + \Delta t) = \mathcal{L}\{u_i(t' + \Delta t)\}. \quad (6)$$

Potom lze zavést tzv. impulzní odezvu systému h jako odezvu na jednotkový impuls vztahem

$$h(t) = \mathcal{L}\{\delta(t')\}. \quad (7)$$

Pro přenos obecného signálu potom platí

$$u_o(t) = u_i * h, \quad (8)$$

resp. ve spektrální doméně

$$\mathcal{U}_o(f) = \mathcal{U}_i(f)\mathcal{H}(f), \quad (9)$$

kde $\mathcal{H}(f) = FT\{h(t)\}$ je přenosová funkce systému, $*$ označuje operaci konvoluce a FT Fourierovu transformaci. Pokud signál prochází několika za sebou řazenými systémy s přenosovými funkcemi $\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_2, \dots, \mathcal{H}_N$, platí

$$\mathcal{U}_o(f) = \mathcal{U}_i(f)\mathcal{H}_1(f)\mathcal{H}_2(f)\dots\mathcal{H}_N(f), \quad (10)$$

resp.

$$u_o(t) = u_i * h_1 * h_2 * \dots * h_N. \quad (11)$$

Pokud tedy systém sestává z diody, měřeného vlákna a detektoru s přenosovými funkcemi $\mathcal{H}_S, \mathcal{H}_F$ a \mathcal{H}_D , platí při kalibračním měření (bez měřeného vlákna pouze s krátkým kalibračním vláknem)

$$\mathcal{U}_{o1}(f) = \mathcal{U}_i(f)\mathcal{H}_S(f)\mathcal{H}_D(f) \quad (12)$$

a při měření s měřeným (dlouhým) vláknem

$$\mathcal{U}_{o2}(f) = \mathcal{U}_i(f)\mathcal{H}_S(f)\mathcal{H}_D(f)\mathcal{H}_F(f). \quad (13)$$

Předpokládejme, že do systému přivedeme harmonický napět'ový signál $u_i(t) = \mathcal{U}_i e^{2\pi i f_i t}$ s frekvencí f_i a amplitudou \mathcal{U}_i . Potom hodnotu přenosové funkce vlákna na dané frekvenci f_i spočteme jako

$$\mathcal{H}_F(f_i) = \frac{\mathcal{U}_{o2}(f_i)}{\mathcal{U}_{o1}(f_i)}, \quad (14)$$

tedy z poměru amplitud jednotlivých signálů na výstupu. Pokud chceme získat celou funkci $\mathcal{H}_F(f)$, musíme měření provést postupně pro celé frekvenční spektrum.

Ze zalosti přenosové funkce systému lze tedy spočítat přenos libovolného signálu přivedeného na vstup systému. Pro zjednodušenou charakterizaci přenosových vlastností se často zavádí tzv. šířka přenosového pásma vlnovodu

$$B = f_{3dB}L \text{ [MHz.m]}, \quad (15)$$

kde f_{3dB} je frekvence, při které poklesne přenosová charakteristika o 3dB (tedy na jednu polovinu maxima) a L je délka měřeného úseku vlnovodu.

2 Zadání úlohy

Cíle úlohy

Cílem úlohy je seznámit se se základními vlnovodnými vlastnostmi optických vláken jako jsou útlum a přenosová charakteristika. Bude provedeno měření vláknové soustavy pomocí metody OTDR a měření přenosové charakteristiky vlákna se zaměřením se na vliv vidové disperze. Cílem je rovněž pochopení různých disperzních procesů ve vláknech a jejich vlivu na přenosový proces.

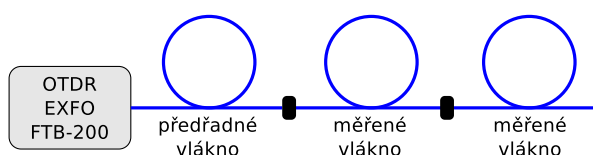
Pomůcky

sada optických vláken různých délek s různými konektory a spojky, OTDR - EXFO FTB-200, laserová dioda 650nm/5mW s řídicím zdrojem LDC210 a termoregulační jednotkou TED200, pulzní generátor METEX MXG-9810, fotodioda, digitální osciloskop Tektronix, konektory a útlumové členy, PC, software

Postup měření

1. Měření pomocí OTDR.

- (a) Seznamte se se základními parametry měřicích přístrojů OTDR. Připravte pracoviště pro měření úkolů. Příklad uspořádání je na obrázku 4. K OTDR připojte předřadné propojovací vlákno, pomocí kterého budete připojovat měřená vlákna. Nastavte základní parametry měřicího přístroje (délku pulsu, délkový rozsah, průměrování signálu). Při práci s vlákny dbejte na čistotu konektorů, která zásadně ovlivňuje optické ztráty.



