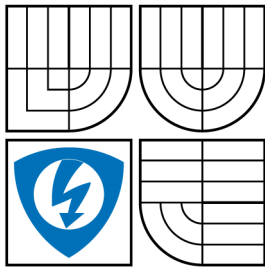


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT
BACHELOR'S PROJECT

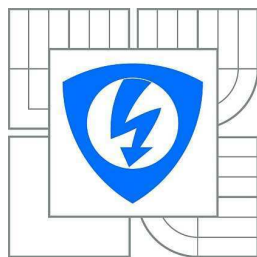
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ PETR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DŘÍNOVSKÝ, Ph.D.

BRNO, 2011



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: 2010/2011

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 vloženého 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: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

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.

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 optický vysílač a přijímač zvolil ze série HBR- 0400 od firmy Agilent Technologies.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, referenční signál, optický vysílač, optický přijímač, synchronizace měřících zařízení.

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 optical transmitter and receiver of the series HBR- 0400 the company Agilent Technologies.

KEYWORDS

Optical fiber, the reference signal, optical transmitter, optical receiver, synchronization of measuring device.

PETR, O. *Moduly pro synchronizaci měřicích zařízení s galvanickým oddělením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 46 s, 3s příloh. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 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

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	4
1 Úvod	5
2 Optická přenosová cesta	6
2.1 Teoretické poznatky o optických vláknech	6
2.1.1 Princip optických vláken	6
2.1.2 Ztráty a disperze v optických vláknech	7
2.1.3 Dělení optických vláken	8
2.2 Zvolený vysílač	9
2.3 Zvolený přijímač	10
2.4 Použité optické vlákno	13
2.5 Změřené parametry optického spoje	14
3 Referenční signál	16
3.1 Parametry udávané výrobcem	16
3.2 Reálné parametry referenčního signálu	16
3.3 Možnosti přenosu referenčního signálu	17
3.3.1 Varianta s amplitudovou modulací optického signálu	18
3.3.2 Varianta s využitím obdélníkových pulzů	18
4 Návrh a testování jednotlivých variací	21
4.1 Varianta s amplitudovou modulací optického signálu	21
4.1.1 Návrh detekce úrovně signálu	21
4.1.2 Návrh zesilovačů s možností řízení zesílení	22
4.2 Varianta s využitím obdélníkových pulzů	25
4.2.1 Návrh zesilovače a omezovače vysílacího modulu	25
4.2.2 Návrh přijímacího modulu	27
4.2.3 Návrh zesilovače výstupního modulu	32
5 Testování zhotovených modulů	34
5.1 Zdroj reference ze SG	34
5.2 Zdroj reference ze SA	36
6 Závěr	38

Litratura	39
Seznam symbolů, veličin a zkratk	40
Seznam příloh	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1 Šíření světla v optickém vláknu typu SI (převzato z [1])	6
2.2 Princip šíření světla v jednotlivých typech optických vláken.....	8
2.3 V-A charakteristika vysílače (převzato z [7]).....	10
2.4 Normalizovaná charakteristika závislosti vysílaného výkonu na proudu vysílačem (převzato z [7]).....	10
2.5 Zjednodušené vnitřní zapojení přijímače HFBR 2416 (převzato z [7])	11
2.6 Závislost spektrální hustoty šumu na frekvenci (převzato z [7]).....	12
2.7 Normalizovaná závislost citlivosti přijímače na vlnové délce optického signálu (převzato z [7]).....	12
2.8 Útlumová charakteristika vlákna SAMSUNG MM 50/125 (převzato z [9]).....	13
2.9 Zapojení měřicího pracoviště.....	14
2.10 Graf napět'ového přenosu optické cesty.	15
3.1 Spektrum referenčního signálu spektrálního analyzátoru E 7404A	17
3.2 Spektrum referenčního signálu signálního generátoru SML 3	17
3.3 Blokové zapojení pro amplitudovou modulaci optického signálu.....	18
3.4 Blokové schéma zapojení synchronizačních modulů pro variantu přenosu pomocí obdélníkových pulzů.....	19
4.1 Zapojení detektoru úrovně signálu	21
4.2 Závislost U_{AVC} na velikosti detekovaného signálu při $U_{ss}=1V$	22
4.3 Zapojení zesilovače řízeného pomocí změny velikosti R_e	23
4.4 Graf závislosti odporu $R_E//T_2$ na velikosti řídicího napětí.	23
4.5 Řízení útlumu signálu přiváděného na zesilovač.....	24
4.6 Graf závislosti přenosu na velikosti řídicího napětí.....	24
4.7 Průběhy vstupního a výstupního signálu	25
4.8 Schéma zapojení vysílacího modulu.....	26
4.9 Graf pracovní charakteristiky vstup-výstup tranzistoru BF 240.....	27
4.10 Zapojení pásmové propusti	28
4.11 Simulace přenosu PP pro zátěž 50, 100, 200, 300 a 500Ω	29
4.12 Odezva PP na obdélníkový vstupní signál.....	30
4.13 Průběh vstupního a výstupního signálu nezatížené PP	31
4.14 Průběh vstupního a výstupního signálu zatížené PP.....	31
4.15 Graf závislosti maximálního výstupního napětí na velikosti pulzů přiváděných na vstup PP	32

4.16 Zapojení zesilovače přijímacího modulu	33
5.1 Spektrum signálu na výstupu přijímacího modulu při referenci z SG.....	34
5.2 Schéma zapojení přístrojů při testování SG, jako zdroje referenčního signálu.	35
5.3 Výsledky testování SG, jako zdroje reference.....	35
5.4 Schéma zapojení přístrojů při testování SA, jako zdroje referenčního signálu.	36
5.5 Výsledky testování SA, jako zdroje reference.....	36
5.6 Spektrum signálu na výstupu přijímacího modulu při referenci z SA.....	37

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry optického vysílače HFBR 1414.....	9
Tabulka 2 Parametry optického přijímače HFBR 2416.....	11
Tabulka 3 Přenosové vlastnosti optické cesty	14
Tabulka 4 Katalogové údaje referenčních vstupů a výstupů	16
Tabulka 5 Velikost harmonické složky na výstupu PP.....	32

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá zajištěním synchronizace měřících přístrojů za pomoci dvou od sebe galvanicky oddělených modulů, které přenášejí synchronizační signál. Galvanického oddělení je dosaženo použitím optického vlákna jako přenosového média. Jelikož optická vlákna nevyzařují rušivé elektromagnetické pole, stejně jako jsou proti tomuto elektromagnetickému rušení odolné. Z tohoto důvodu jsou zpracovávané synchronizační moduly vhodné pro použití ve stíněné komoře.

Náplní této práce je tedy prozkoumat možnosti optického vlákna a jeho využití k přenosu vysokofrekvenčního referenčního signálu a zvolit vhodnou variantu. Druhou částí je poté vytvořit vhodné synchronizační moduly pro zvolenou variantu. Poslední částí náplně této práce je otestovat zhotovené moduly pro praktické využití.

2 OPTICKÁ PŘENOSOVÁ CESTA

2.1 Teoretické poznatky o optických vláknech

2.1.1 Princip optických vláken

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

Podmínky pro správné šíření světla optickým vláknem jsou vyjádřeny pomocí Snellova zákona lomu světla na rozhraní, který je definován rovnicí (1)

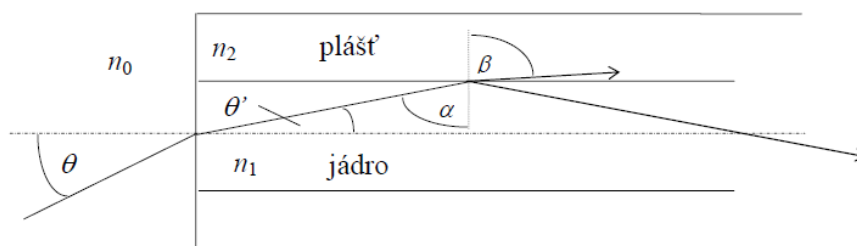
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

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. Z něj lze vyjádřit takzvaný mezní úhel dopadu světelného paprsku α_m , při kterém je úhel lomu světla 90° a paprsek 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 (2)

$$\alpha_m = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Z této rovnice vyplývá i druhá podmínka, jelikož sinus 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.

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



2.1 Šíření světla v optickém vlákně typu SI (převzato z [1])

paprsku, (viz obrázek 2.1). V kterém vyjadřuje n_0 - index lomu vzduchu, n_1 - index lomu jádra, n_2 - index lomu pláště, θ - úhel dopadu světla na čelo vlákna, θ' - úhel lomu světla v jádru, α - úhel dopadu světla na rozhraní jádro/plášť, β - úhel lomu světla v plášti. Platí tedy následující rovnice (3, 4)

$$\sin \alpha_{max} = \cos \theta'_{max} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

$$\sin\theta'_{max} = \sqrt{1 - \cos^2\theta'_{max}}. \quad (4)$$

Pomocí předchozích rovnic (1), (3) a (4) získám veličinu $\sin\theta_{max}$ neboli numerickou aparaturu NA vyjádřenou rovnicí (5)

$$\sin\theta_{max} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \cos^2\theta'_{max}} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \approx (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx \sqrt{2n_1\Delta}, \quad (5)$$

kde θ_{max} vyjadřuje tak zvaný aperturní neboli příjmový úhel vlákna a $\Delta = n_1 - n_2$ je rozdíl v indexech lomu jádra a pláště. Numerická aparatura mírou schopnosti vlákna přijmout optický výkon.

2.1.2 Ztráty a disperze v optických vláknech

Ztráty materiálovou absorpcí jsou způsobeny vzájemným působením (interakcí) 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 nevlastní absorpce způsobená ionty příměsí.

Ztráty materiálovým rozptylem, jehož příčiny můžeme dělit do tří částí, z nichž nejvýznamnější je Rayleigh 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 vlákne, napětí ve vlákne, kolísání průměru vlákna a jiné poruchy srovnatelné s vlnovou délkou. Poslední příčinou je rozptyl na nečistotách větších 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.

