VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODULY PRO SYNCHRONIZACI MEŘICÍCH ZAŘÍZENÍ S GALVANICKÝM ODDĚLENÍM

SYNCHRONIZATION OF MEASURING DEVICES BY OPTICAL FIBRES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE ONDŘEJ PETR
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JIŘÍ DŘÍNOVSKÝ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO, 2010

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Ondřej Petr	***ID:***	106708
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Moduly pro synchronizaci měřicích zařízení s galvanickým oddělením

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznamte možností přenosu vysokofrekvenčních signálů pomocí optických kabelů. Navrhněte moduly pomocí, kterých bude možné přenést referenční či synchronizační signály tak, aby zdroj a přijímač těchto signálů byly vzájemně galvanicky odděleny a časově synchronizovány.

Dle vašeho návrhu realizujte oba moduly a ověřte jejich funkci při měření vložného útlumu elektromagneticky stíněné komory. Na závěr zhodnoťte přínos vámi navrženého řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BOUŠEK, J., Elektronické součástky. Elektronický učební text. Brno: FEKT VUT v Brně.
[2] WILFERT, O., Optoelektronika. Elektronický učební text. Brno: FEKT VUT v Brně.

Termín zadání:	8.2.2010	***Termín odevzdání:***	28.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	ONDŘEJ PETR
Bytem:	Úsobrno 176 , Úsobrno, 679 39
Narozen/a (datum a místo):	8. srpna 1988 v Moravské Třebové

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

   ☐ disertační práce
   ☐ diplomová práce
   ☒ bakalářská práce
   ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Moduly pro synchronizaci měřících zařízení s galvanickým oddělením
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Ing. Jiří Dřínovský Ph.D.
Ústav:	Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:	_____

   VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

   ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
   ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.

2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.

3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti

   - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
   - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy (z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.

2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.

3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.

4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

……..	……
Nabyvatel	Autor

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo seznámit se s možností přenosu vysokofrekvenčních signálů pomocí optických kabelů a návrh synchronizačních modulů k přenosu referenčního signálu, tak aby zdroj i přijímač tohoto signálu byly časově synchronizovány a vzájemně galvanicky odděleny pomocí optického kabelu. Pro vysílání a příjem optického signálu pomocí optického vlákna jsem vysílač a přijímač zvolil ze série HBR- 0400 od firmy Agilent Technologies.

KLIČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, referenční signál, optický vysílač, optický přijímač, PLL fázový závěs.

ABSTRACT

The aim of this work was to get acquainted with the possibility of transmission of RF signals using optical cables. And design synchronization modules to transmit the reference signal, so that the source and the receiver of the signal are time-synchronized and mutually galvanically separated using optical cable. To transmit and receive optical signals through optical fiber, I chose the transmitter and receiver of the series HBR- 0400 the company Agilent Technologies.

KEYWORDS

Optical fiber, the reference signal, optical transmitter, optical receiver, PLL Phase Lock Loop

PETT, O. Moduly pro synchronizaci měřících zařízení s galvanickým oddělením. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 27 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Moduly pro synchronizaci měřících zařízení s galvanickým oddělením jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Dřínovskému Ph.D.za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne ....

(podpis autora)

Obsah

Obsah 0
1.1. Optická vlákna 1
1.1.1. Princip optických vláken 1
1.1.2. Ztráty v optických vláknech 2
1.1.3. Disperze v optických vláknech 2
1.1.4. Typy optických vláken 3
2. Přenášený referenční signál 4
3. Optická přenosová cesta 5
3.1. Vysílač (transmitter) 5
3.2. Přijímač (Receiver) 7
3.3. Optický kabel 9
4. Návrh jednotlivých modulů 11
4.1. Vysílací modul 11
4.1.1. Schéma zapojení vysílacího modulu 11
4.1.1. Impedanční přizpůsobení 12
4.1.2. Výpočet hodnot 12
4.1.3. Naměřené hodnoty 14
4.1.4. Simulace 16
4.2. Návrh přijímacího modulu 17
4.2.1. Schéma zapojení 19
4.2.2. Výpočty hodnot 19
4.2.3. Simulace 20
4.2.4. Naměřené hodnoty 21
5. Závěr 23
6. Literatura 24
7. Seznam obrázků 25
8. Seznam symbolů 26
9. Seznam příloh 26

1. Úvod

Synchronizační moduly, jimiž se tato práce zabývá, jsou určeny k přenosu referenčního signálu zajišťujícího synchronizaci měřících přístrojů, umístěných ve stíněné komoře. Jelikož jsou klasické metalické kabely náchylné k elektromagnetickému rušení, mohlo by měřené elektromagnetické vlnění narušit přenášený referenční signál, stejně jako by mohl tento referenční signál procházející metalickým kabelem ovlivnit probíhající měření, proto je použití metalických kabelů ve stíněné komoře nevhodné. Tento problém přenosu referenčního signálu je v této práci potlačen použitím optického kabelu. Jelikož světelný tok, jenž je využíván k přenosu signálu pomocí optického kabelu není ovlivňován elektromagnetickým rušením, tedy nevnáší do měření rušivé signály.

1.1. Optická vlákna

Optické vlákno je vlastně dielektrický vlnovod, skládající se ze dvou skleněných vrstev s různými indexy lomu světla, v němž se šíří elektromagnetické vlny, jejichž vlnová délka je z pravidla v rozmezí infračerveného záření a viditelného světla.

1.1.1. Princip optických vláken

Podmínky pro správné šíření světla optickým vláknem jsou vyjádřeny pomocí Snellova zákona lomu světla na rozhraní viz. rovnice 1.1 (kde α je úhel dopadu světla na rozhraní, β úhel lomného světla za rozhraním a n_1 a n_2 jsou indexy lomu světla jednotlivých prostředí)

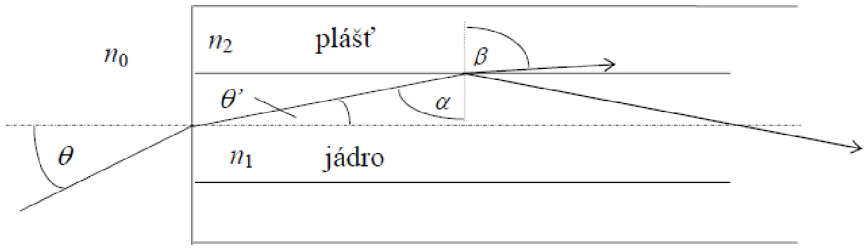
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} \tag{1.1}$$

Z něj lze vyjádřit takzvaný mezní úhel dopadu světelného parsku α_m při které je úhel lomu světla 90°a parsek světla se tedy šíří po povrchu rozhraní. Pokud je úhel dopadajícího světla větší než α_m světelný paprsek se neláme a dochází k takzvanému úplnému odrazu neboli totální reflexi světla, jenž se využívá k podélnému šíření světla optickým vláknem. První podmínka je tedy vyjádřena rovnicí 1.2. Z této rovnice vyplývá i druhá podmínka, jelikož sinus

$$\alpha_{max} = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} \tag{1.2}$$

nemůže být větší než jedna, nemůže být n_2 větší než n_1. To znamená, že jádro optického vlákna musí mít větší index lomu světla než plášť optického vlákna.

1.1 Šíření světla v optickém vláknu



$$\sin\alpha_{max} = \cos\theta'_{max} = \frac{n_2}{n_1} \tag{1.3}$$

$$\sin\theta'_{max} = \sqrt{1-\cos^2\theta'_{max}} \tag{1.4}$$

$$\sin\theta_{max} = \frac{n_1}{n_0}\sqrt{1-\cos^2\theta'_{max}} = \frac{n_1}{n_0}\sqrt{1-\frac{n_2^2}{n_1^2}} \approx \frac{n_1}{n_0}\sqrt{1-\frac{{n_2}^2}{{n_1}^2}} \approx \sqrt{2n_1\Delta} \tag{1.5}$$

Jak je patrné z obrázku *1.1 Šíření světla v optickém vláknu* při volbě příjmového úhlu optického vlákna je zapotřebí také vzít v úvahu rozhraní mezi vzduchem a jádrem vlákna na kterém dochází k lomu zdrojového světelného paprsku. Za pomoci obrázku *1.1 Šíření světla v optickém vláknu* lze odvodit rovnice 1.3, 1.4 a 1.5 kde $\Delta = n_1 - n_2$ je rozdíl v indexech lomu jádra a pláště a θ_{max} j tak zvaný aperturní neboli příjmový úhel vlákna. Numerická apertura ve zkratce NA, vyjádřená rovnicí 5, udává míru schopnosti vlákna přijmout optický výkon.

1.1.2. Ztráty v optických vláknech

Bývají vyjádřeny útlumem v decibelech nebo měrným útlumem v decibelech na kilometr. Dělíme je na několik částí:

Ztráty materiálovou absorpcí, ta je způsobena vzájemným působením (interakci) fotonu s atomární strukturou, při níž vzniká teplo. Dělíme ji na vlastní s interakcí s SiO2, kterou v ultrafialové oblasti způsobují valenční elektrony, v infračervené oblasti (IR) je způsobena kmitáním celých molekulových útvarů. Použití materiálů s těžšími molekulárními strukturami, které světlo nedokáže rozkmitat, může posunout IR absorpci k nižším vlnovým délkám. Druhou částí materiálové absorpce je nevlastí absorpce způsobená ionty příměsí.

Ztráty materiálovým rozptylem, jehož příčiny můžeme dělit do tří částí, z nichž nejvýznamnější je Rayleigho rozptyl. Tento jev vzniká ohybem světla na krystalické mřížce, tudíž nelze odstranit. Další je Mieův rozptyl - ten vzniká na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou, jako jsou mikroskopické bublinky ve vlákně, napětí ve vlákně, kolísání průměru vlákna a jiné poruch srovnatelné s vlnovou délkou. Poslední příčinou je rozptyl na nečistotách větší než vlnová délka, tento rozptyl jde eliminovat technologií výroby.

Ohybové ztráty - ohyb optického vlákna může způsobit, že světelný paprsek dopadá na rozhraní jádra a pláště pod větším úhlem, tím je porušena podmínka totálního odrazu a světelný paprsek se láme do pláště. Při ohybu dále dochází k vzniku tlaku na vnitřní straně a tahu na vnější straně ohybu, což může vést k změně indexu lomu jádra a pláště a tím i k změně mezního úhlu šíření světla.

1.1.3. Disperze v optických vláknech

Při disperzi dochází k rozprostření energie v čase. Lze ji dělit na módovou a chromatickou disperzi.

Modová disperze je zapříčiněna mnohosměrovostí šíření, jelikož vid vstupující do optického vlákna pod nejmenším úhlem či popřípadě po přímce se šíří po nejmenší trajektorii, oproti tomu vid vstupující do vlákna pod maximálním úhlem se šíří po nejdelší trajektorii a bude proto nejvíce zpožděn. Je patrné, že tento problém postihuje vícemodová vlákna.

Chromatická disperze spojuje vlnovou a materiálovou disperzi a je zapříčiněna závislostí indexu lomu na frekvenci díky čemuž dochází k různým trajektoriím jednotliví frekvencí a tedy i k rozdílné době šíření. Tento jev postihuje všechny optické vlákna, ale u mnohomodových vláken je zastíněn modovou disperzí.