Obrázek 4: Experimentální uspořádání pro měření pomocí OTDR. Měřená vlákna je připojené k přístroji pomocí propojovacího vlákna.

- (b) Změřte hodnoty útlumu zvoleného systému vláken podle instrukcí vyučujícího. Připojte měřená vlákna a OTDR nastavte tak, aby zobrazoval zpětně rozptýlený signál z měřeného vlákna. Pokud je požadovaná větší rozlišovací schopnost, je možné požadovaný úsek zobrazit ve větším měřítku. Proveďte manuální odečtení hodnot měrného útlumu všech částí trasy a také odečtení útlumu a odrazu všech svárů a konektorů. Výsledky porovnejte s automatickým zpracováním, které provedl přístroj. Všechna měření a vyhodnocení proveďte na obou vlnových délkách 1310nm a 1550nm. Měření proveďte z obou stran. Prozkoumejte možnosti volby metody měření a srovnajte jednotlivé přístupy.
- (c) Změřte délku vlákna (kabelu). Při reálném měření délky kabelu optickým reflektometrem v terénu je důležité pamatovat na to, že v důsledku struktury kabelu má vlákno větší délku než kabel (důsledek tažení a pokládky kabelů). Pro lokalizaci poruch je užitečný tzv. kabelový faktor, který udává, jak je dlouhé vlákno na délku kabelu. Kabelový faktor je definován jako poměr délky kabelu ke skutečné délce vlákna

$$KF = \frac{l_{kabel}}{l_{vlakno}}. \quad (16)$$

Jedná se o bezrozměrnou veličinu menší než jedna. Místo poruchy v kabelu je potom možné snadno lokalizovat výpočtem ze získané délky vlákna vynásobené kabelovým faktorem. Měřte z obou stran vlákna. Měření opakujte pro obě vlnové délky (1310nm a 1550nm).

- (d) Vybranou optickou trasu uložte a zpracujte pomocí software EXFO OTDR_VIEWER, který je součástí balíku ZPOP_07_software.zip na serveru optics.fjfi.cvut.cz.
- (e) Změřte útlum a odraz různých typů konektorů. Demonstrujte vliv délky pulzu na viditelnost blízkých poruch (použijte systém krátkých vláken umístěných někde v průběhu optické trasy).
- (f) Demonstrujte vliv nesprávné volby délkového rozsahu přístroje (přítomnost vícenásobných odrazů).

2. Měření mezividové disperze ve frekvenční oblasti

- (a) Seznamte se v rámci přípravy na měření s programy v systému Matlab pro řízení experimentu. Funkce `harmonic.m` provádí měření přenosové charakteristiky bod po bodě z přenosu harmonických signálů různých frekvencí. Funkce je součástí softwarového balíku `ZPOP_07_software.zip` na serveru `optics.fjfi.cvut.cz`.
- (b) Sestavte experiment podle uspořádání na obrázku 3. Seznamte se s funkcí laserové diody s řízením a termoregulací, frekvenčního generátoru a digitálního osciloskopu.
- (c) Proveďte měření přenosové funkce ve frekvenční oblasti. Spustěte funkci `harmonic.m` v prostředí Matlab a pokračujte podle instrukcí programu. Na pulzním generátoru nastavte příslušný harmonický signál, vylad'te osciloskop, pozastavte signál na osciloskopu a proveďte měření. Postup opakujte pro různé frekvence harmonického signálu v rozmezí od 0Hz do 200kHz. Měření proveďte podle instrukcí nejdříve pro kalibrační vlákno a posléze pro vlákno měřené. Software automaticky provede zpracování a vykreslí přenosovou funkci. Výsledky uložte.
- (d) Proveďte měření přenosu pravouhlého pulzu. Zvolte vhodnou délku vstupního pulzu a změřte signál na výstupu po průchodu měřeným vlákem. Vylad'te osciloskop, pozastavte jeho obraz a proveďte měření. Opakujte pro kalibrační a měřené vlákno. Výsledky uložte (Použijte funkci `pulse.m`, která umožňuje vyčítat informaci z osciloskopu s potřebnými parametry).

3 Požadované výsledky

Po provedení experimentu na základě uvedeného postupu sepište protokol o měření. Protokol musí mimo jiné obsahovat následující údaje:

1. Naměřené hodnoty útlumu a měrného útlumu vlákna, útlumu a odrazu konektoru a zpracování vybrané trasy pomocí software `EXFO OTDR_VIEWER`. Uved'te výsledky všech měření (pro různé vlnové délky, atd.)
2. Přenosovou funkci plastového mnohovidového vlákna změřenou ve frekvenční oblasti. Uved'te rovněž dílčí výsledky pro kalibrační systém, atd.
3. Naměřený přenos pravouhlého pulzu.
4. Proveďte diskuzi výsledků. Pro přenosovou funkci z bodu 2 vypočítejte šířku přenosového pásma vlnovodu.