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 jednotlivých frekvencí a tedy i k rozdílné době šíření. Tento jev postihuje všechna optická vlákna, ale u mnohomodových vláken je zastíněn modovou disperzí.

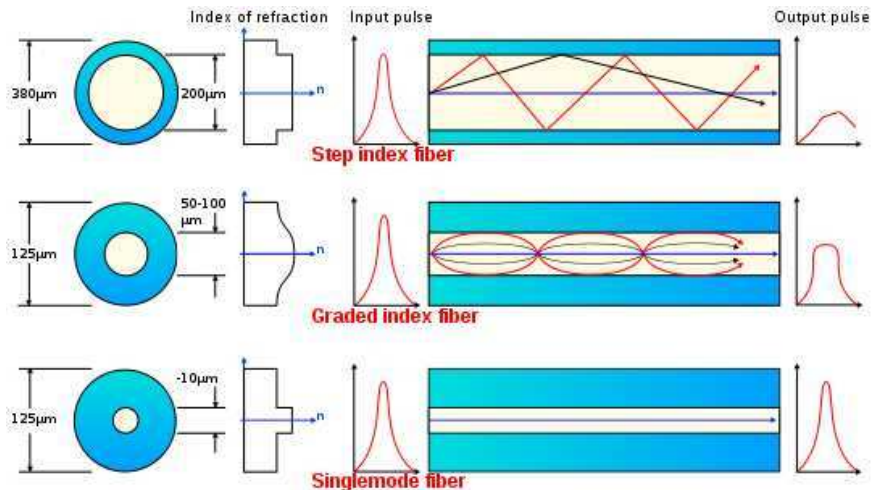
Ztráty v optických vláknech bývají vyjádřeny za pomoci koeficientu útlumu $\alpha_{1,OV}$ definovaného v decibelech na kilometr, jenž lze vyjádřit pomocí rovnice (6),

$$\alpha_{1,OV} = \frac{-1}{L_{OV}} 10 \log \frac{P_2}{P_1}, \quad (6)$$

kde L_{OV} je délka vlákna v km, P_1 optický výkon na vstupu vlákna a P_2 optický výkon na výstupu vlákna.

2.1.3 Dělení 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 vláken je zobrazen na obrázku. (viz obrázek 2.2).



2.2 Princip šíření světla v jednotlivých typech optických vláken

Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu SI (step index) využívají k šíření světelných vidů (paprsků) totální reflexe popsané v předchozí části. Mnohovidová 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.

Gradientní vlákna s postupnou změnou indexu lomu GI (graded index), u nichž 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) 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 náročné zavádění optického výkonu do vlákna. Používají se pro delší trasy s vysokou přenosovou rychlostí.

2.2 Zvolený vysílač

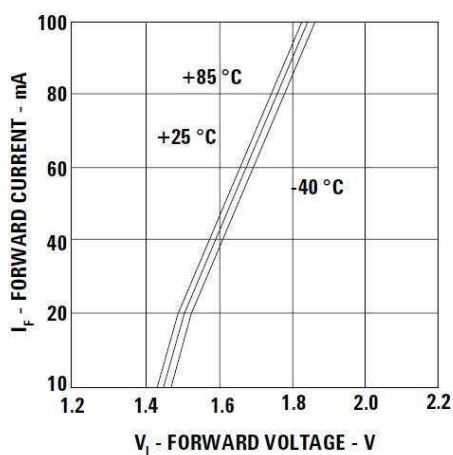
Pro funkci optického vysílače byla zvolena součástka HFBR – 1414 z řady HFBR 0400 od firmy AGILEN. Tento vysílač obsahuje LED diodu pracující v infračervené oblasti spektra na vlnové délce 820 nm, tedy přibližně v prvním oknu propustnosti. Optické vysílače HFBR 14xx jsou navrženy k zavádění optického signálu do čtyř různých rozměrů optických vláken, pro použití v navrhovaných synchronizačních modulech jsou důležité tyto dva rozměry multimodových optických vláken 50/125 μm a 62,5/125 μm. Optický vysílač HFBR 1414 byl navržen pro kombinaci s přijímačem HFBR 24xx a je uzpůsoben optickému konektoru typu ST.

Jednotlivé parametry udávané výrobcem součástky jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 1)

Tabulka 1 Parametry optického vysílače HFBR 1414

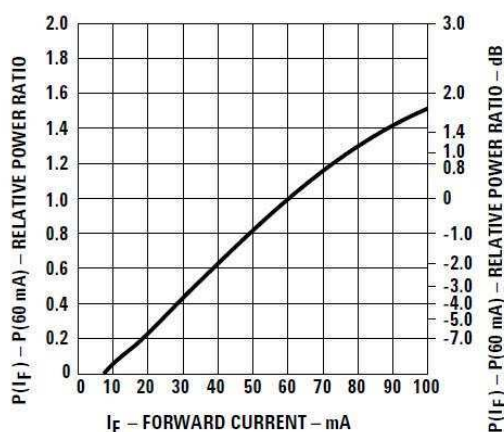
	Značka	Minimální hodnota	Typická hodnota	Maximální hodnota	Jednotka	Podmínky
Pracovní teplota	T_A	-40	+85		°C	
Špičkový vstupní proud	I_{FP}			200	mA	
Stejnoseměrný vstupní proud	I_{FDC}			100	mA	
Napětí na diodě	V_F	1,48	1,70 1,84	2,09	V	$I_F=60\text{mA dc}$ $I_F=100\text{mA dc}$
Závěrné napětí	V_Z			1,8	V	
Špička spektra vlnové délky	λ_p	792	820	865	nm	
Kapacita diody	C_T		55		pF	$V=0\text{V}, f=1\text{MHz}$
Průměr optického portu	D		150		μm	
Výstupní optický výkon pro optické vlákno 50/125μm, NA=0,2	P_{T50}	-18,8 -17,3	-15,8 -13,8	-13,8 -11,4	dBm (peak)	$I_F=60\text{mA dc}, T=25^\circ\text{C}$ $I_F=100\text{mA dc}, T=25^\circ\text{C}$
Výstupní optický výkon pro optické vlákno 62,5/125μm, NA=0,275	$P_{T62,5}$	-15,0 -13,5	-12,0 -10,0	-10,0 -7,4	dBm (peak)	$I_F=60\text{mA dc}, T=25^\circ\text{C}$ $I_F=100\text{mA dc}, T=25^\circ\text{C}$

V následujícím obrázku (viz obrázek 2.3) je vyobrazena výrobcem udávaná část volt-ampérové charakteristiky vysílače, z lineárního nárůstu této charakteristiky můžeme určit strmost $k = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{0,09-0,02}{1,8-1,5} = 0,233$, s jejíž pomocí lze určit maximální napětí přípustné na diodě vysílače jako $U_{max} = U + \Delta U = U + \frac{(I_{max}-I)}{k} = 1,5 + \frac{0,2-0,02}{0,233} = 2,272 \text{ V}$.



2.3 V-A charakteristika vysílače (převzato z [7])

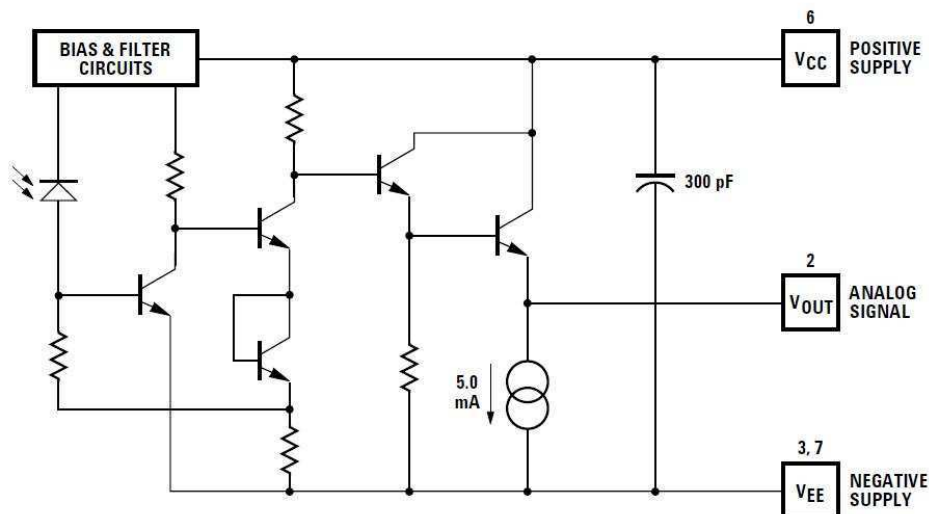
Na dalším obrázku (viz obrázek 2.4) je výrobcem udávána normalizovaná charakteristika závislosti vysílaného optického výkonu na proudu diodou vysílače vyjádřená bezrozměrně i v decibelech, závislost je normalizovaná k proudu vysílačem $I_F=60\text{mA}$.



2.4 Normalizovaná charakteristika závislosti vysílaného výkonu na proudu vysílačem (převzato z [7])

2.3 Zvolený přijímač

K provozu s vysílačem HFBR 1414 byl vybrán přijímač HFBR 2416 ze série HFBR 0400 o d firmy AGILENT. Tato součástka je tvořena PIN fotodiodou, která přijímá optický signál a integrovaným trans-impedančním zesilovačem, na jehož výstupu je přijímaný optický signál převedený na analogové napětí. Zjednodušené vnitřní zapojení součástky je znázorněno v následujícím obrázku (viz obrázek 2.5).