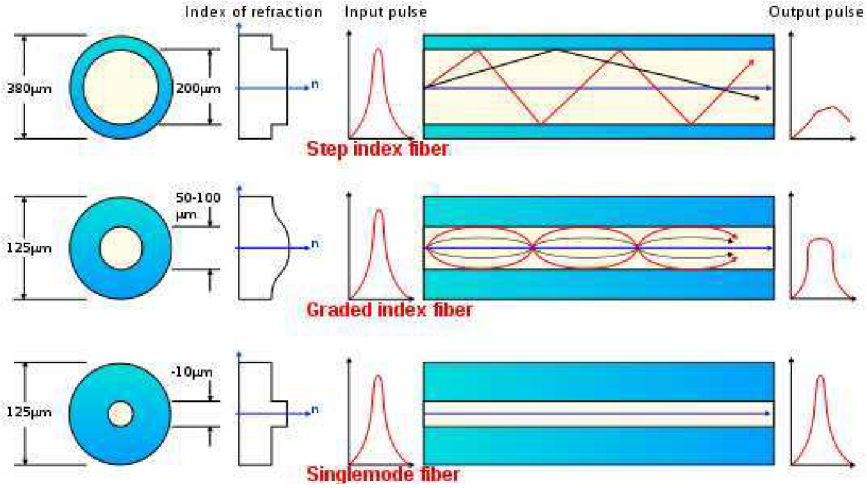
1.1.4. Typy optických vláken

Podle provozu optických vláken je můžeme dělit na mnohovidová se skokovým indexem lomu, gradientní s postupnou změnou indexu lomu a jednomodová. Šíření světla v těchto typech vlákna zobrazuje obrázek *1.2 Princip šíření světla v jednotlivých typech optických vláken*.

Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu SI (step index).

Vlákna se skokovou změnou indexu lomu využívají k šíření světelných vidů (parsků) totální reflexe popsané v předchozí části. Mnohovidové vlákna mají oproti jednovidovým větší průměr jádra, do něhož vstupují jednotlivé vidy pod různými úhly. Jelikož tato vlákna postihuje modová disperze, jsou využívány na kratších vzdálenostech s menšími přenosovými rychlostmi. Díky většímu průměru jádra je výroba těchto vláken levnější a také světelné paprsky se snáze vysílají do jádra optického vlákna, tak je možné použít levnější elektroniku pracující na nižších vlnových délkách (pro křemíková vlákna okolo 800 nm).

1.2 Princip šíření světla v jednotlivých typech optických vláken



Gradientní vlákna s postupnou změnou indexu lomu GI (graded index)

U těchto vláken není dána ostrá hranice mezi pláštěm vlákna a jeho jádrem, ty mezi sebou postupně přechází a vytváří tak postupnou změnu indexu lomu, díky níž se vidy (světelné paprsky) šíří ohybem světla namísto totálního odrazu světla. To umožňuje rychlejší šíření vidům neležícím v ose vlákna a potlačuje tak módovou disperzi, proto se používají pro vyšší přenosové rychlosti.

Jednomódová vlákna SM (single mode)

Jednomodová vlákna jsou navržena pro přenos pouze jednoho vidu ležícího v ose vlákna, díky čemuž se nevyskytuje módová disperze. Tato vlákna mají malé průměry jádra pohybující se řádově v jednotkách µm, malý průměr jádra způsobuje i malou NA a tedy náročně zavádění optického výkonu do vlákna. Používají se pro delší trasy s vysokou přenosovou rychlostí.

Dalším možným dělením optických vláken je podle materiálu, z kterého jsou vyráběna. Nejkvalitnější vlákna jsou ***skleněná vlákna,*** ve většině aplikací je k výrobě použitý křemen (SiO_2) a vlastnosti optického vlákna jdou poté doladit pomocí příměsí jako je například germanium (Ge) používané k zvýšení indexu lomu. Skleněná vlákna se vyznačují malým

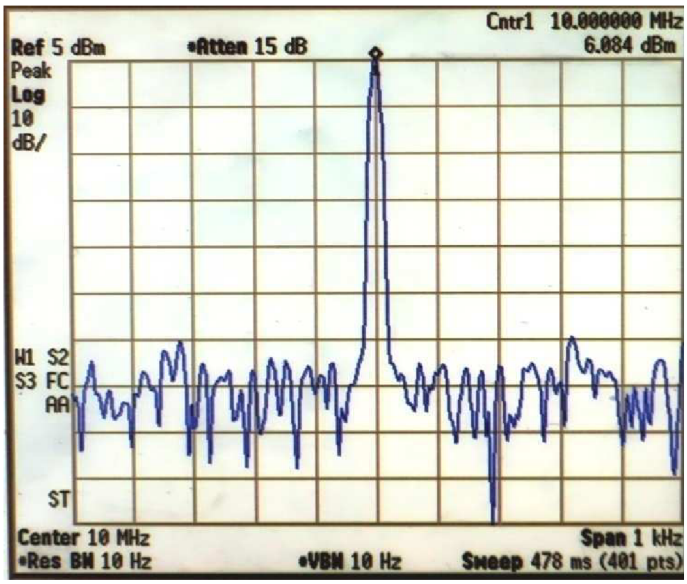
útlumem řádově 0,1 dB/km a v kombinaci s vhodným vysílačem a přijímačem mohou být vyžívány v pásmech 780 nm, 850 nm, 1300 nm, 1200‑1650 nm. Nevýhodu je že od jejich kvality se odráží i vysoká cena. Druhou možností jsou ***plastové optické vlákna POF (Plastic Optic Fibe)***. Tato varianta optických vláken se vyznačuje nízkou cenou, pracují na nižších vlnových délkách například kabely POF dodávané firmou GM electronic mají v pásmu 650 nm typický útlum 200dB/km. Jejich dosažitelná přenosová rychlost je malá. Kombinací předchozích dvou variant jsou ***optické kabely HCS® (Hard-Clad Silica)***, u nichž je jádro vyrobeno z křemene a plášť ze speciálního plastu. Tato vlákna se, při zachování relativně nízké ceny, svými vlastnostmi blíží skleněným optickým vláknům

2. Přenášený referenční signál

Při návrhu synchronizačních modelů jsem vycházel z parametrů spektrálních analyzátorů řady E 7400 od firmy Agilent a signálních generátorů řady SML od firmy ROHDE&SCHWARZ. Oba typy přístrojů mají referenční vstup i výstup opatřeny BNC kolektory s impedancí 50Ω. Samotný referenční signál má podobu harmonického signálu o frekvenci 10 MHz. Podle údajů udávaných výrobcem je na referenčním výstupu spektrálního analyzátoru (Agilent) charakteristická úroveň signálu větší než 0dBm, jako charakteristické rozmezí úrovně signálu na referenčním vstupu udává výrobce -15dBm až +10dBm. Výrobce signálního generátoru (ROHDE&SCHWARZ) v datahdetu udává, že úroveň signálu na referenčním výstupu je větší než 0,5 V, tedy větší než 10 dBm a charakteristická hodnota úrovně signálu na referenčním vstupu je v rozmezí 0,5V až 2V, tedy v rozmezí 10dBm až 16dBm.

Reálné parametry referenčního signálu jsem si ověřil na spektrálním analyzátoru Agilent E 7404 A a signálním generátoru ROHDE&SCHWARZ SML 3. Výstupní referenční signál spektrálního analyzátoru E 7404 A, jehož spektrum je zobrazeno na obrázku *2.1 Spektrum referenčního signálu spektrálního analyzátoru,* má podle předpokladu harmonickou složku na kmitočtu 10 MHz, velikost této složky je 6,084 dBm. Tato hodnota odpovídá parametrům, které udává výrobcem.

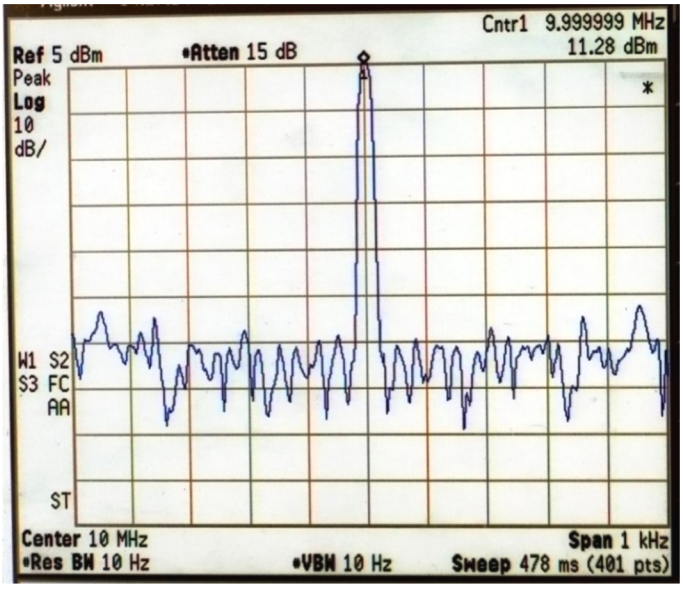
2.1 Spektrum referenčního signálu spektrálního analyzátoru



Spektrum reálného referenčního signálu signálního generátoru SML 3 je zobrazeno na

obrázku *2.2 Spektrum referenčního signálu signálního generátoru*. Úroveň signálu je 11,28 dBm což odpovídá hodnotám udávaným výrobcem.

2.2 Spektrum referenčního signálu signálního generátoru



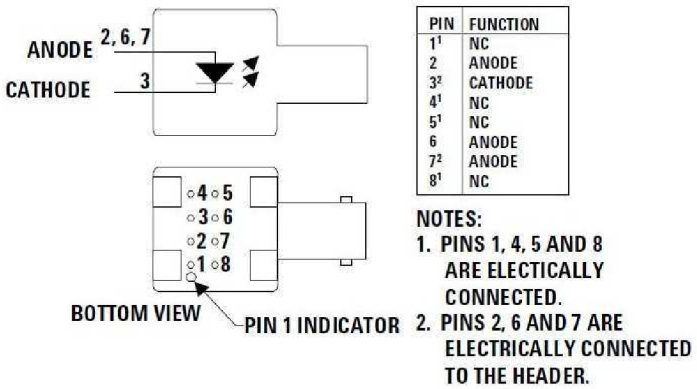
3. Optická přenosová cesta

Pro přenos optické informace jsem vybral součástky ze série Agilent HFBR-0400. Jelikož tyto součástky prozatím ještě nebyly zakoupeny, jsou dále uváděny jen hodnoty udávané výrobcem v Datasheetu pro sérii Agilent HFBR-0400, z něhož jsou převzaty i obrázky použité v této kapitole.

3.1. Vysílač (transmitter)

Všechny vysílače HFBR 14xx obsahují zářič vyrobený z AlGaAs, tento zářič pracuje na vlnové délce 820 nm, tedy v infračervené oblasti. Díky tomu, že vysílače HFBR 14x4