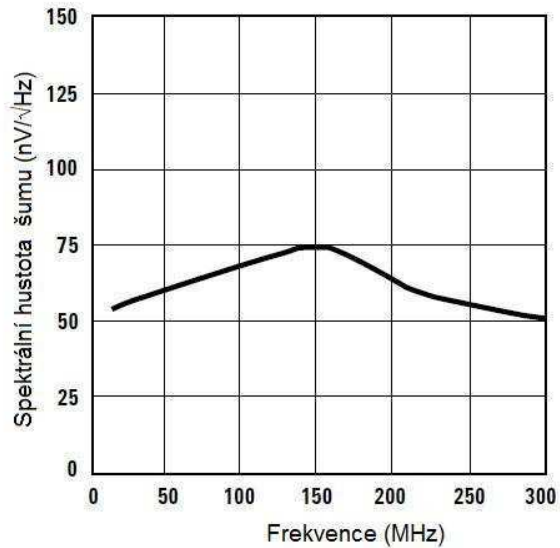
2.5 Zjednodušené vnitřní zapojení přijímače HFBR 2416 (převzato z [7])

Signál na výstupu přijímače HFBR 2416 je větší než při použití samostatné PIN fotodiody, proto je méně náchylný na elektromagnetické interference. Tento přijímač pracuje se signály ve frekvenčním rozsahu od nuly, tedy stejnosměrného signálu až po 150 MHz. Výrobce dále udává, že výstup by měl být připojen na zátěž o velikosti 510 Ω , dále výrobce doporučuje připojení napájecího napětí přes rezistor o velikosti 10 Ω . Další parametry součástky jsou uváděny v následující tabulce (viz Tabulka 2), v níž udávané hodnoty platí při zapojeném zatěžovacím odporu o velikosti 510 Ω .

Tabulka 2 Parametry optického přijímače HFBR 2416

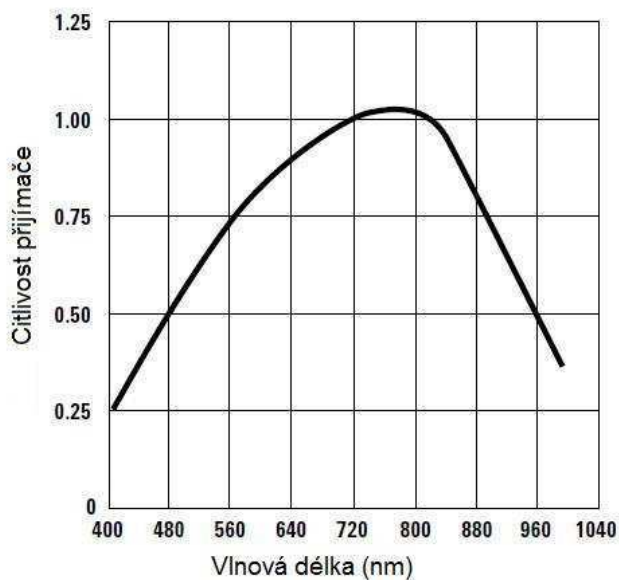
	Značka	Minimální hodnota	Typická hodnota	Maximální hodnota	Jednotka	Podmínky
Pracovní teplota	T_A	-40	+85		$^{\circ}\text{C}$	
Špičkový vstupní proud	I_{FP}			200	mA	
Výstupní proud	I_{FDC}			25	mA	
Napěťová citlivost	R_P	5,3	7,0	9,6	mV/ μW	$T_A = +25^{\circ}\text{C}$, $\lambda = 820\text{nm}$, 50MHz
Výstupní šumové napětí (RMS)	V_{NO}		0,40	0,59 0,70	mV	$B = 75\text{MHz}$, $P_R = 0\mu\text{W}$ $P_R = 0\mu\text{W}$
Ekvivalentní vstupní optický šum (RMS)	NEP		-43,0 0,050	-41,1 0,065	dBm μW	
Vstupní optický výkon (peak)	P_R			-7,6 175	dBm μW	$T_A = +25^{\circ}\text{C}$
Výstupní impedance	Z_0		30		Ω	Testovací $f = 50\text{MHz}$
Proud odebíraný ze zdroje	I_{EE}		9	15	mA	$R_{LOAD} = 510 \Omega$
Napájecí napětí	V_{CC}	4,75		5,25	V	

V následujícím grafu je výrobcem udávána charakteristika typické závislosti spektrální hustoty šumu na frekvenci signálu (viz obrázek 2.6),



2.6 Závislost spektrální hustoty šumu na frekvenci (převzato z [7])

z níž je patrné, že největší úroveň šum dosahuje při hraniční frekvenci přijímače tedy 150 MHz. Dále je zobrazena typická citlivost přijímače na spektrum přijímaného optického signálu normalizovaná k maximální hodnotě (viz obrázek 2.7), jenž potvrzuje určení přijímače pro vlnovou délku 820 nm.



2.7 Normalizovaná závislost citlivosti přijímače na vlnové délce optického signálu (převzato z [7])

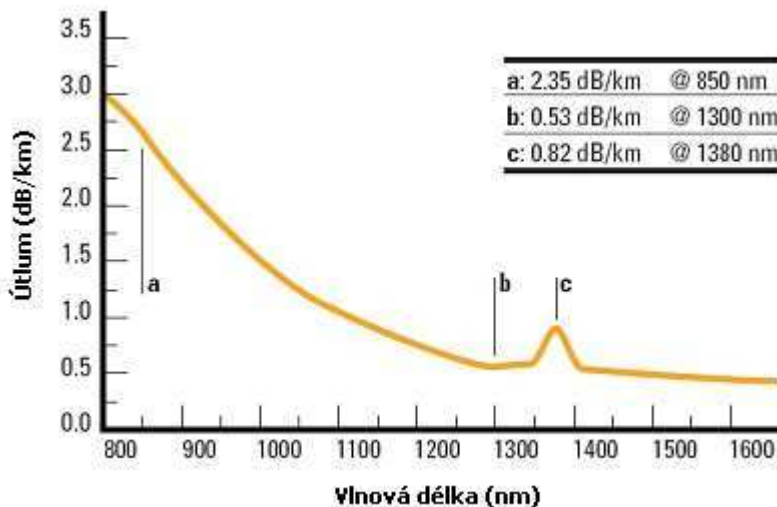
Výrobce přijímače udává dynamický rozsah 23 dB za předpokladu, že chybovost BER= 10⁻⁹. Za předpokladu, že platí rovnice

$$\Delta_P = P_{Rmax} - P_{0,P} , \quad (7)$$

kde P_{0,P} vyjadřuje citlivost přijímače, Δ_P dynamický rozsah v decibelové míře a P_{Rmax} maximální optický výkon na přijímači, můžeme spočítat citlivost přijímače (pro BER= 10⁻⁹) jako, P_{0,P} = P_{Rmax} - Δ_P = -7,6 - 23 = -30,6 dBm.

2.4 Použité optické vlákno

K propojení jednotlivých modulů bylo zvoleno použití optického patchcordu s multimodovým simplexním vláknem opatřeným na obou koncích optickými konektory typu ST. Vzhledem k použitým přijímacím a vysílacím prvkům a relativně malé vzdálenosti je dostačující použít multimodové vlákna o průměru jádra jak 50 μm tak i 62,5 μm. Vlákna s označením OM2, OM3 o průměru jádra 50 μm jsou však výhodnější, jelikož mají oproti vláknům s průměrem jádra 62,5 μm menší útlum v okně 850 nm a také nižší cenu. Pro vlákna s rozměry jádro/plášť 50/125 μm je typický koeficient útlumu <2,5 dB/km. Jako příklad lze uvést optické vlákno SAMSUNG OM2 MULTIMODE - 50/125, z jehož útlumové charakteristiky (viz obrázek 2.8) je patrný koeficient útlumu pro 850nm 2,35dB/km.



2.8 Útlumová charakteristika vlákna SAMSUNG MM 50/125 (převzato z [9])

Maximální délku optického vlákna lze spočítat pomocí rovnice pro útlumové omezení optického spoje (7)

$$P_V - \alpha_V - \rho - \alpha_{1,OV} L_{max} = P_{0,P} , \quad (7)$$

v níž znamenají P_V - výkon vysílače, α_V - útlum vazeb, ρ - systémovou rezervu, α_{1,OV} - koeficient útlumu, L_{max} - maximální délku optického vlákna a P_{0,P} - citlivost přijímače. Pokud je tedy zvolena systémová rezerva 6 dB, koeficient útlumu 2,5dB/km a útlum vazeb zanedbán, maximální délka optického vlákna je rovna

$$L_{max} = \frac{P_V - \rho - P_{0,P}}{\alpha_{1,OV}} = \frac{-13,8 - 6 - (-30,6)}{2,5} = 4,32 \text{ km} .$$

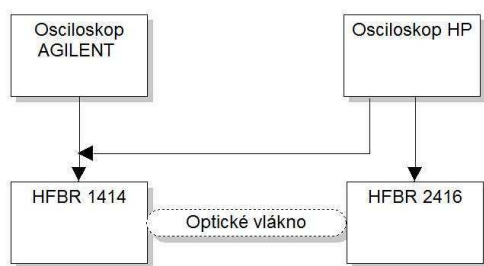
Výkony vysílače a přijímače byly dosazeny z hodnot udávaných výrobcem součástek při podmínkách užití vlákna 50/125 μ m a proudu procházejícím vysílačem $I_F=100\text{mA}$.

Vzhledem k předpokládanému laboratornímu použití synchronizačních modulů při použitých prvcích převyšuje maximální délka optického vlákna 50/125 μ m několikanásobně potřebnou vzdálenost.

2.5 Změřené parametry optického spoje

V tomto oddílu práce je popsáno měření zvoleného optického spoje, skládajícího se z optického vysílače AGILENT HFBR 1414 a optického přijímače AGILENT HFBR 2416. K propojení těchto součástek byl použit optický patchcord ST-ST o délce přibližně 6m, u nějž je použito vlákno 50/125 μ m s označením „FRNC BELDEN G7101 NH 1*50/125.“ Toto vlákno se v současné době už nevyrábí, a jelikož jeho výrobcem udávané parametry nebyly nalezeny, jsou předpokládány obecné vlastnosti optických vláken typu OM2, OM3.

Zapojení pracoviště použitého k měření je znázorněno (viz obrázek 2.9).