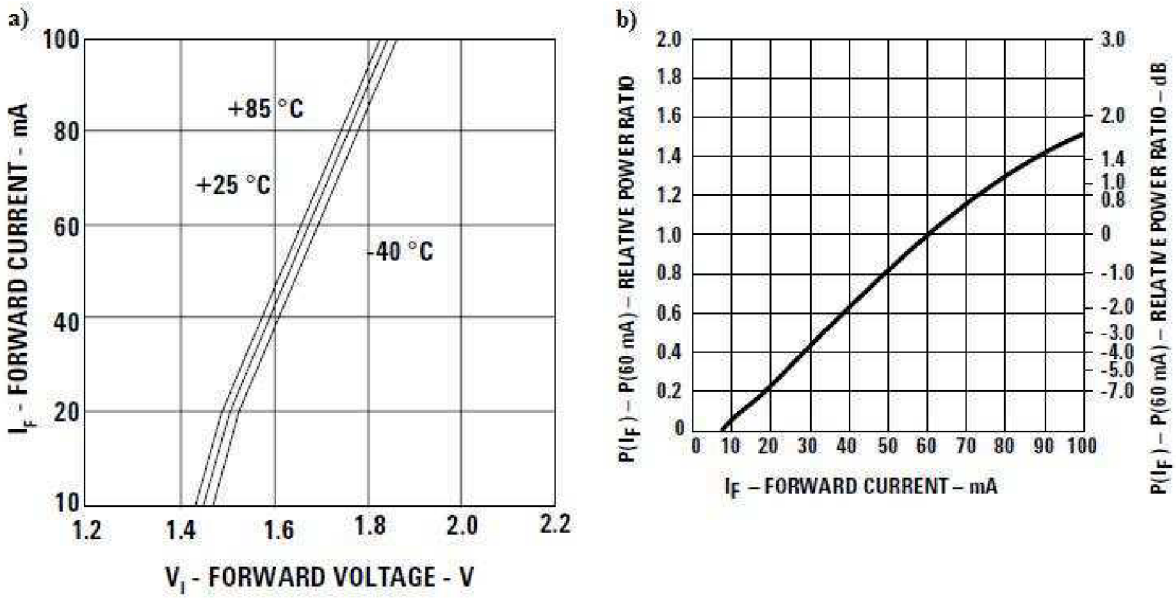
Obrázek 3.1 Zapojení vysílače HFBR 14xx



jsou schopny efektivně zavádět optickou energii do dvou různých optických vláken o rozměrech 50/125 μm nebo 62.5/125μm, vzniká jistá volnost při výběru optického kabelu pro přenosovou cestu. Zapojení zářiče je patrné z obrázku *3.6 Mechanické rozměry ST portu*. Piny označené jako 1, 4, 5 a 8, které jsou v obrázku označeny NC (not connected) jsou navzájem propojeny a nejsou připojeny k zářiči, k pinům 2, 6, 7 je připojena anoda a k pinu 3 katoda zářiče. Jako konkrétní optický vysílač jsem pro navrhované moduly zvolil vysílač HFBR 1414, jenž je uzpůsoben pro přímé propojení s průmyslovým kolektorem typu ST. Rozměry a umístění jednotlivých pinů vysílačů a přijímačů pro konektory ST jsou zobrazeny na obrázku *3.6 Mechanické rozměry ST portu* v následující podkapitole. Ve volt-ampérové charakteristice, která zobrazena v obrázcích *3.2 a)Volt-ampérová charakteristika vysílače* a *3.3 b) Závislost výstupního výkonu na vstupním proudu vysílače*, jsou výrobcem uváděny parametry do hodnoty maximálního stejnosměrného vstupního proudu I_{Fdcmax}= 100mA. Jak jez těchto obrázků patrné lze tyto průběhy považovat přibližně za lineární.

3.2 a)Volt-ampérová charakteristika vysílače

3.3 b) Závislost výstupního výkonu na vstupním proudu vysílače



V obrázku *3.3 b) Závislost výstupního výkonu na vstupním proudu vysílače* je vyzářený výkon zobrazen jako relativní hodnota vztažená vůči vyzářenému výkonu při vstupním proudu I_F=60 mA, skutečná hodnota závisí na použitém optickém vláknu. Typické hodnoty výstupního optického výkonu pro jednotlivá podporovaná optická vlákna, které udává výrobce, jsou zapsány v tabulceTabulka *3.1* výkon HFBR-1414, další výrobcem udávané parametry jsou v tabulce*Tabulka 3.2 provozní parametry* HFBR-1414.

Tabulka 3.1 výkon HFBR-1414

Průměr vlákna Numerická aparatura	Min. dBm	Typ. dBm	Max. dBm	Podmínky
50/125 μm NA = 0.2	-18.8	-15,8	-13,8	T = +25 °C, I_F = 60 mA dc
62,5/125 μm NA = 0.275	-15,0	-12,0	-1,0	
50/125 μm NA = 0.2	-17,3	-13,8	-11,4	T = +25 °C, I_F = 100 mA dc

62,5/125 µm NA = 0.275	-13,5	-10,0	-7,6	

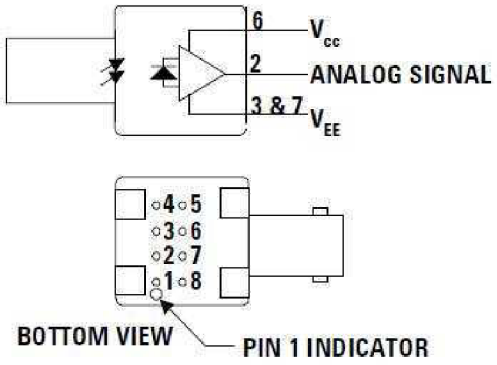
Tabulka 3.2 provozní parametry HFBR-1414

Provozní teplota	Max.	+85 °C
	Min.	-40 °C
Maximální vstupní proud	Špičkový I_{FPK}	200 mA
	Stejnosměrny I_{FDC}	100 mA
Reverzní vstupní napětí	V_{BR}	1,8 V

3.2. Přijímač (Receiver)

K provozu s vysílači HFBR 14xx je určen přijímač HFBR 24x6 pracující do frekvence 125 MHz. Jako konkrétní vysílač jsem zvolil HFBR 2416, který je, stejně jako použitý vysílač, přizpůsoben pro provoz s optickými kabely 50 /125 µm, 62.5/125 µm, 100/140 µm a 200 µm HCS opatřenými konektory typu ST. Tento přijímač obsahující PIN fotodiodu a nízko-šumový integrovaný předzesilovač, převádí optický signál na analogové napětí. Zapojení jednotlivých pinů je zobrazeno na obrázku *3.4 Zapojení jednotlivých pinů přijímače HFBR 24x6*, kde jsou piny 1, 4, 5 a 8 stejně jako u vysílače navzájem propojeny a izolovány od

3.4 Zapojení jednotlivých pinů přijímače HFBR 24x6



PIN	FUNCTION
1[1]	NC
2	SIGNAL
3[2]	V_{EE}
4[1]	NC
5[1]	NC
6	V_{CC}
7[2]	V_{EE}
8[1]	NC

NOTES:
1. PINS 1, 4, 5 AND 8 ARE ISOLATED FROM THE INTERNAL CIRCUITRY, BUT ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO EACH OTHER.
2. PINS 3 AND 7 ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO HEADER

vnitřních obvodů. K pinu 6 je připojen přívod napájecího napětí, jehož hodnota je typicky +5V. Piny 3 a 7 jsou připojeny na záporný pól zdroje a na pinu 2 je vyveden přijímaný signál v podobě analogového napětí. V následující tabulce 3.3 *typické výstupní hodnoty přijímače HFBR 24x6* jsou uvedeny některé parametry optického přijímače při napájecím napětí 4.75 V ≤ Vcc ≤ 5.25 V.

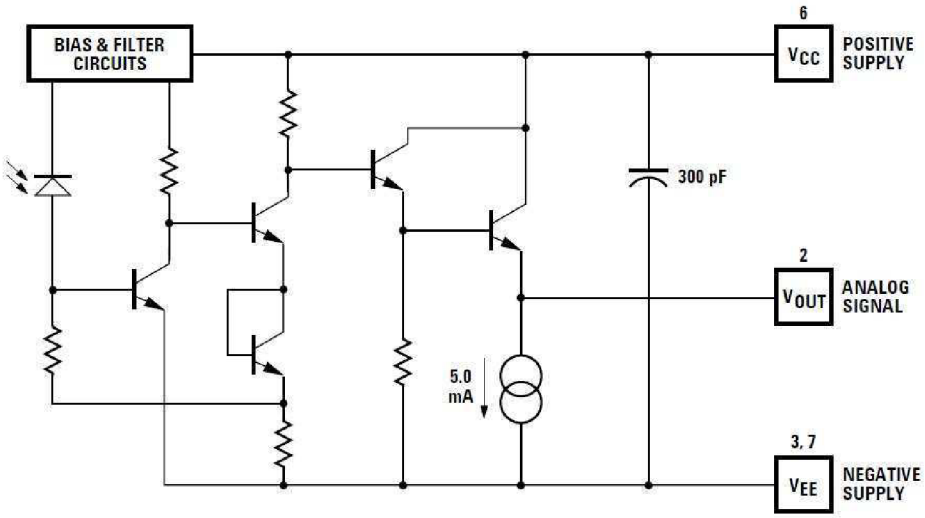
Tabulka 3.4 typické výstupní hodnoty přijímače HFBR 24x6

parametr	Min.	Typ.	Max.	jednotka	podmínky
Citlivost R_P	5,3	7	9,6	mV/µW	T_A = +25 °C, λ=820nm, f=50 MHz
Výstupní impedance Z_0		30		Ω	Test f = 50MHz

Výstupní šum V_{NO}			0,7	mV	Nefiltrovaná šířka pásma, $P_R = 0\ \mu W$
ss výstupní napětí $V_{O\,dc}$	-4,2	-3,1	-2,4	V	$P_R = 0\ \mu W$
Napájecí proud		9	15	mA	Zátěž výstupu $R_{LOAD} = 510\ \Omega$

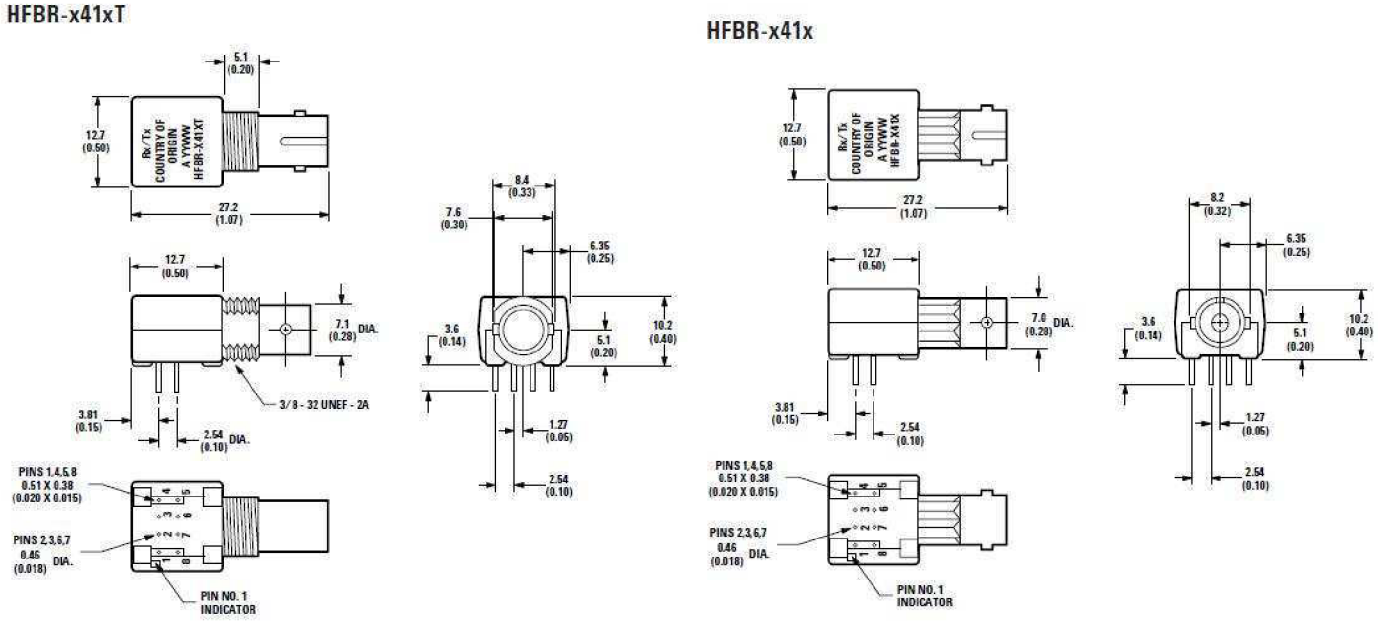
Na obrázku *3.5 Zjednodušené vnitřní zapojení přijímače HFBR 24x6* je ukázáno zjednodušené vnitřní zapojení integrovaného předzesilovače v přijímači HFBR 24x6.

3.5 Zjednodušené vnitřní zapojení přijímače HFBR 24x6



Vysílač HFBR 1414 a přijímač HFBR 2416 jsou určené pro ST konektory mají totožné mechanické rozměry a rozmístění jednotlivých pinů, ty jsou zobrazeny na obrázku *3.6 Mechanické rozměry ST portu*. Varianta T označuje komponenty určené pro montáž do panelu.

3.6 Mechanické rozměry ST portu



Výpočet velikosti signálu na výstupu optického přijímače

Pro přijímač HFBR-2416 udává výrobce typickou citlivost 7 mV/µW.
Měrný útlum u běžně používaných optických vláknech rozměrech 50/125µm a 62.5/12µm, se pohybuje kolem 2,5 až 3 dB/km. Pro použití k navrhovaným synchronizačním modulům se předpokládá užití optického kabelu přibližně do délky 10m, pro tuto délku lze tedy měrný útlum kabelu zanedbat.

Velikost signálu na výstupu optického vysílače pro typické hodnoty výkonu vysílaného optickým vysílačem, při použití vláken 50/125µm a 62.5/12µm.

$$P_{vys(W)} = 10^{\frac{Pvys_{(dBm)}}{10}} = 10^{\frac{-13,8}{10}} = 41,687\ \mu W$$

$$V_{OUT} = P_{vys(W)} * 7 = 41,687 *= 291,809\ mV$$

$$P_{vys(W)} = 10^{\frac{Pvys_{(dBm)}}{10}} = 10^{\frac{-10,0}{10}} = 100,0\ \mu W$$

$$V_{OUT} = P_{vys(W)} * 7 = 100 * 7 = 700\ mV$$

Velikost signálu na výstupu optického vysílače pro minimální hodnoty výkonu vysílaného optickým vysílačem, při použití vláken 50/125µm a 62.5/12µm.

$$P_{vys(W)} = 10^{\frac{Pvys_{(dBm)}}{10}} = 10^{\frac{-17,3}{10}} = 18,621\ \mu W$$

$$V_{OUT} = P_{vys(W)} * 7 = 18,621 * 7 = 130,347\ mV$$

$$P_{vys(W)} = 10^{\frac{Pvys_{(dBm)}}{10}} = 10^{\frac{-13,5}{10}} = 44,668\ \mu W$$

$$V_{OUT} = P_{vys(W)} * 7 = 44,668 * 7 = 312,676\ mV$$

Pro vlákno 50/125µm je tedy výstupní napětí minimálně rovno U_{OUTmin}= 130 mV a pro vlákno 62.5/12µm U_{OUTmin}= 313 mV.

3.3. Optický kabel

Synchronizační moduly byly konstruovány s pomocí simplexního kabelu s více vidovým vláknem 50/125 µm „ FRNC BELDEN G7101 NH 1*50/125 “ o délce přibližně 6m. bohužel jelikož se jedná o dnes už nevyráběný kabel, nepodařilo se mi o něm zjistit další bližší informace. Proto z rozměru vlákna předpokládám, že bude mít obdobné vlastnosti jako dnes dostupná vlákna stejného rozměru.

Reálné vlastnosti optické přenosové cesty

V tabulce *Tabulka 3.5 změřené vlastnosti optické přenosové* cesty jsou vyneseny hodnoty změřené při použití optického kabelu FRNC BELDEN G7101, optického vysílače HFBR-1414 a optického přijímače HFBR-2416.

Tabulka 3.5 změřené vlastnosti optické přenosové cesty

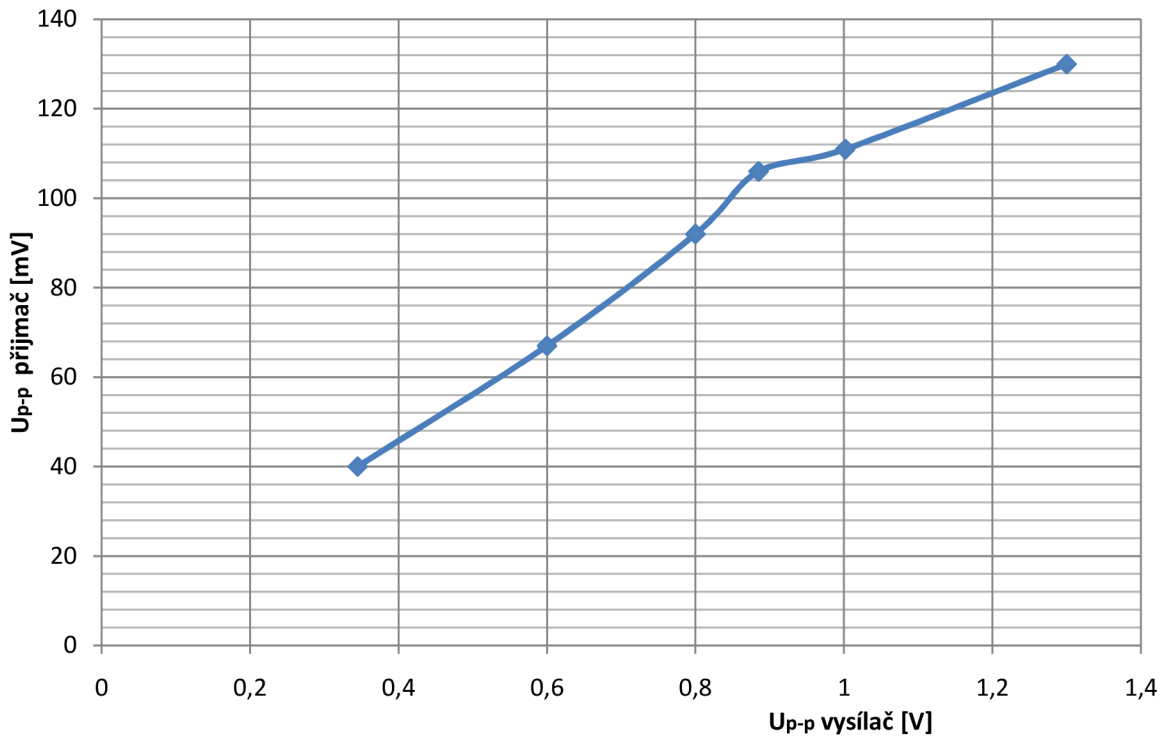
vysílač		přijímač		Útlum signálu [dB]
Up-p [mV]	Stejnosměrná složka [V]	Up-p [mV]	Stejnosměrná složka [V]	
345	1,62	40	1,8	18,7

600	1,53	67	1,8	19,0
800	1,53	92	1,8	18,8
885	1,55	106	1,8	18,4
1002	1,52	111	1,8	19,1
1300	1,50	130	1,8	20,0

$$Útulum = \left|20log\left(\frac{U_{p-p\ Přijímač}}{U_{p-p\ vysílač}}\right)\right| = \left|20log\left(\frac{92}{800}\right)\right| = 18{,}8\ dB$$

Jak je ze získaných dat patrné, na výstupu přijímače je při připojeném napájení a nulovém přenášeném signálu stejnosměrné napětí o velikosti 1,8 V. Při vstupním signálu o velikosti U_{p-p}= 1,002 V jsem z průběhů signálu zjistil, že signál začíná být nepatrně zkreslen kolem minimálních hodnot výstupního signálu. Při U_{p-p}= 1,3 V už je kreslení relativně výrazné. Příčinnou tohoto jevu je přibližování minimální hodnoty k prahovému napětí optického vysílače. Tento jev lze potlačit změnou polohy pracovního bodu vysílače, tedy zvýšením stejnosměrného napětí přiváděného k vysílači. Tím se však více přiblížíme k maximálnímu špičkovému proudu vysílače a zvýšíme tak jeho namáhání.

3.7 Závislost výstupního signálu na vstupním signálu



Na obrázku je zobrazen průběh závislosti signálu na výstupu optického přijímače na signálu přiváděném na optický vysílač při použití dříve popsaného optického kabelu. Velikost výstupního signálu se lineárně mění s vstupním signálem. Při vstupním signálu 1V a 1,3V je parný zlom a tedy nižší přenos zapříčiněný zkreslením signálu v nelineární části V-A charakteristiky vysílače.

4. Návrh jednotlivých modulů

Tato kapitola se zabývá návrhem a simulacemi obvodů pro úpravu signálu vstupujícího do optického vysílače a obvody potřebnými pro rekonstrukci referenčního signálu z výstupního signálu optického přijímače.

4.1. Vysílací modul

Při předpokladu, že vysílací modul bude připojen k referenčnímu výstupu signálního generátoru ROHDE&SCHWARZ z řady SML, může být na vstupu vysílacího modulu, podle údajů udávaných výrobcem signálního generátoru, napětí 0,5 V až 2 V. Změřená úroveň referenčního signálu na signálním generátoru ROHDE&SCHWARZ SML 3 byla 11,28 dBm, což po přepočtu na napětí odpovídá hodnotě U_R= 0,82 V.

$$P(W) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}} * 10^{-3} = 10^{\frac{11,28}{10}} * 10^{-3} = 13,4\,mW$$

$$U_R = \sqrt{R * P} = \sqrt{50 * 0,0134} = 0,82\,V$$

4.1.1. Schéma zapojení vysílacího modulu

Pro převod referenčního signálu do optického vlákna je ve vysílacím modulu využíván optický vysílač HFBR 1414 popsaný v předchozí kapitole. Jak vyplývá z charakteristik optického vysílače udávaných výrobcem, leží vhodný pracovní bod vysílače přibližně v okolí 1,65 V, při čemž prochází vysílačem proud přibližně o velikosti 50 mA. Při těchto podmínkách by měl být vyzářený výkon kolem -19 dBm.

4.1 Schéma zapojení vysílacího modulu

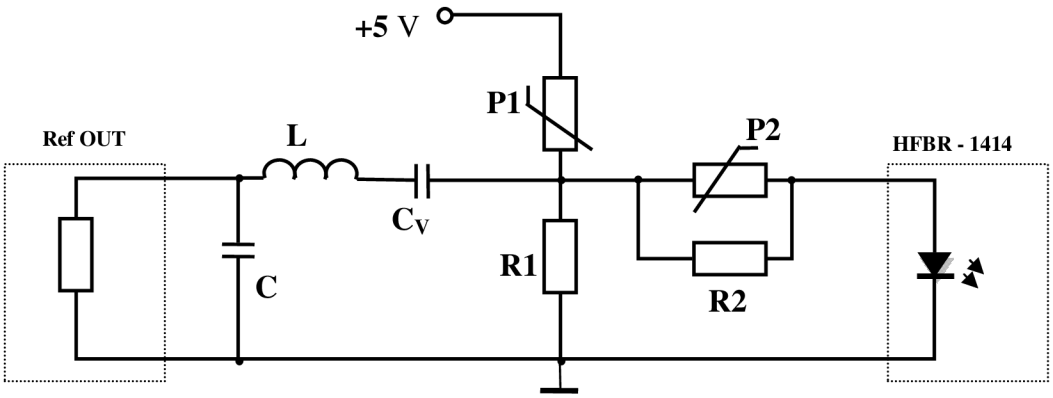
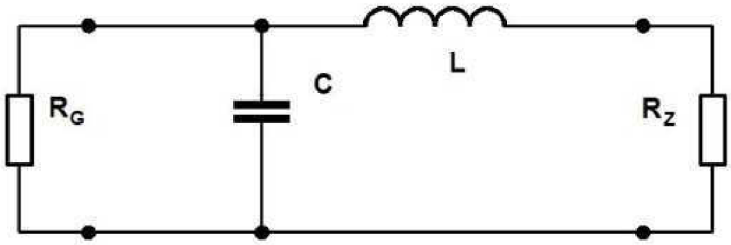


Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku *4.1 Schéma zapojení vysílacího modulu*, kde kondenzátor C a cívka L tvoří reaktanční článek Γ. Rezistor R1 a odporový trimr P1 slouží k nastavení pracovního bodu a na paralelní kombinaci rezistoru R2 a odporového trimru P2 vzniká potřebný útlum. Aby nedocházelo k pronikání stejnosměrné složky z odporového děliče R1 P1 na referenční výstup signálního generátoru, je mezi reaktanční článek a odporový dělič R1 P1 zařazen sériový kondenzátor C_B.