2.9 Zapojení měřícího pracoviště

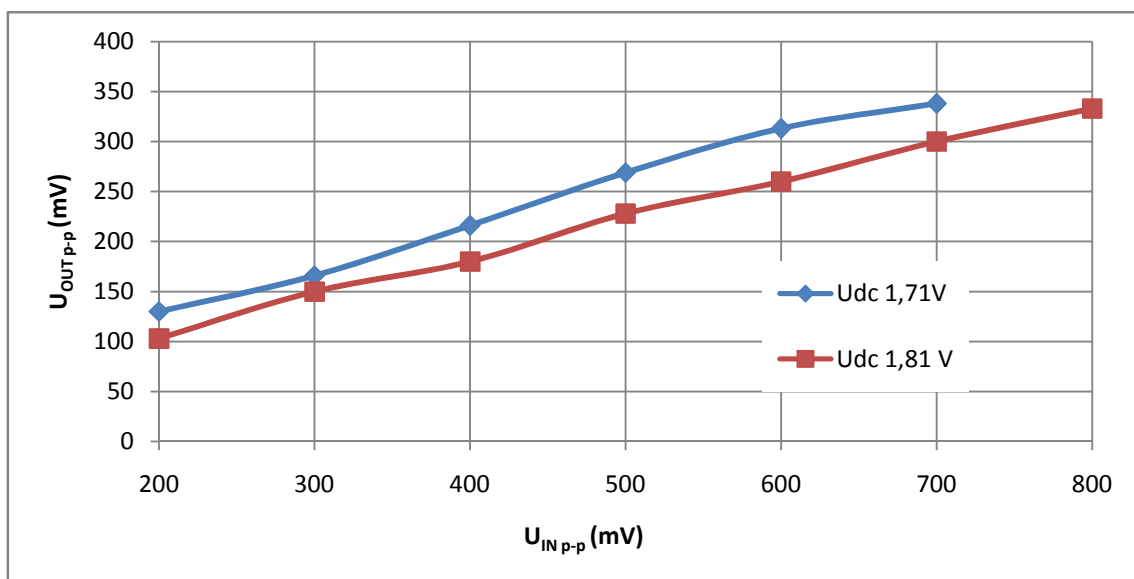
Na optický vysílač je přiváděn harmonický signál o kmitočtu 10 MHz obsahující stejnosměrnou složku, pomocí níž je nastaven pracovní bod vysílače. Získané napěťové úrovně signálu jsou popsány v tabulce (viz Tabulka 3)

Tabulka 3 Přenosové vlastnosti optické cesty

$U_{IN\ dc}$	$U_{IN\ p-p}$	$U_{OUT\ p-p}$	$U_{OUT\ dc}$
V	mV	mV	V
1,71	200	130	1,86
	300	166	1,86
	400	216	1,86
	500	269	1,86
	600	313	1,86
	700	338	1,86
1,81	200	103	1,86
	300	150	1,86

	400	180	1,86
	500	228	1,86
	600	260	1,86
	700	300	1,86
	800	333	1,86

Maximální špičkové napětí na vstupu vysílače bylo voleno tak, aby nebylo přesaženo maximální povolené špičkové napětí na vstupu vysílače. Hodnoty z tabulky jsou vneseny v následujícím grafu (viz obrázek 2.10), z něhož vyplývá lineární průběh charakteristiky obou zvolených nastavení pracovního bodu.



2.10 Graf napětového přenosu optické cesty

3 REFERENČNÍ SIGNÁL

Použití navrhovaných synchronizačních signálů je předpokládáno u měřících přístrojů, u nichž dochází k vzájemné synchronizaci pomocí harmonického signálu s pevným kmitočtem, jako jsou signální generátory či spektrální analyzátoři.

3.1 Parametry udávané výrobcem

Při návrhu bylo vycházeno z parametrů referenčního signálu spektrálních analyzátorů řady E 7400 od firmy AGILENT a signálních generátorů řady SML od firmy ROHDE&SCHWARZ. Datasheety k jednotlivým řadám přístrojů udávají, že vstupy i výstupy jednotlivých přístrojů mají impedanci 50Ω a jsou opatřeny konektorem typu BNC. Samotný referenční signál má, jak už bylo dříve uvedeno, podobu harmonického signálu o kmitočtu 10MHz. Rozmezí výkonových úrovní na referenčních výstupech a potřebných úrovní na referenčních vstupech přístrojů se od sebe pro jednotlivé typy přístrojů liší a jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 4), v níž jsou uvedeny i přepočítané hodnoty napěťových úrovní.

Tabulka 4 Katalogové údaje referenčních vstupů a výstupů

typ měřicího přístroje		<i>e 7400</i>	<i>SML</i>
referenční výstup	min (dBm)	>0	>7
	min (V)	>0,22	>0,5
referenční vstup	min (dBm)	-15	7
	min (V)	0,04	0,5
	max (dBm)	10	16
	max (V)	0,71	2

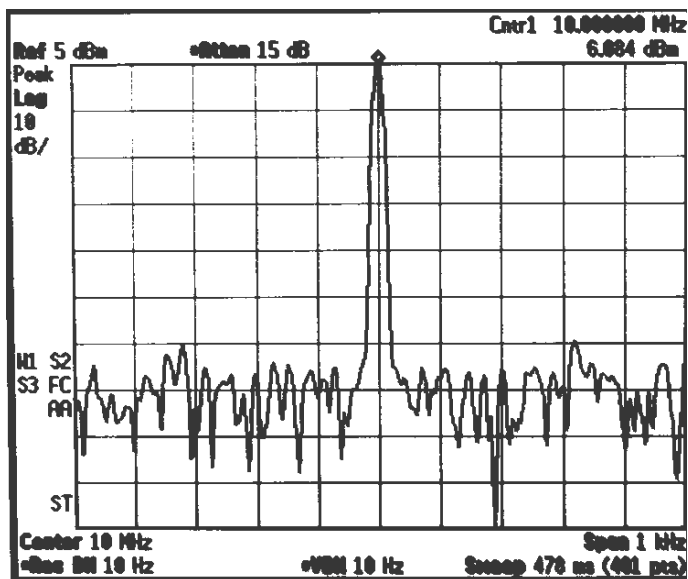
Příklad přepočtu

$$U = \sqrt{P_{(w)} * R} = \sqrt{10^{\frac{P_{(dBm)}}{10}} * 10^{-3} * R} = \sqrt{10^{\frac{+10}{10}} * 10^{-3} * 50} = 0,7071 V$$

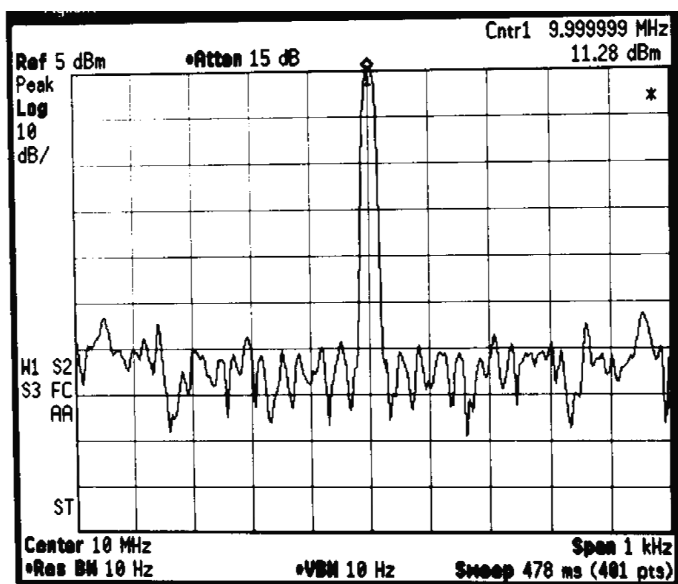
3.2 Reálné parametry referenčního signálu

Reálné parametry referenčního signálu byly ověřeny na spektrálním analyzátoru AGILENT E 7404 A a signálním generátoru ROHDE&SCHWARZ SML 3. Spektrum signálu na referenčním výstupu spektrálního analyzátoru E 7404A (viz obrázek 3.1) obsahuje podle předpokladu harmonickou složku s kmitočtem 10 MHz, jejíž výkonová úroveň má velikost 6,084dBm (0,45V). Tato úroveň odpovídá parametrům udávaným výrobcem přístroje. Ve spektru signálu na referenčním výstupu signálního generátoru SML 3 (viz obrázek 3.2) dosahuje výkonová úroveň dominantní složky velikosti 11,28

dBm (0,82V). Tato hodnota stejně jako v předchozích případech odpovídá údajům, které udává výrobce přístroje. Patrná odchylka kmitočtu harmonické složky o 1Hz oproti předchozímu spektru bude při návrhu považována za zanedbatelnou.



3.1 Spektrum referenčního signálu spektrálního analyzátoru E 7404A



3.2 Spektrum referenčního signálu signálního generátoru SML 3

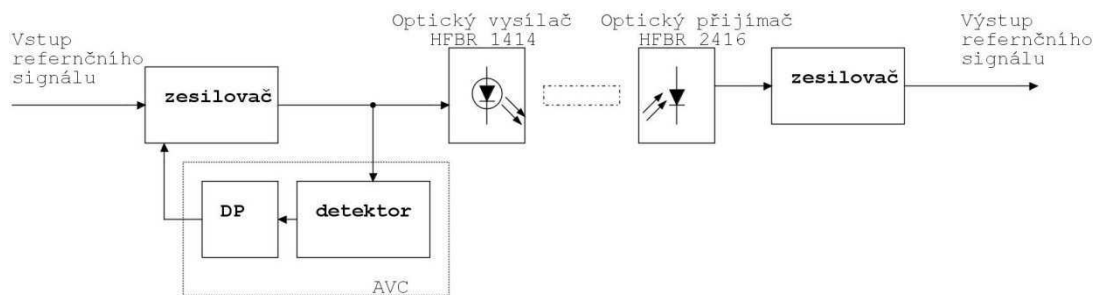
3.3 Možnosti přenosu referenčního signálu

Pro správnou funkci měřících přístrojů je důležité při přenosu především zachovat kmitočet referenčního signálu. Jak je patrné z předchozí kapitoly této práce, úroveň referenčního signálu na výstupech jednotlivých přístrojů se liší. Pro vyvíjené synchronizační moduly je důležité, aby tyto rozdíly neovlivňovaly jejich funkci. Moduly by tedy měly pracovat s různými přístroji bez nutnosti jejich vyladění pro

konkrétní přístroje. Při dalším postupu byly v této práci zpracovávány následující dvě varianty přenosu referenčního signálu pomocí optické cesty.