4.1.1. Impedanční přizpůsobení

Pro správnou funkci je také zapotřebí přizpůsobit impedanci referenčního výstupu signálního generátoru a impedanci vysílací části. Jelikož by použití odporového článku vedlo k příliš velkým ztrátám, zvolil jsem reaktanční článek Γ, jehož parametry lze určit pomocí rovnic (4.1) až (4.3). Zapojení článku je na obrázku *4.2 Zapojení reaktančního Γ článku pro RG>RZ.*

4.2 Zapojení reaktančního Γ článku pro R_G>R_Z



$$Q = \sqrt{\frac{R_G}{R_Z} - 1} \quad C = \frac{Q}{\omega_0 R_G} \quad L = \frac{R_Z Q}{\omega_0} \qquad (4.1, 4.2, 4.3)$$

4.1.2. Výpočet hodnot

Z lineární části V-A charakteristiky optického vysílače lze určit jeho dynamický odpor.

$$R_d = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{1{,}8 - 1{,}5}{0{,}09 - 0{,}02} = 4{,}3\Omega$$

Hodnotu celkového odporu paralelní kombinace rezistoru R2 a odporového trimru P2 lze vypočítat pomocí Ohmova zákona z požadovaného útlumu (úbytku napění na rezistoru) a proudu vstupujícího do vysílače. Předpokládáme-li tedy vstupní signál z referenčního výstupu signálního generátoru o velikosti 0,82 V, platí pro požadovanou maximální střídavou hodnotu na vysílači 400 mV:

$$R2 \parallel P2 = \frac{U_{R3}}{I_{F\,max}} = \frac{0{,}82 - 0{,}4}{0{,}1} = 4{,}2\ \Omega$$

Pro maximální předpokládané vstupní napětí U_{REF}= 2 V je R2||P2= 16 Ω.

Z důvodu proměnné hodnoty úrovně napětí na referenčních vstupech jednotlivých přístrojů, jsem zvolil paralelní kombinaci rezistoru R2 a odporového trimru P2, díky čemuž je pomocí trimru P2 možné nastavit požadovanou velikost napětí na optickém vysílači pro různé vstupní úrovně.

Pro zvolené hodnoty rezistoru R2= 20 Ω a odporového trimru P2= 100 Ω je možné měnit celkový odpor jejich paralelního spojení přibližně v rozmezí od 0,5 Ω do 16,7 Ω.

Výpočet odporového děliče

Napětí U_N ve vzorci vyjadřuje napájecí napětí. Hodnotu rezistoru R1 jsem zvolil 1kΩ, takže hodnota rezistoru R1 je 2,03kΩ.

$$U = U_N \frac{R1}{P1 + R1} \Rightarrow 1{,}65 = 5 * \frac{R1}{P1 + R1}$$

$$P1 = \frac{1 - 0{,}33}{0{,}33} * R2 = 2{,}03\ K\Omega$$

Pro P1 jsem použil místo pevného rezistoru odporový trimr o velikosti 5 KΩ, kterým lze nastavit požadovaný pracovní bod.

Výpočet reaktančního článku

Nejprve je potřeba určit impedanci vysílače R_Z.

$$R_Z = R2 \parallel (R_d + R3) = \frac{1000*(7{,}4+4{,}3)}{1000+7{,}4+4{,}3} = 11{,}56\Omega$$

Hodnoty indukčnosti a kapacity tvořící reaktanční článek se vypočítají podle rovnic (4.1), (4.2) a (4.3)

$$Q = \sqrt{\frac{R_G}{R_Z} - 1} = \sqrt{\frac{50}{11{,}56} - 1} = 1{,}82$$

$$C = \frac{Q}{\omega_0 R_G} = \frac{Q}{2\pi f R_G} = \frac{1{,}82}{2\pi 10*10^6*50} = 580\ pF$$

$$L = \frac{R_Z Q}{\omega_0} = \frac{R_Z Q}{2\pi f} = \frac{11{,}56*1{,}82}{2\pi 10*10^6} = 0{,}34\ \mu H$$

Výpočet blokovacího kondenzátoru

Jelikož induktor L, použitý v Γ článku, a blokovací kondenzátor C_B spolu tvoří sériový rezonanční obvod je zapotřebný zvolit vhodnou velikost kapacitou tak C_B aby zpracovávaný referenční signál nebyl tímto sériovým rezonančním obvodem blokován.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{4.4}$$

Za pomocí rovnice (4.4) pro rezonanční frekvenci sériového rezonačního obvodu lze po dosazení následujících parametrů vypočítat potřebnou kapacitu C_B. rezonanční kmitočet odpovídá kmitočtu zpracovávaného referenčního signálu, tedy f_0= 10 MHz. Za L jsem dosadil hodnotu indukčnosti reálné cívky vybrané z výrobní řady.

$$C = \left(\frac{1}{2\pi f_0}\right)^2 \frac{1}{L} = \left(\frac{1}{2\pi * 10 * 10^6}\right)^2 \frac{1}{0{,}33 * 10^{-6}} = 767{,}58 * 10^{-12} = 767{,}58\ pF$$

Konkrétní hodnotu kapacitou C_B z výrobní řady jsem zvolil kondenzátor 820 pF.

Po dosazení hodnot součástek použitých v reálném zapojení do vzorce (4.4), získáme rezonační frekvenci sériového rezonačního obvodu v reálném zapojení.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0{,}33 * 10^{-6} * 820 * 10^{-12}}} = 10{,}144\ MHz$$

Pokud si pro sériový rezonanční obvod spočítáme podle rovnice (4.5) činitel jakosti Q dostaneme z rovnice (4.6) šířku pásma pro pokles o 3 dB pro zvolený induktor jsem z katalogových údajů zjistil velikost jeho sériového odporu R_S=0,12 Ω.

$$Q = \frac{1}{R_S}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{0{,}12}\sqrt{\frac{0{,}33*10^{-6}}{820*10^{-12}}} = 167{,}2 \tag{4.5}$$

$$B = \frac{f_0}{Q} = \frac{10{,}144*10^6}{167{,}2} = 60{,}670\ KHz \tag{4.6}$$

Z důvodu správného umístění pracovního bodu vysílače je do obvodu přiváděno stejnosměrné napětí U_{offset} = 1,65 V. napětí na kondenzátoru C_B tedy může dosáhnout hodnot:

$$U_{CR} = -jQU = -j167{,}2 * 1{,}65 = 275{,}88\ V$$

Z tohoto důvodu je zapotřebí zvolit kondenzátor C_B dimenzovaný na dostatečně velké napětí a to i pro případné zvýšení hodnoty U_{offset} . Pro použití v zapojení jsem zvolil kondenzátor dimenzovaný pro 500 V.

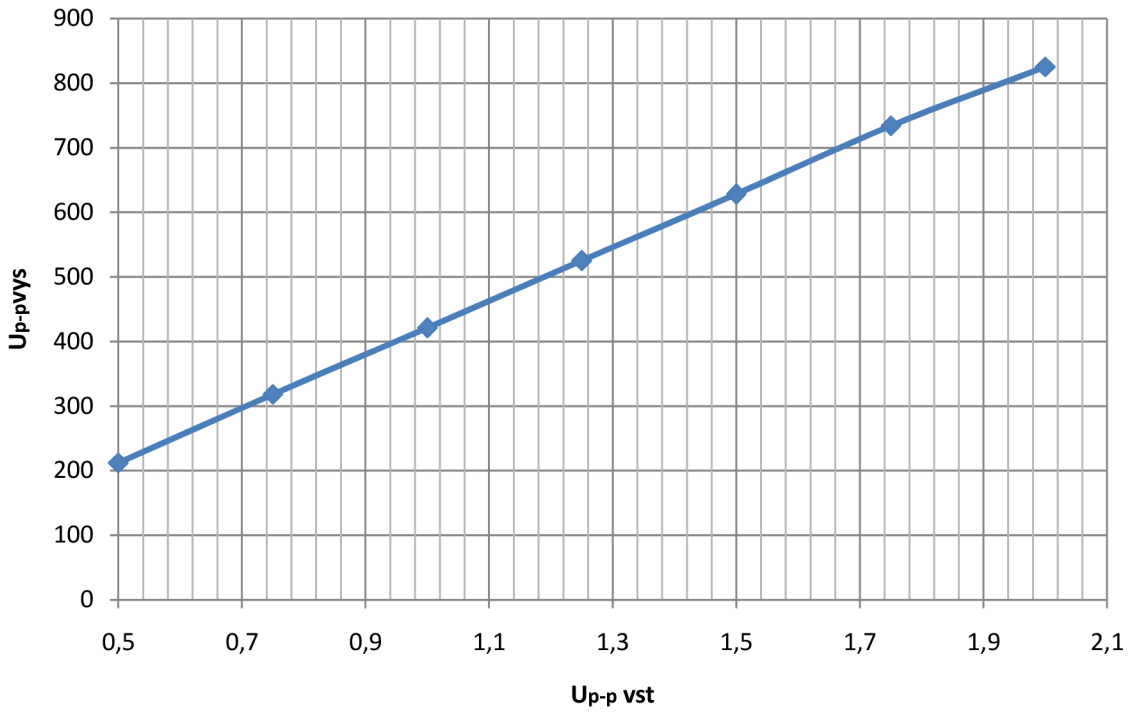
4.1.3. Naměřené hodnoty

Následující hodnoty byly naměřeny na zhotoveném vysílacím modulu.

Tabulka 4.1 Závislost napětí na vysílači na velikosti vstupního napětí

$U_{P\text{-}Pvst}$ [mV]	$U_{P\text{-}Pvyst}$ [mV]	U_{ss} [V]	Ku [dB]
500	212	1,65	-7,45
750	318	1,65	-7,45
1000	421	1,65	-7,51
1250	525	1,65	-7,54
1500	628	1,65	-7,56
1750	734	1,65	-7,55
2000	825	1,65	-7,69

4.3 Charakteristika závislosti napětí na vysílači na vstupním napětí



V tabulce*Tabulka 4.1 Závislost napětí na vysílači na velikosti vstupního* napětí jsou zaznamenány hodnoty střídavého napětí U_{P-P} na vysílači při různém napětí přiváděném na vstup modulu spolu s velikostí stejnosměrného napětí U_{ss}, které je na vysílač přiváděno pomocí odporového děliče R1P1 a přenosem napětí vyjádřeném v decibelech. Závislost výstupního střídavého napětí (napětí na optickém vysílači) na vstupním napětí vysílacího modulu, která je vynesena v obrázku *4.3 Charakteristika závislosti napětí na vysílači na vstupním napětí*, je lineární.

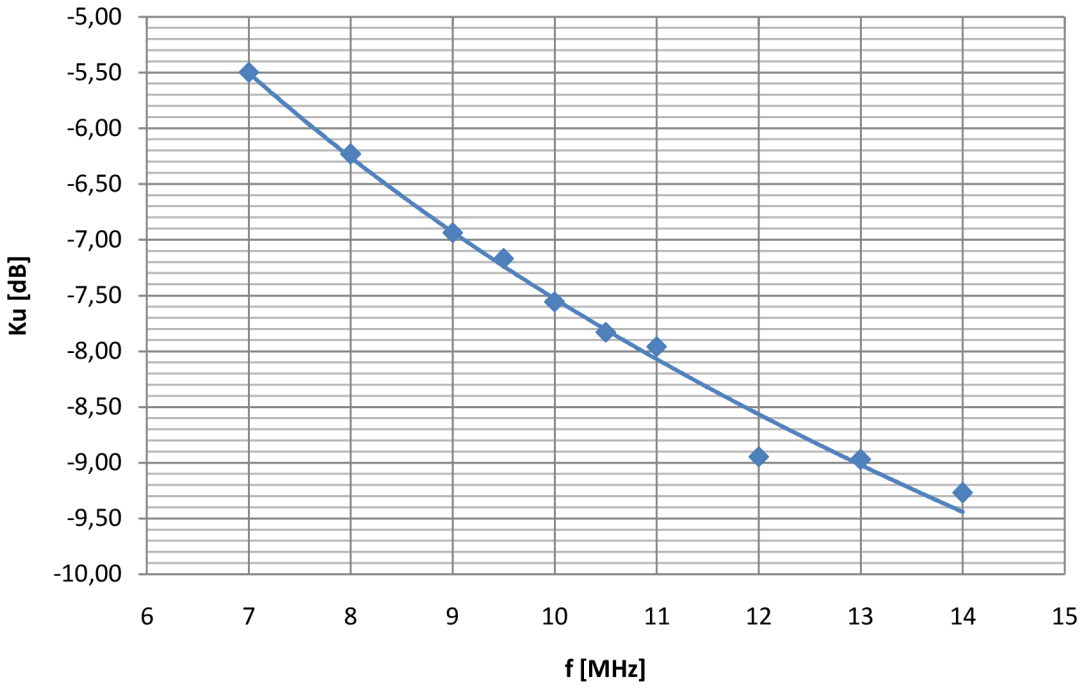
V tabulce*Tabulka 4.2 Závislost napětí na vysílači na* kmitočtu jsou zapsány hodnoty závislosti napětí na optickém vysílači na frekvenci signálu pro vstupní napětí $U_{p-pvstup}$= 1 V. V obrázku *4.4 Charakteristika přenosu napětí vysílacího modulu na kmitočtu* je zobrazena závislost přenosu napětí vysílacího modulu na kmitočtu signálu.

Tabulka 4.2 Závislost napětí na vysílači na kmitočtu

f [MHz]	$U_{P-Pvyst}$ [mV]	U_{ss} [V]	Ku [dB]
7	531	1,65	-5,50
8	488	1,65	-6,23
9	450	1,65	-6,94
9,5	438	1,65	-7,17
10	419	1,65	-7,56
10,5	406	1,65	-7,83
11	400	1,65	-7,96
12	357	1,65	-8,95
13	356	1,65	-8,97
14	344	1,65	-9,27

$$K_{u(dB)}=20\log\left({}^{Uvys}/_{Uvst}\right)=20\log\left({}^{0,531}/_{1}\right)=-5,5\ dB$$

4.4 Charakteristika přenosu napětí vysílacího modulu na kmitočtu

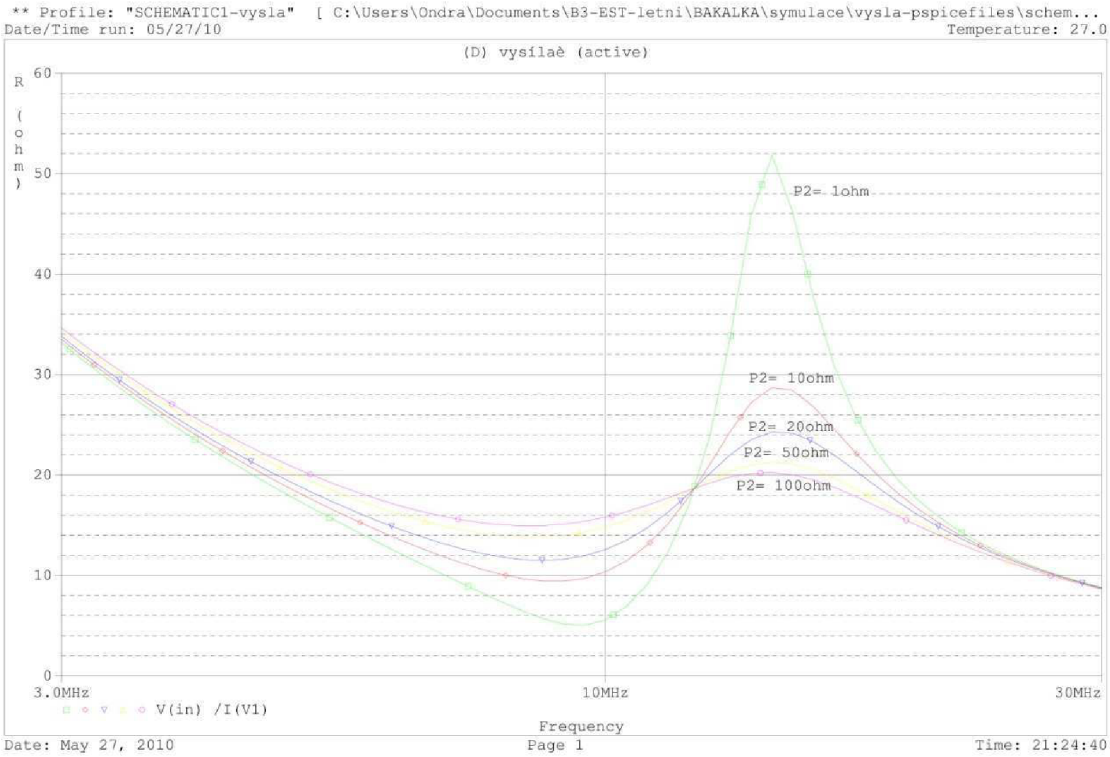


Vysoký útlum je zapříčiněn chybným návrhem článku pro impedanční přizpůsobení. Jelikož jsem při návrhu impedančního přizpůsobení zanedbal blokovací kondenzátor C_B a použil článek Γ pro přizpůsobení reálných impedancí. Problémem je že, při hodnotách kapacity C_B pro něž je ji možno (stovky nF) zanedbat vzniká velký útlum na sériovém rezonačním obvodu, který spolu tvoří cívka L článku Γ a kondenzátor C_B. A pro hodnotu kapacity C_B, při níž je kmitočet referenčního signálu v blízkosti rezonančního kmitočtu sériového rezonančního kmitočtu (770 pF), dochází k posuvu frekvence impedančního přizpůsobení a útlumu na rozdílu impedancí. Frekvenční charakteristika impedančního přizpůsobení, při vhodném C_B pro sériový rezonační obvod, jsou zobrazeny v následující simulaci.

Pro přepokládaný vstupní signál s úrovní 0,82 V z referenčního výstupu signálního generátoru je vysílací modul schopný pracovat i se zmíněnou chybou.

4.1.4. Simulace

Následující obrázek zobrazuje výsledky získané pomocí AC analýzy v programu PS pice. Na obrázku je zobrazena simulace závislosti vstupního odporu vysílacího modulu na frekvenci signálu. Pomocí funkce „parametric sweep“ jsou zobrazeny průběhy pro tři hodnoty oporu trimru P2. Na svislé ose grafu je vynesena impedance a na vodorovné frekvence signálu.

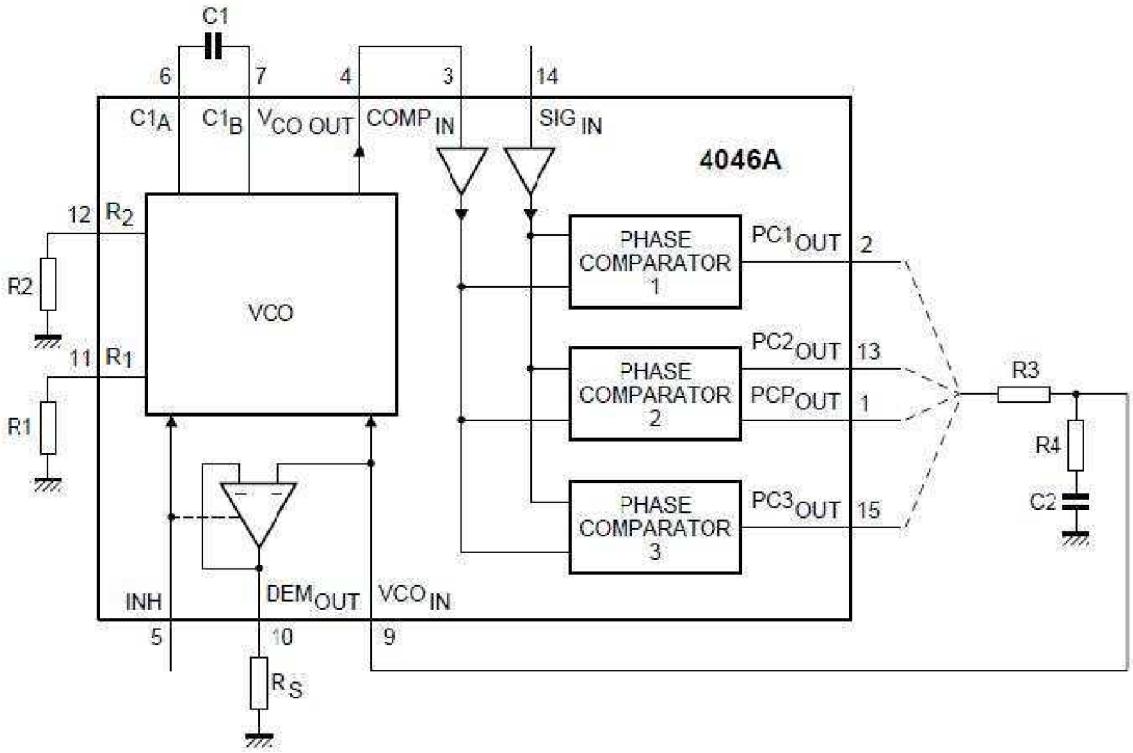


4.2. Návrh přijímacího modulu

Jelikož změřené hodnoty napětí na výstupu optického přijímače jsou pro referenční vstup relativně malé, rozhodl jsem se u přijímacího modulu využít, jako zdroje referenčního signálu, fázový závěs (PLL Phase Lock Loop). Ten pracuje v režimu zachycení, tedy jako zdroj signálu řízený analogovým signálem z výstupu optického přijímače HFBR 2416, popsaného v předchozí kapitole.

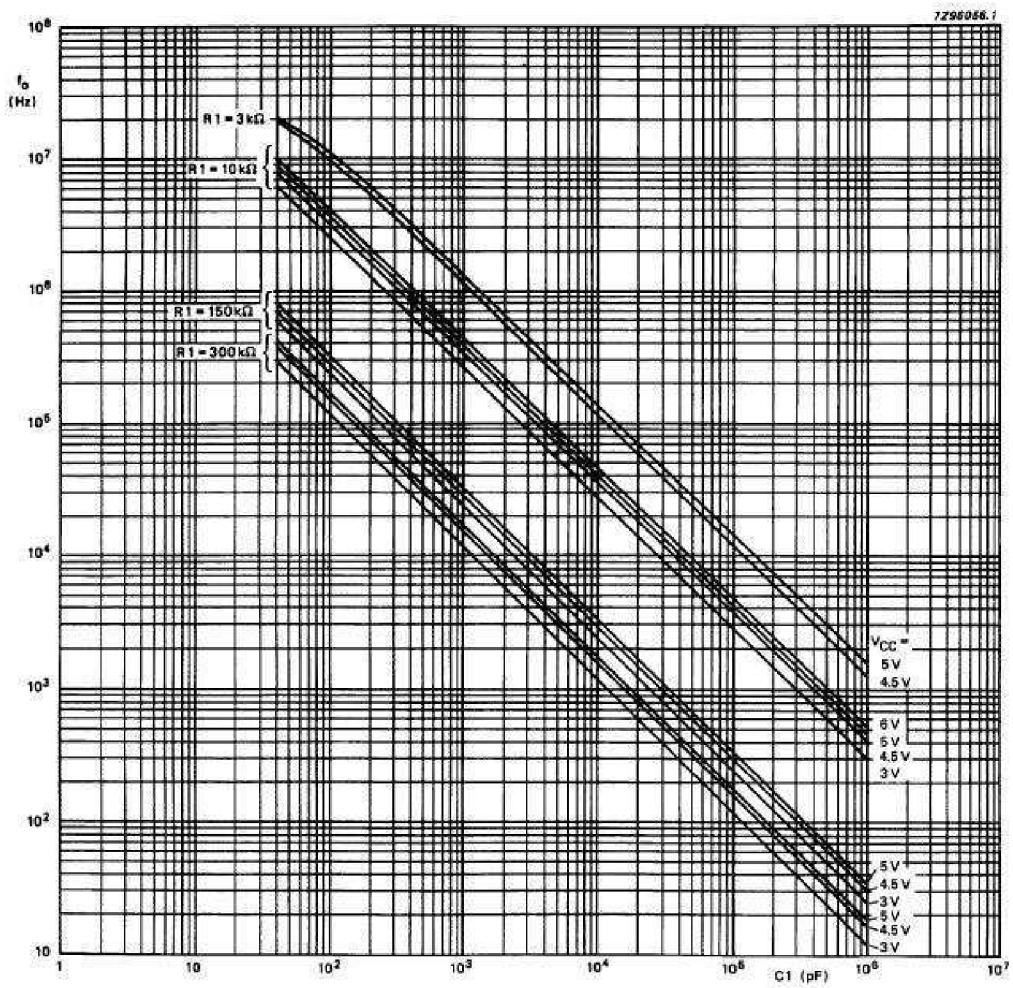
Pro konkrétní použití v přijímacím modulu jsem vybral fázový závěs HCT 4046A, vyráběný firmou Philips Semiconductors. Tento obvod je tvořen napětím řízeným oscilátorem (VCO) a třemi různými komparátory, které mají společné oba vstupy připojené k vstupním pinům přes společné zesilovače.Vnitřní struktura HCT 4046A je zobrazena na obrázku *4.5 Vnitřní struktura HC/HCT 4046A*.