3.3.1 Varianta s amplitudovou modulací optického signálu

Prvním navrhovaným způsobem, jak přenášet referenční signál, je jeho využití k amplitudové modulaci optického signálu přenášejícího informaci mezi synchronizačními moduly (viz obrázek 3.3).



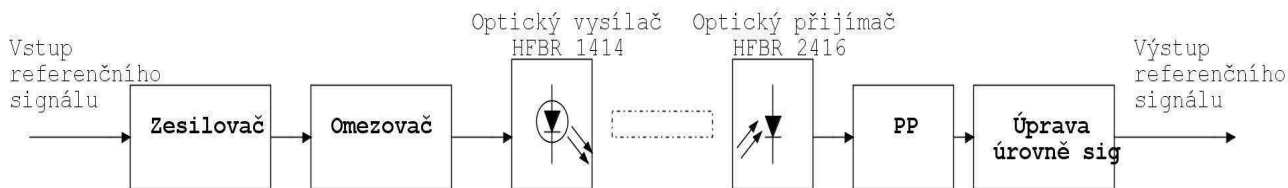
3.3 Blokové zapojení pro amplitudovou modulaci optického signálu

Při použití tohoto řešení se tedy přenáší referenční signál na vstup optického vysílače, u něhož je zapotřebí vhodného nastavení pracovního bodu, které může být realizováno pomocí odporového děliče přidávajícího k signálu stejnosměrnou složku. Pro plné využití pracovního rozsahu vysílače je nutné zajistit, aby úroveň referenčního signálu, přiváděného na vstup vysílače, měla vhodnou velikost. Toho je možné docílit pomocí použití zesilovače obsahujícího systém AVC, pomocí kterého je na vstupu optického vysílače udržována požadovaná úroveň signálu.

Na straně přijímacího modulu je poté dostačující signál na výstupu optického přijímače zesílit na potřebnou úroveň pro měřicí přístroje a přivést na referenční vstup měřicího přístroje. Oba zesilovače by měly být nastaveny v pracovní třídě A, tedy tak aby byly stejnosměrně zesilovány obě půlperiody zesilovaného signálu.

3.3.2 Varianta s využitím obdélníkových pulzů

Druhou možností, jak přenosu referenčního signálu docílit, je přenášet informaci o kmitočtu referenčního signálu pomocí obdélníkových pulzů. Z jejich spektra je na straně přijímacího modulu obnovena harmonická složka, která je totožná s harmonickou složkou referenčního signálu. Blokové zapojení pro tuto variantu je zobrazeno na následujícím obrázku (viz obrázek 3.4).



3.4 Blokové schéma zapojení synchronizačních modulů pro variantu přenosu pomocí obdélníkových pulzů

Při využití této varianty je signál z referenčního výstupu měřicího přístroje přiváděn na zesilovač, u kterého je nastaven pracovní bod tak, aby zesilovač pracoval na pomezí mezi třídou B a C. Zesilována je tedy jenom jedna půlperioda či její část, a to s velkou účinností. Za zesilovačem následuje diodový omezovač signálu. Ten zajistí omezení maximální úrovně pulzů na hodnotu přípustnou pro optický vysílač. Pokud je tedy rozdíl mezi maximální úrovní signálu na výstupu zesilovače a maximální úrovní za omezovačem signálu dostatečný, mají vysílané pulzy dostatečně krátkou náběžnou a sestupnou hranu na to, aby byly považovány za obdélníkové.

Tento signál je periodický a platí pro něj tedy následující vztah pro vyjádření periodické funkce (8)

$$s(t) = s(t + T_1) . \quad (8)$$

Z ní vyplývá, že obecný periodický signál obsahuje nekonečné množství period rovných celým násobkům základní periody T_1 . Perioda T_1 má tedy nejmenší hodnotu, pro niž je splněna podmínka udávaná touto rovnicí. Úhlový kmitočet harmonické složky odpovídající základní periody je vyjádřen vztahem (9)

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} . \quad (9)$$

Obecný periodický signál je tedy složen z případné stejnosměrné složky a harmonických složek, jejichž úhlové kmitočty ω_k jsou vždy celistvým násobkem úhlového kmitočtu první harmonické složky ω_1 . Obecný periodický signál lze vyjádřit rovnicí komplexního tvaru Fourierovy řady (10)

$$s_s(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k \exp(jk\omega_1 t) . \quad (10)$$

V této rovnici udává koeficient c_0 hodnotu stejnosměrné složky signálu. Pro $k>0$ platí, vztah (11)

$$|c_k| = \frac{1}{2} C_k \quad \arg(c_k) = \varphi_k , \quad (11)$$

kde C_k udává amplitudu k -té harmonické složky a φ_k její počáteční fázi.

Pro přijímaný signál tvořený periodickým sledem obdélníkových impulzů je možné využít následující funkce (12)

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x} , \quad (12)$$

pro zjednodušení vyjádření velikosti koeficientů c_k z komplexního vyjádření tvaru

Fourierovy řady následujícím vztahem (13)

$$c_k = D \frac{\vartheta}{T_1} \operatorname{sinc} \left(\frac{\vartheta}{2} k \omega_1 \right). \quad (13)$$

V tomto vztahu vyjadřuje D amplitudu, T_1 periodu signálu a pulzů ϑ dobu trvání pulzu.

Na straně přijímacího modulu je pomocí pásmové propusti (PP) z přijatého signálu vyfiltrována první harmonická frekvence odpovídající referenčnímu signálu. V posledním bloku přijímacího modulu je obnovený referenční signál zesílen na úroveň požadovanou pro referenční vstup měřících přístrojů.

4 NÁVRH A TESTOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIAT

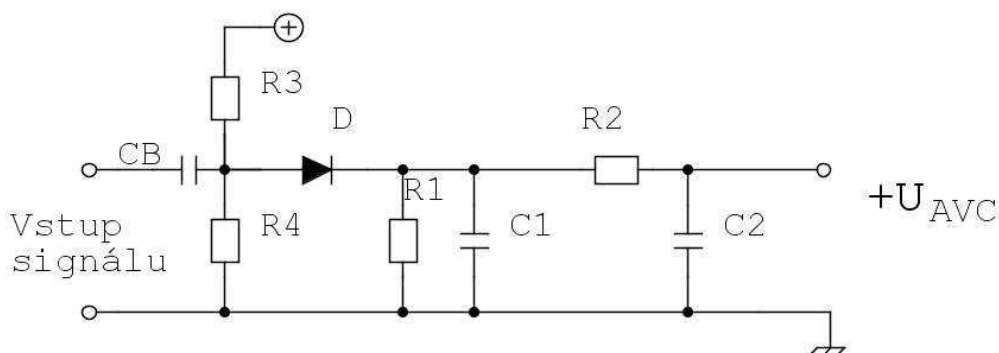
4.1 Varianta s amplitudovou modulací optického signálu

V této kapitole jsou navrhovány jednotlivé bloky zapojení zobrazeného na obrázku 3.3 Blokové zapojení pro amplitudovou modulaci optického signálu.

Maximální špičková hodnota signálu přiváděného na optický vysílač by měla být 0,4V (viz kapitola 2.2). Z důvodu, že změřené úrovně na referenčních vstupech měřících přístrojů dosahují velikosti 0,45V a 0,82V (viz kapitola 3.2), je zapotřebí před vstup zesilovače vložit dělič napětí s vhodným poměrem.

4.1.1 Návrh detekce úrovně signálu

Pro tuto variantu je zapotřebí použít zesilovač, u něhož je možné použít zesílení pomocí stejnosměrného napětí. Velikost tohoto napětí je řízena podle úrovně zpracovávaného signálu, což je zajištěno zvoleným detektorem střední hodnoty, jehož zapojení je na následujícím obrázku (viz obrázek 4.1).



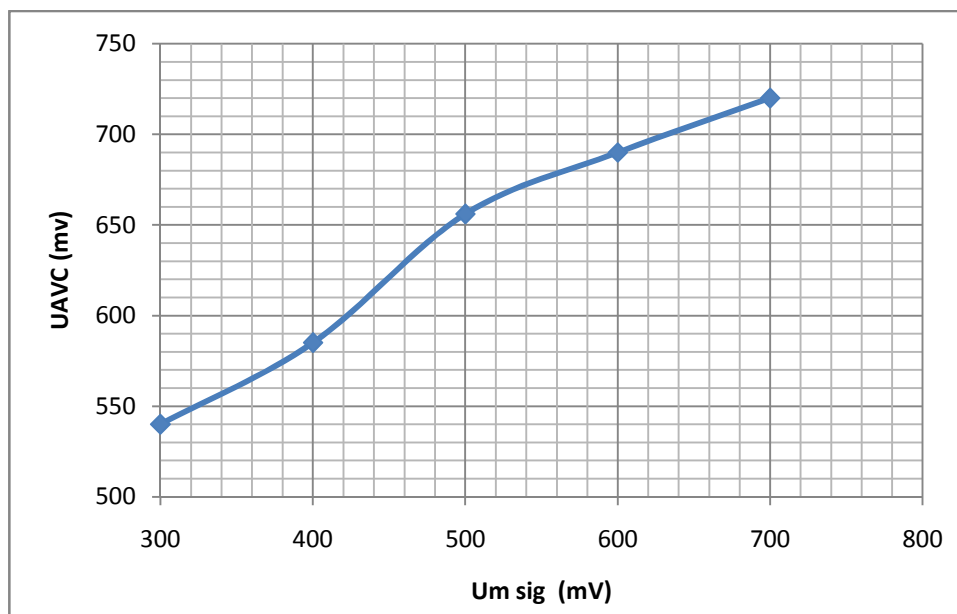
4.1 Zapojení detektoru úrovně signálu

Z tohoto zapojení je patrné, že detektor je tvořen diodou D, za ní je umístěn paralelní rezonační článek R1C1 a dolní propust tvořená integračním článkem R2C2. Detektor je připojen k výstupu zesilovače. Jelikož je požadovaná maximální úroveň signálu přiváděného z výstupu zesilovače na vstup optického vysílače menší než úbytek napětí v propustném směru diody D, je před detektor zařazen odporový dělič napětí R3/R4. Dělič přidává k signálu stejnosměrnou složku, pomocí níž je kompenzován úbytek napětí na diodě D. Aby nedocházelo k ovlivnění ostatních obvodů vysílacího modulu přidanou stejnosměrnou složkou, je detektor připojen přes kondenzátor CB blokující průchod stejnosměrné složky k jiným blokům. Díky změně velikosti stejnosměrné složky je také možné upravit úroveň řídicího napětí U_{AVC} . Čímž je možné nastavit vhodný pracovní bod prvku zajišťujícího změnu zesílení zesilovače.