4.5 Vnitřní struktura HC/HCT 4046A



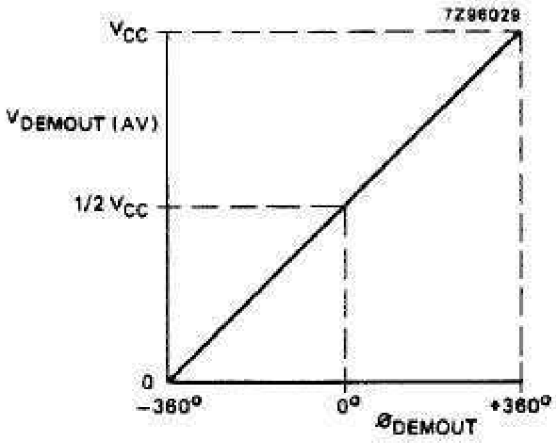
Oscilátor VCO potřebuje k správné funkci externí kondenzátor C1, externí rezistor R1 a popřípadě i R2, pomocí něhož je možné vkládat na výstup VCO frekvenční offset. Rezistor R1 a kondenzátor C1 slouží k nastavení frekvenčního rozsahu VCO. Charakteristika závislosti střední frekvence f_0 na hodnotě C1 a R1 je zobrazena na obrázku *4.6 Typické hodnoty střední frekvence f0 VCO na kapacitě C1*. Tato charakteristika platí při těchto podmínkách: R2=∞ , $V_{VCOIN}=1/2V_{VCO}$ a vstup INH je připojen na zem. Z charakteristiky lze pro střední frekvenci oscilátoru VCO f_0=10 MHz přibližně určit hodnoty R1= 10 kΩ a C1= 400 pF.
Na výstupu napětím řízeného oscilátoru VCO_{OUT} je podle údajů uváděných výrobcem , při napájecím napětí 4,5 V a teplotě 25 °C, minimální velikost signálu 3,98 V a jako typickou hodnotu udává výrobce 4,32 V.

4.6 Typické hodnoty střední frekvence f_0 VCO na kapacitě C1



Pro funkci celého obvodu je nutné připojit mezi výstup používaného komparátoru a vstup pro řídícího napětí VCO externí filtr smyčky typu dolní propust prvního nebo druhého řádu. Pro navrhovanou aplikaci je nejvhodnější komparátor 2, pro který platí, že pokud je rozdíl mezi fázemi vstupních signálů ($COMP_{IN}$, SIG_{IN}) roven 0, je na jeho výstupu ($PC2_{OUT}$) napětí o velikosti poloviny napájecího napětí.

4.7 Závislost výstupního napětí komparátoru 2 na rozdílu fází vstupních signálů

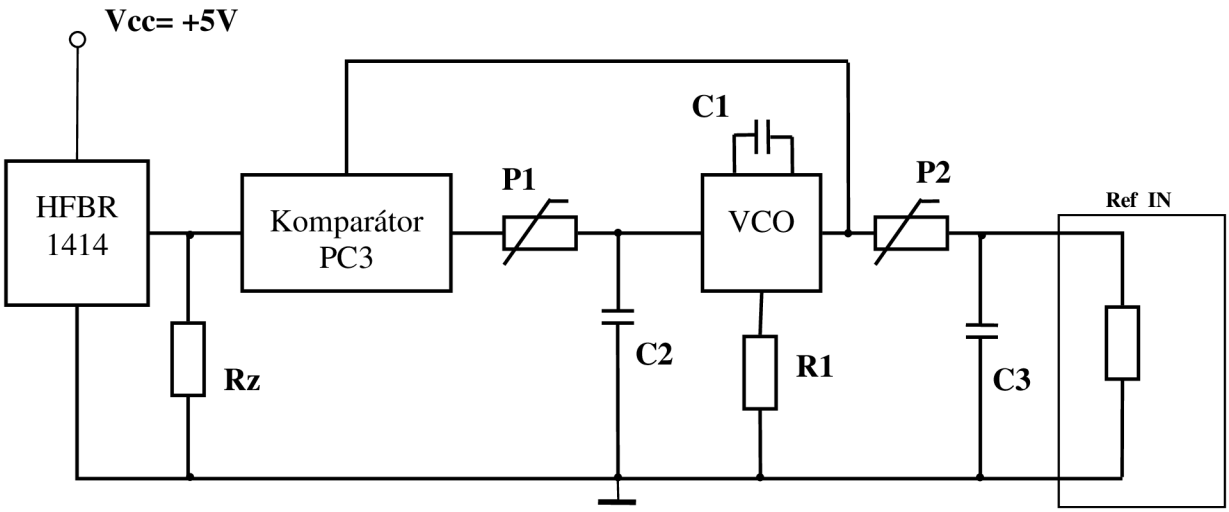


Kmitočet přenášeného referenčního signálu by měl mít astabilní hodnotu, fázový závěs proto nemusí reagovat na rychlé změny řídícího signálu. Proto jsem pro externí filtr smyčky zvolil jako dostačující variantu dolní propust prvního řádu RC.

4.2.1. Schéma zapojení

Kompletní zapojení přijímacího modulu je zakresleno na obrázku *4.8 Schéma zapojení přijímacího modulu*. Rezistor R_Z připojený k výstupu optického přijímače HFBR-2416 zajišťuje výrobcem stanovenou minimální zátěž na výstupu optického přijímače. Jeho hodnota je R_Z= 500 Ω. Externí filtr smyčky fázového závěsu je realizován odporovým trimrem P1 a kondenzátorem C2. Rezistor R1 a kondenzátor C1 připojené k napětím řízenému oscilátoru VCO slouží k nastavení střední hodnoty frekvence f_0 VCO.

4.8 Schéma zapojení přijímacího modulu



Mezi výstup VCO a výstup vysílacího modulu je připojena dolní propust RC tvořená odporovým trimrem P2 a kondenzátorem C3. Tato dolní propust složí k utlumení signálu generovaného v VCO na hodnotu vhodnou pro referenční vstup „ REF In “ spektrálního analyzátoru.

4.2.2. Výpočty hodnot

Pro externí filtr smyčky fázového závěsu tvořeného P1 a C2 jsem zvolil elektrolytický kondenzátor s kapacitou C2= 1 μF dimenzovaný na 50V a oporový trimr o velikosti P1= 25 KΩ. Mezní kmitočet f_m je tedy podle následujícího vztahu

$$f_m = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC} \tag{4.7}$$

$$f_{m_{min}} = \frac{1}{R_{max}C} = \frac{1}{25 * 10^3 * 1 * 10^{-6}} = 40\ Hz$$

$$f_{m_{min}} = \frac{1}{R_{min}C} = \frac{1}{2 * 1 * 10^{-6}} = 500\ KHz$$

Minimální hodnota oporového trimru je přibližně 2Ω, mezní kmitočet je tedy možné měnit v rozsahu přibližně 40 Hz až 500 KHz.

Jelikož dolní propust tvořená kondenzátorem C3 a oporovým trimrem P2 slouží k utlumení signálu z VCO na vhodnou hodnotu, musí se její mezní kmitočet pohybovat v okolí kmitočtu přenášeného referenčního signálu tedy kolem kmitočtu 10MHz. Na referenčním vstupu spektrálního analyzátoru Agilent řady E 7400 je maximální předpokládaná úroveň signálu +10 dBm. Pokud tedy zvolíme že, na referenčním vstupu analyzátoru budeme přivádět hodnotu těsně pod touto hranicí například +8 dBm, tedy podle následujícího přepočtu 0,56 V.

$$P(W) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}} * 10^{-3} = 10^{\frac{8}{10}} * 10^{-3} = 6{,}31\, mW$$

$$U_R = \sqrt{R * P} = \sqrt{50 * 0{,}00631} = 0{,}56\, V$$

Při typické hodnotě velikosti signálu na výstupu VCO U_{VCOout}= 4,32 V, bude podle rovnice (4.8) zapotřebí útlum o velikosti 17,75 dB.

$$Útulum = \left|20log\left(\frac{U_{výs}}{U_{vst}}\right)\right| = \left|20log\left(\frac{0{,}56}{4{,}32}\right)\right| = 17{,}75\, dB \qquad (4.8)$$

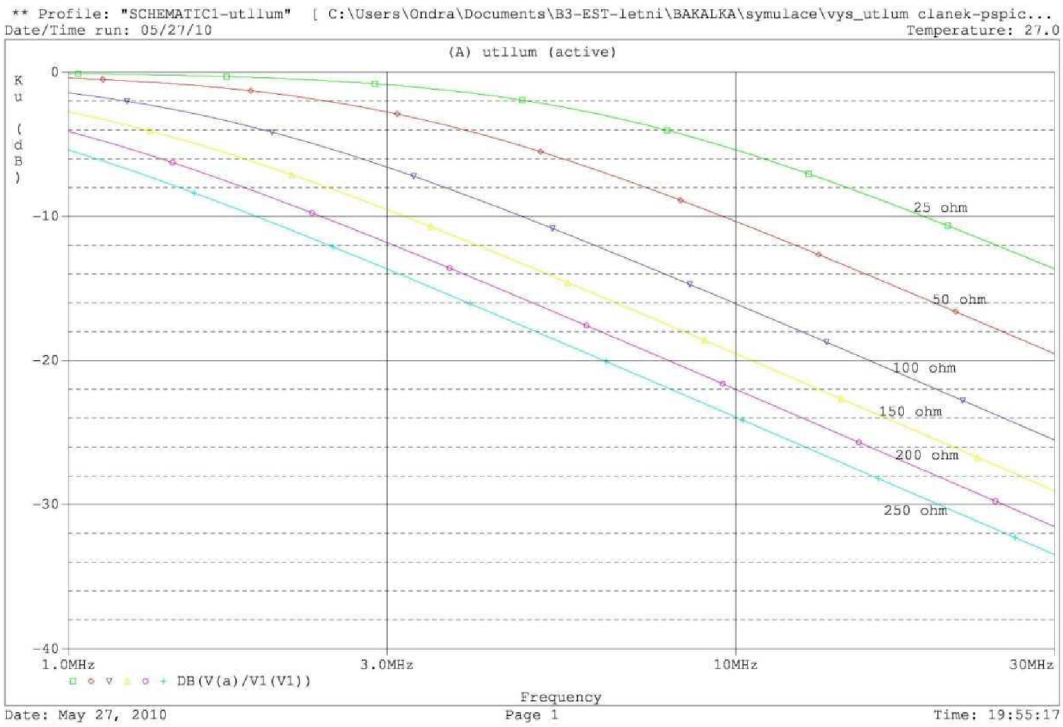
Pro tento útlum by měl být dostačující mezní kmitočet f_{m2}= 4 MHz. Pro odporový trimr jsem zvolil hodnotu P2= 250 Ω. Následujícím výpočtem podle vzore (4.7) tedy určíme potřebnou kapacitu kondenzátoru a to C3= 1 nF.

$$C3 = \frac{1}{R * f} = \frac{1}{250 * 4 * 10^6} = 1\, nF$$

4.2.3. Simulace

Na obrázku *4.9 Simulace dolní propusti P2C3* jsou zobrazeny výsledky AC analýzy v programu PS spice pro dolní propust na výstupu VCO. Simulace v režimu parametrické

4.9 Simulace dolní propusti P2C3



analýzy ukazuje simulovanou závislost útlumu na kmitočtu pro různé hodnoty nastavené na oporovém trimru P2.

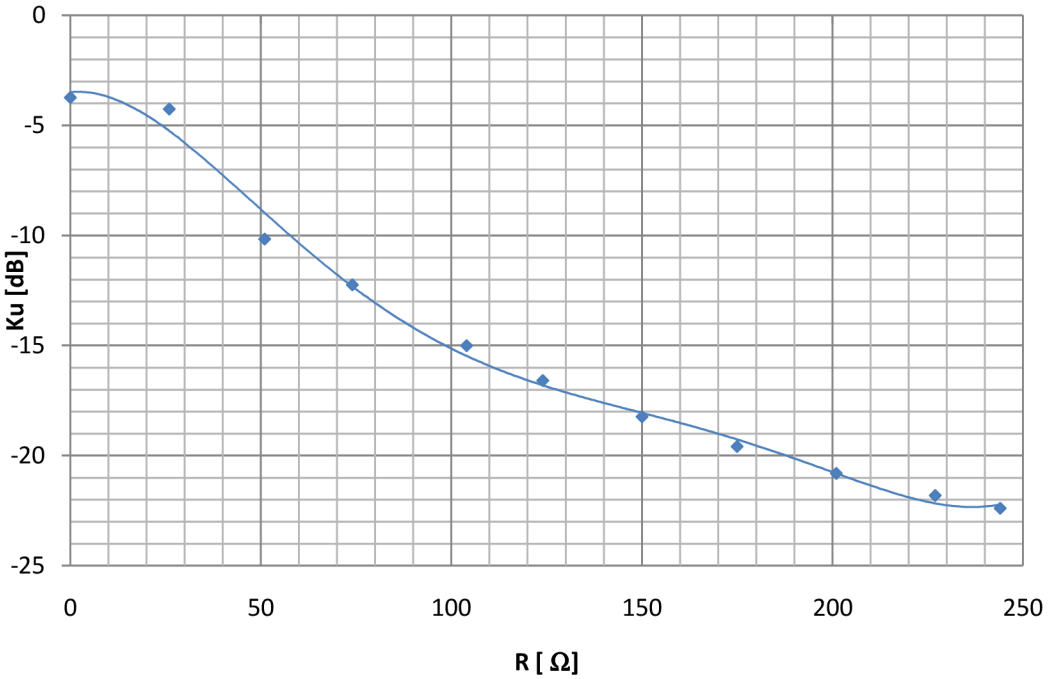
4.2.4. Naměřené hodnoty

Naměřené vlastnosti reálného RC článku na výstupu VCO jsou zaznamenány v tabulce *Tabulka 4.3 Závislost útlumu RC článku na velikosti* R, tyto hodnoty byly naměřeny při kmitočtu 10 MHz. Závislost přenosu, která je vypočítaná v této tabulce je zobrazena v obrázku *4.10 Charakteristika závislosti přenosu RC článku na velikosti R*.

Tabulka 4.3 Závislost útlumu RC článku na velikosti R

R [Ω]	$U_{vst\ RMS}$ [V]	$U_{vyst\ RMS}$ [V]	K_u	K_u [dB]
0,1	0,708	0,460	0,650	-3,75
26	0,800	0,490	0,613	-4,26
51	1,090	0,338	0,310	-10,17
74	1,273	0,311	0,244	-12,24
104	1,430	0,254	0,178	-15,01
124	1,512	0,224	0,148	-16,59
150	1,590	0,195	0,123	-18,23
175	1,650	0,173	0,105	-19,59
201	1,700	1,550	0,912	-0,80
227	1,750	0,142	0,081	-21,81
244	1,779	0,135	0,076	-22,40

4.10 Charakteristika závislosti přenosu RC článku na velikosti R



Výpočty z tabulky 4.1:

$$K_u = \frac{U_{výs}}{U_{vst}} = \frac{0{,}460}{0{,}708} = 0{,}65$$

$$K_{u(dB)} = 20\log(K_u) = 20\log(0{,}65) = -3{,}75\ dB$$

Výpočet napětí na referenčním vstupu

$$U_{ref} = K_u * U_{VCOout} = 0{,}65 * 4{,}32 = 2{,}808\ \mathrm{V}$$

Jak je patrné z obrázku *4.10 Charakteristika závislosti přenosu RC článku na velikosti R,* pomocí odporového trimru P2 je možné měnit útlum RC článku v rozmezí 3,75 dB až 22,4 dB. Velikost signálu přivedeného na referenční vstup spektrálního analyzátoru U_{ref} je tedy možné, při U_{VCOout}= 4,32 V, regulovat od 0,33 V do 2,81 V.

5. Závěr

V první části bakalářské práce jsem prostudoval vlastnosti optických vláken a možnosti jejich využití. Dále jsem prostudoval vlastnosti synchronizačních signálů spektrálních analyzátorů z řady E 7400 od firmy AGILENT a signálních generátorů z řady SML od firmy ROHDE&SCHWARZ. Tyto vlastnosti jsem si ověřil na konkrétních přístrojích AGILENT E7404A a ROHDE&SCHWARZ SML3.

Na základě těchto poznatků jsem, s ohledem na kvalitu parametrů a cenu, zvolil optický vysílač a přijímač z rady HFRB 0400 od firmy AGILENT. Konkrétně optický vysílač HFBR-1414 a optický přijímač HFBR-2416. Na základě Datasheetu série HFBR 0400 jsem určil typ optického kabelu potřebný k propojení vysílacího a přijímacího synchronizačního modulu. Jedná se o simplexní kabel s optickým vláknem o rozměrech 50/125 μm nebo 62,5/125 μm, který je z obou konců zakončen konektorem typu ST. Při realizaci synchronizačních modulů jsem využíval optický kabel FRNC BELDEN G7101 NH1*50/125 s délkou přibližně 6m. Tento optický kabel pro mě zapůjčil vedoucí mojí práce Ing. Jiří Dřínovský Ph.D.
Po zhodnocení získaných údajů o optickém kabelu, optickém vysílači, přijímači a přenášeném referenčním signálu jsem přistoupil k návrhu vysílacího a přijímacího synchronizačního modulu.

V návrhu vysílacího modulu jsem na základě voltampérové charakteristiky použil impedanční přizpůsobení a laditelný odporový dělič, pomocí něhož lze měnit velikost signálu na optickém vysílači a polohu jeho pracovního bodu. V návrhu vysílacího modulu se vyskytuje chyba popsaná v kapitole „4.1 Návrh vysílacího modulu“. S touto chybou je vysílací modul, při předpokládaném vstupním signálu o úrovni 0,84V, schopný funkce.

Při návrhu přijímacího modulu jsem na základě výpočtů a naměřených vlastností optického vlákna, vysílače a přijímače zvolil použití smyčky fázového závěsu 74HCT4046A od firmy PHILIPS. Ten pracuje v režimu zachycení signálu na výstupu optického přijímače. Přijímací modul není z důvodu vadného optického přijímače, schopný provozu. Z tohoto důvodu nebily jeho vlastnosti důkladně proměřeny.

Bakalářská práce není tedy při odevzdání schopná provozu.

6. Literatura

[1] WILFERT, Otakar, *Optoelektronika. Elektronický učební text.* Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně.

[2] MARŠÁLEK, Leoš, *Vlákna*. Verze 2.1.3 VŠB Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky informatiky Katedra elektroniky a sdělovací techniky.

[3] HANUS, Stanislav; SVAČINA, Jiří. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika. Prědnášky*. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně.

[4] GM Electroninic, *Katalog elektronických součástek pro rok 2009.*

[5] DATA SHEET: *Agilent HFBR-0400, HFBR-14xx and HFBR-24xx Series Low Cost, Miniature Fiber Optic Components with ST®, SMA, SC and FC Ports.* Agilent technologies. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/515/515-008/dsh.515-008.1.pdf>

[6] DATA SHEET: *74HC/HCT4046A - Phase-locked-loop with VCO.* 25 November 1997. Philips Semiconductors. Dostupný z WWW: http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/426/426-067/dsh.426-067.1.pdf

[7] J.ŠÍMA; *Optické sítě – Vláknová optika.:* RLC Praha a.s. Dostupné z WWW: http://www.klfree.net/store/skoleni_optika_2008_klfree_2.pdf

[8] HÁJEK M.;ŠVRČEK.M; *Moderní výuka a učební soubory vláknové optiky a optických komunikací pro SŠ, VOŠ a VŠ.* Banská Bystrica: MIKROKOM s.r.o. Dostupné z WWW: http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/MIKROKOM_BB_22_4_2009.pdf

7. Seznam obrázků

1.1 Šíření světla v optickém vláknu 1
1.2 Princip šíření světla v jednotlivých typech optických vláken 3
2.1 Spektrum referenčního signálu spektrálního analyzátoru 4
2.2 Spektrum referenčního signálu signálního generátoru 5
Obrázek 3.1 Zapojení vysílače HFBR 14xx 5
3.2 a)Volt-ampérová charakteristika vysílače 6
3.3 b) Závislost výstupního výkonu na vstupním proudu vysílače 6
3.4 Zapojení jednotlivých pinů přijímače HFBR 24x6 7
3.5 Zjednodušené vnitřní zapojení přijímače HFBR 24x6 8
3.6 Mechanické rozměry ST portu 8
3.7 Závislost výstupního signálu na vstupním signálu 10
4.1 Schéma zapojení vysílacího modulu 11
4.2 Zapojení reaktančního Γ článku pro R_G>R_Z 12
4.3 Charakteristika závislosti napětí na vysílači na vstupním napětí 14
4.4 Charakteristika přenosu napětí vysílacího modulu na kmitočtu 15
4.5 Vnitřní struktura HC/HCT 4046A 17
4.6 Typické hodnoty střední frekvence f_0 VCO na kapacitě C1 18
4.7 Závislost výstupního napětí komparátoru 2 na rozdílu fází vstupních signálů 18
4.8 Schéma zapojení přijímacího modulu 19
4.9 Simulacedolní propusti P2C3 20
4.10 Charakteristika závislosti přenosu RC článku na velikosti R 21

8. Seznam symbolů

- PLL (Phase Lock Loop) Smyčka fázového závěsu.
- VCO (Voltage Controlled Oscillator) Napětím řízený oscilátor.
- POF (Plastic Optic Fibe) Celoplastové optické vlákno.
- HCS® (Hard-Clad Silica) Optické vlákno sklo-plast.

9. Seznam příloh

A Vysílací modul **1**

A.1 Deska vysílacího modulu (strana spojů) 1

A.2 Deska vysílacího modulu (strana součástek) 1

A.3 Seznam součástek 1

B Přijímací modul **2**

B.1 Deska přijímacího modulu (strana spojů) 2

B.2 Deska přijímacího modulu (strana součástek) 2

B.3 Seznam součástek 2

C. Fotografie zhotovených desek 3

C.1 Vysílací modul 3

C.2 Přijímací modul 3

D. Knihovna pro HFBR (pouze elektronická verze) .....