Mezní frekvence jednotlivých RC článků je vyjádřena pomocí rovnice (14)

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14)$$

Pro detekci velikosti referenčního signálu byl s ohledem na vyráběné součástky zvolen mezní kmitočet pro článek R1C1 $f_{m1}=408\text{kHz}$ a pro R2C2 $f_{m2}=66\text{Hz}$. Závislost hodnoty velikosti řídicího napětí U_{AVC} na velikosti detekovaného signálu, k němuž byla děličem R3/R4 přidána stejnosměrná složka o velikosti 1V, je zobrazena v následujícím grafu (viz obrázek 4.2).

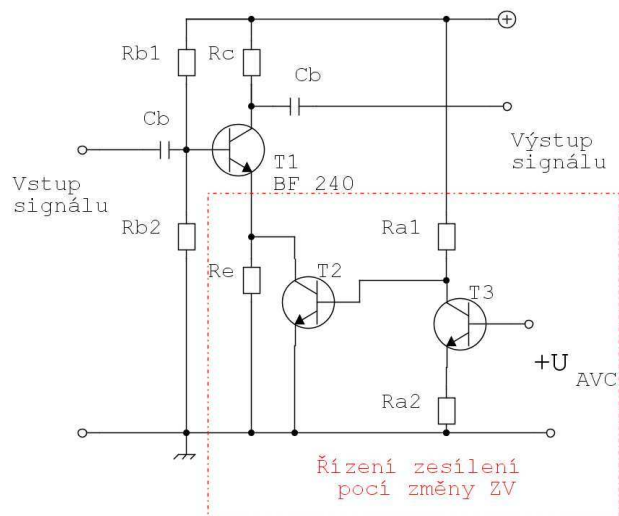


4.2 Závislost U_{AVC} na velikosti detekovaného signálu při $U_{SS}=1\text{V}$

4.1.2 Návrh zesilovačů s možností řízení zesílení

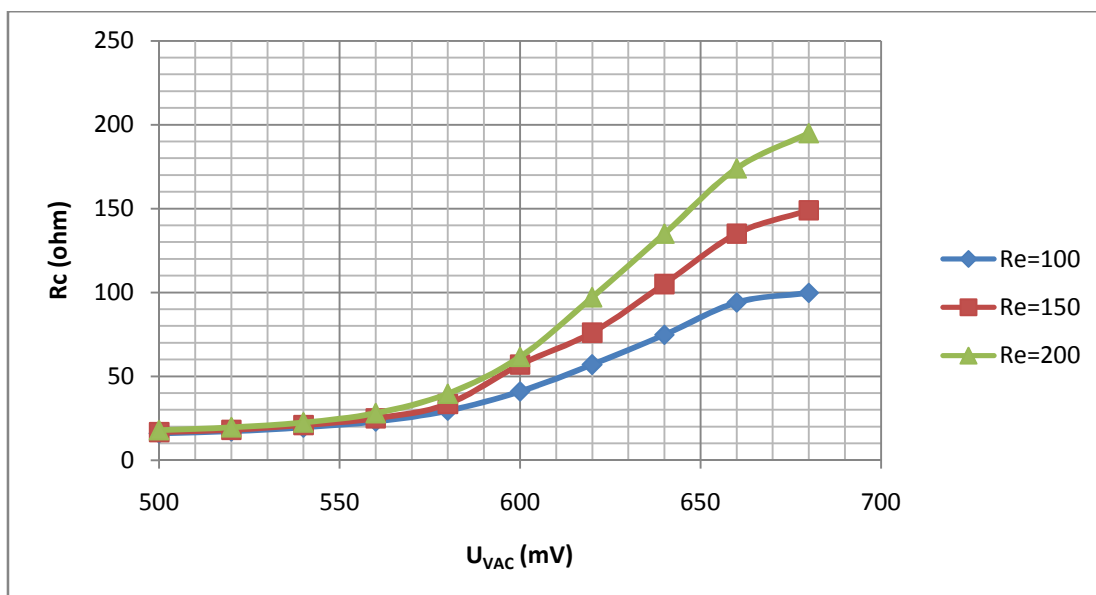
Pro zajištění řízení zesílení byly zvoleny a testovány následující možnosti.

První variantou je využití zpětnovazebního rezistoru připojeného k emitoru tranzistoru zesilovače R_e , jehož vzrůstající velikost elektrického odporu snižuje zesílení daného zesilovače. Změna hodnoty odporu rezistoru R_e je zajištěna pomocí tranzistorů T2 a T3 (viz obrázek 4.2).



4.3 Zapojení zesilovače řízeného pomocí změny velikosti Re

Jak je patrné z tohoto obrázku s vzrůstajícím řídicím napětím U_{AVC} , získaným z výstupu detektoru střední hodnoty, dochází k otvírání tranzistoru T3. Napětí na konektoru tranzistoru T3 tedy klesne a tímto napětím řízený tranzistor T2 se přivírá. Výsledný odpor paralelní kombinace rezistoru Re s tranzistorem T2 se tedy zvýší a dochází k snížení zesílení jednostupňového zesilovače tvořeného tranzistorem T1. Závislost výsledného odporu paralelní kombinace $R_2 || T_2$ na velikosti řídicího napětí U_{AVC} pro hodnoty rezistoru Re 100 Ω , 150 Ω a 200 Ω jsou zobrazeny v následujícím grafu (viz obrázek 4.4).

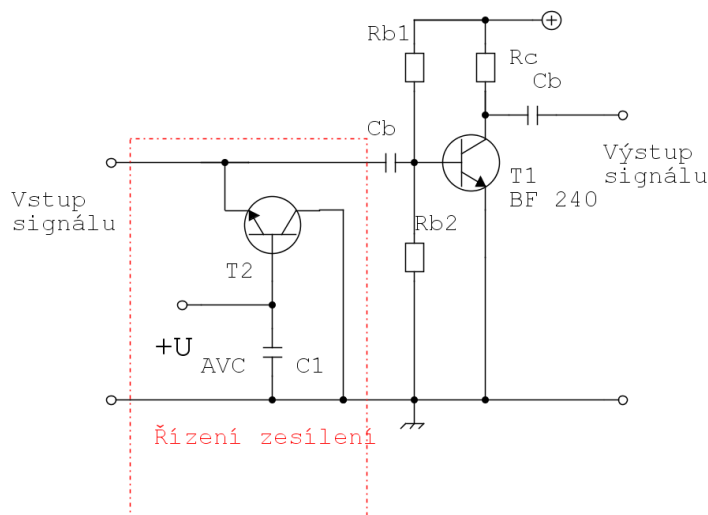


4.4 Graf závislosti odporu $R_E // T_2$ na velikosti řídicího napětí.

Jak je z tohoto obrázku patrné, při vyšších hodnotách odporu rezistoru Re se strmost nárůstu charakteristiky zvyšuje. Tím je tedy možné ovlivnit rozsah systému

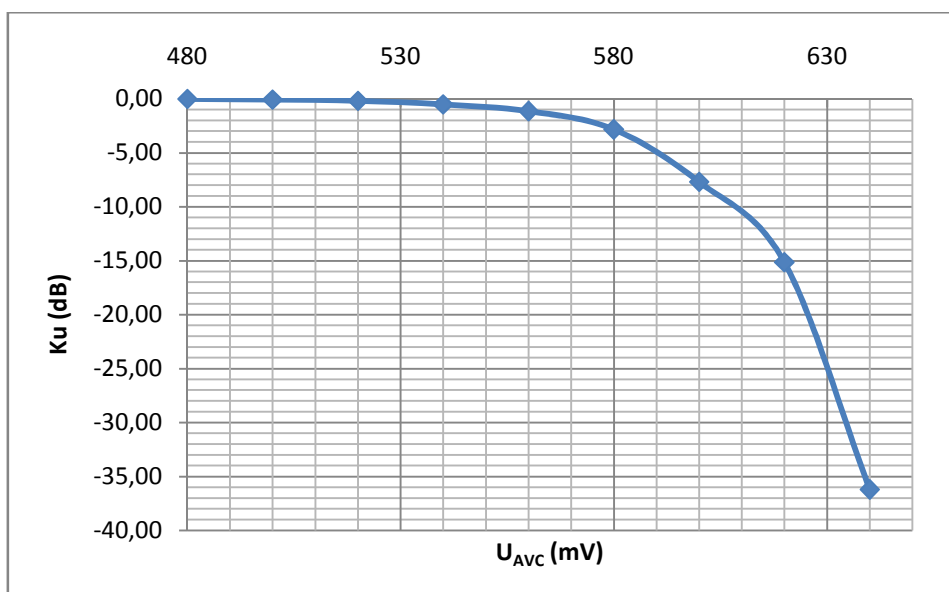
AVC. Pro navrhovaný vysílací modul je nevhodnější využití hodnoty rezistoru $R_e=200\Omega$.

Druhou možností je zařazení tranzistoru T2 v zapojení se společným kolektorem SC před vstup zesilovače, jak je naznačeno v následujícím schématu (viz obrázek 4.5).



4.5 Řízení útlumu signálu přiváděného na zesilovač

U této varianty tedy není řízeno přímo zesílení zesilovače tvořeného tranzistorem T1, ale dochází k řízení útlumu signálu přiváděného na zesilovač. Jak je ze zapojení patrné, se zvyšující se úrovní řídicího napětí U_{AVC} dochází k otevírání tranzistoru T2. Tím pádem klesá hodnota jeho odporu a velikost signálu klesá. Průběh přenosu signálu v závislosti na velikosti řídicího napětí je zaznamenán v následujícím grafu (viz obrázek 4.6).

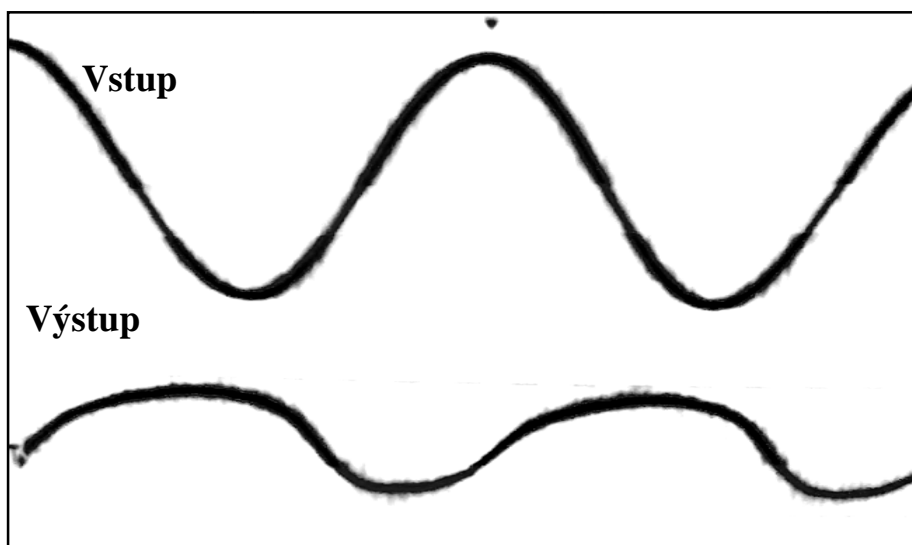


4.6 Graf závislosti přenosu na velikosti řídicího napětí

Pro využití v navrhovaném vysílacím modulu je vhodná část charakteristiky do hodnoty řídicího napětí přibližně 600mV.

4.1.2.1.1 Testování funkce obvodů AVC

Pro obě varianty zapojení zesilovače byly zhotoveny testovací desky, pomocí nichž byla ověřena jejich funkce. Tímto měřením byla ověřena funkce regulace velikosti úrovně signálu přiváděného na optický vysílač. Obě varianty byly schopny snížit zesílení až na hodnotu $A_u=1$. Obě testované varianty regulace zesílení zesilovače však svým provozem způsobují relativně výrazné zkreslení signálu na výstupu zesilovače, které je patrné z obrázku, v němž jsou zobrazeny průběhy vstupního a výstupního signálu zaznamenané pomocí osciloskopu (viz obrázek 4.7).



4.7 Průběhy vstupního a výstupního signálu

Vzniklé zkreslení by mohlo ovlivnit synchronizaci mezi měřicími přístroji a z tohoto důvodu bylo z varianty amplitudové modulace optického záření referenčním signálem pro užití v synchronizačních modulech upuštěno.

4.2 Varianta s využitím obdélníkových pulzů

V této kapitole jsou zpracovávány jednotlivé bloky ze schématu zapojení zobrazeného na obrázku 3.4.

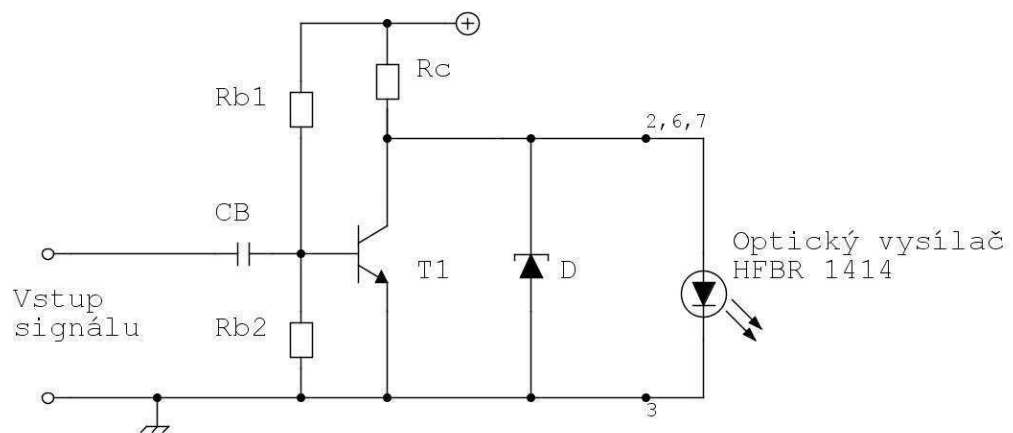
4.2.1 Návrh zesilovače a omezovače vysílacího modulu

Tato varianta je založena na přenosu informace o kmitočtu pomocí obdélníkových pulzů. K vytvoření těchto pulzů bylo v tomto návrhu použito jednostupňového zesilovače, v němž je použito vysokofrekvenčního bipolárního tranzistoru NPN v zapojení se společným emitorem SE. Pracovní bod tohoto zesilovače je nastaven tak, aby zesilovač pracoval ve třídě účinnosti B až C, v nichž dosahuje zesilovač vysoké účinnosti. Z referenčního signálu je zesilována jenom jedna půlperioda či její část

v závislosti na nastavení pracovního bodu zesilovače. Zesílenou část referenčního signálu na výstupu zesilovače je zapotřebí omezit na velikost přípustnou pro optický vysílač. Díky této limitaci maximální hodnoty napětí je na vysílač přiváděn signál obdélníkového průběhu, jehož perioda odpovídá kmitočtu referenčního signálu.

Jak je popsáno v třetí kapitole této práce, velikost úrovně referenčního signálu na výstupech měřicích přístrojů je pro jednotlivé přístroje různá. Změna velikosti signálu vstupujícího do zesilovače ovlivní střídu vysílaného signálu. Výhodou je, že při získání referenčního signálu pomocí filtrace na straně přijímače tato skutečnost neovlivní kmitočet ani průběh signálu.

Navržené zapojení vysílacího modulu je zobrazeno na následujícím obrázku (viz obrázek 4.8).

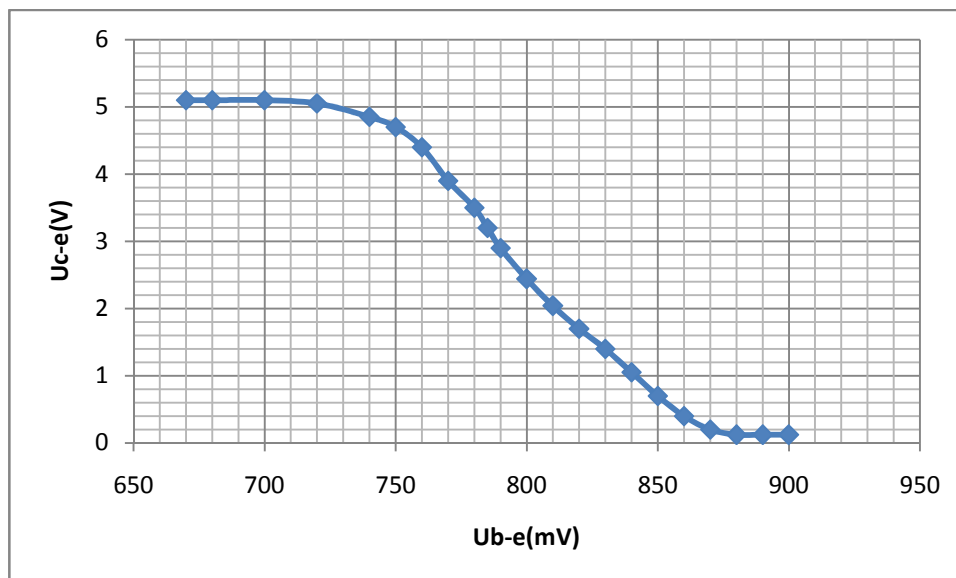


4.8 Schéma zapojení vysílacího modulu

Pro zvolený optický vysílač je přípustná hodnota maximálního špičkového napětí rovna 2,27V, maximální úroveň stejnosměrného napětí připojeného na vysílač je 1,85V. Vzhledem k obdélníkovému průběhu signálu se střídou nepřesahující 50%, nepřekročí jeho stejnosměrná složka polovinu maximální hodnoty. Z tohoto důvodu nehrozí poškození vysílače stejnosměrnou složkou signálu. Pokud se bude maximální velikost pulzů pohybovat v rozmezí 1,7V až 2V, mělo by být vyloučeno snížení životnosti následkem přetížení vysílače. Zároveň by vyzářený optický výkon měl mít dostatečnou velikost pro správnou funkci přijímacího modulu.

Mezi výstup zesilovače a vstup optického vysílače je v závěrném směru připojena zenerova dioda. Díky této zenerově diodě jsou omezeny případné špičky napětí na optickém vysílači přesahující její průrazné napětí, které je zvoleno na velikost 2,2V. Tímto je optický vysílač chráněn před poškozením.

Pro realizaci schématu byl jako T1 zvolen vysokofrekvenční bipolární tranzistor BF 240. Naměřená pracovní charakteristika vstup - výstup, při zapojení se společným emitorem a připojeným rezistorem $R_c = 200\Omega$, je zobrazena v následujícím grafu (viz obrázek 4.9).



4.9 Graf pracovní charakteristiky vstup-výstup tranzistoru BF 240

Z něj je patrné, že pokud má zesilovač pracovat v třídě účinnosti C, stejnosměrné předpětí na bázi tranzistoru T1 vytvářené pomocí děliče napětí Rb1/Rb2 musí být větší než 0,9V nebo naopak menší než 0,7V. Pro další postup předpokládáme první variantu. Při zvoleném napájecím napětí 5V lze z následujícího vztahu pro velikost napětí na odporovém děliči (15)

$$U = U_N \frac{Rb2}{Rb1+Rb2} \quad (15)$$

určit velikost rezistorů Rb1 a Rb2. Při zvolené hodnotě Rb2=1KΩ se tedy velikost Rb1 spočítá, jako $Rb1 < Rb2 * \frac{U_n - U}{U} < 1 * 10^3 * \frac{5 - 0,9}{0,9} = 4,5555 \text{ k}\Omega$. Rb1 je možné realizovat pomocí odporového trimru 5KΩ, čímž je zajištěna možnost dodatečné úpravy polohy pracovního bodu. Kondenzátor CB zajišťuje oddělení stejnosměrného napětí od referenčního výstupu měřicího přístroje. Pro referenční signál by hodnota jeho reaktance, jejíž velikost je udávána vztahem (16)

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (16)$$

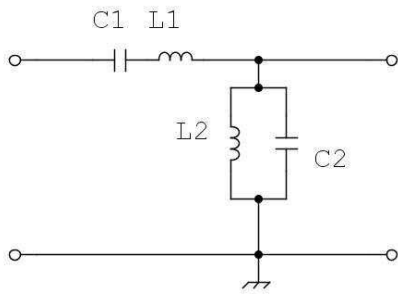
měla být co možná nejmenší. Při zvolené kapacitě 220nF je tudíž rovna $X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi * 10 * 10^6 * 220 * 10^{-9}} = 0,0723 \Omega$.

4.2.2 Návrh přijímacího modulu

Z přenášeného obdélníkového signálu, který je za pomoci zvoleného optického přijímače převeden zpět na elektrický signál, je potřeba pomocí pásmové propusti vyfiltrvat první harmonickou složku odpovídající kmitočtu referenčního signálu.

K tomuto účelu byla zvolena pásmová propust tvořená kombinací sériového a paralelního rezonančního článku, jehož zapojení je zobrazeno na následujícím obrázku

(viz obrázek 4.10).



4.10 Zapojení pásmové propusti

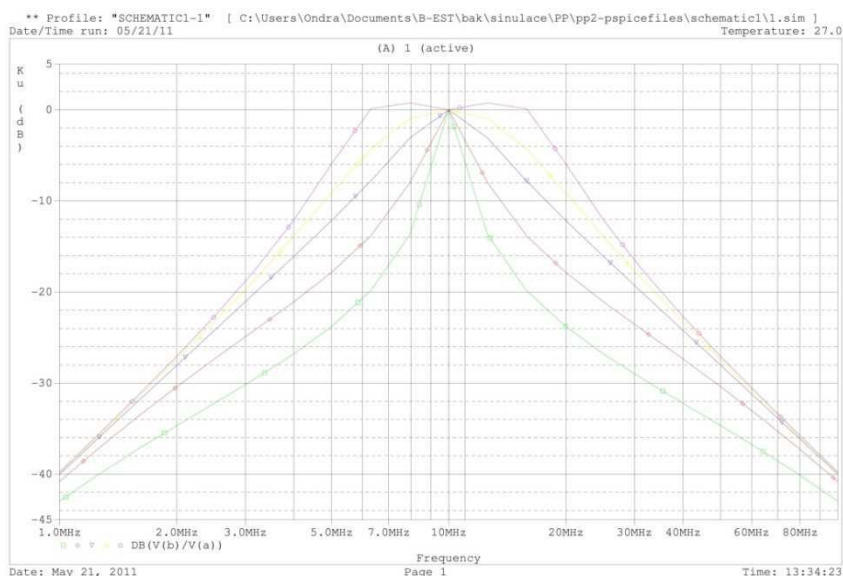
Oba rezonanční články mají nastavenou stejnou rezonanční frekvenci určenou vztahem pro rezonanční kmitočet obvodu LC (17)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (17)$$

Tudíž platí, že $L1=L2$ a $C1=C2$. Pokud je zvolena hodnota indukčnosti cívek $8,2\mu\text{H}$, tak pro rezonanční kmitočet $f_r=10\text{MHz}$ je hodnota kapacity kondenzátorů vypočítána jako $LC = \left(\frac{1}{2\pi f_r}\right)^2 \rightarrow C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{(2\pi * 10 * 10^6)^2 * 8,2 * 10^{-6}} = 30,8906 \text{ pF}$. Této hodnoty bylo při konstrukci dosaženo paralelní kombinací kondenzátorů s kapacitou 27pF a $3,9\text{pF}$.

4.2.2.1.1 Simulace pásmové propusti

Následující simulace přenosové charakteristiky pásmové propusti proběhla pomocí AC analýzy v programu PS pice pro zvolené parametry pásmové propusti. Na obrázku (viz obrázek 4.11) je zobrazen nasimulovaný výsledek pro velikost zátěže 50Ω , 100Ω , 200Ω , 300Ω a 500Ω .

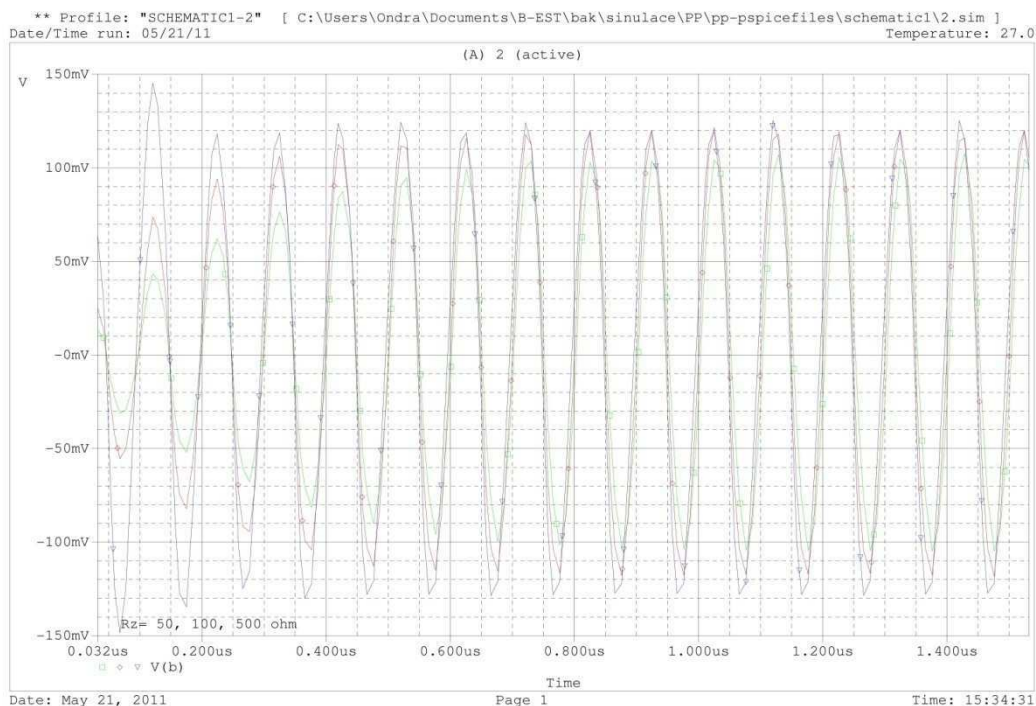


4.11 Simulace přenosu PP pro zátěž 50, 100, 200, 300 a 500Ω

Z výsledků simulace je dobře patrné, že pro rostoucí hodnoty zátěže klesá činitel jakosti rezonančních obvodů, které tvoří pásmovou propust. Šířka pásma přenosu závisící na činiteli jakosti tedy roste.

Pro použití v přijímacím modulu je zapotřebí odfiltrovat vyšší harmonické kmitočty, pásmová propust by tedy měla mít malou šířku pásma. Pro referenční kmitočet je tedy nejbližší harmonická složka na kmitočtu 20MHz, pro tento kmitočet byl při hodnotě zátěže 50Ω odstup od první harmonické frekvence 24dB, při zátěži 100Ω byl tento rozdíl v přenosu 18dB. Pro vyšší hodnoty zátěže útlum druhé harmonické frekvence dále klesá a pro získání první harmonické frekvence jsou méně vhodné.

V další simulaci je pomocí časové analýzy simulována odezva pásmové propusti na vstupní obdélníkový signál předpokládaný na výstupu optického vysílače zatíženého rezistorem 510Ω. Perioda tohoto signálu je $T=100\text{ns}$, doba trvání pulzu je $\vartheta=40\text{ns}$, jeho velikost $D=200\text{mV}$. V následujícím obrázku (viz obrázek 4.12) jsou zobrazeny výsledky simulace pro velikost zátěže 50, 100 a 500Ω.



4.12 Odezva PP na obdélníkový vstupní signál

Z výsledů simulace je patrné, že pro malou velikost zátěže jsou kmity rezonančních obvodů více tlumeny a velikost napětí stoupá k své ustálené hodnotě několik cyklů. Naopak u vysokých hodnot zátěže je signál méně utlumen, zpočátku tedy signál prudce vzroste a poté klesá na ustálenou hodnotu. Pro hodnotu zátěže 50Ω došlo při simulaci asi po patnácti periodách k ustálení na hodnotě 108mV , pro zátěž 100Ω došlo k ustálení po osmi periodách na hodnotě 120mV . Pro poslední hodnotu zátěže je po zákmitu v druhé periodě hodnota první harmonické složky ustálena na velikosti 120mV . Ze simulace je tedy patrné, že od velikosti zátěže 100Ω dochází pouze k změně doby ustálení úrovně první harmonické složky a její velikost se nemění.

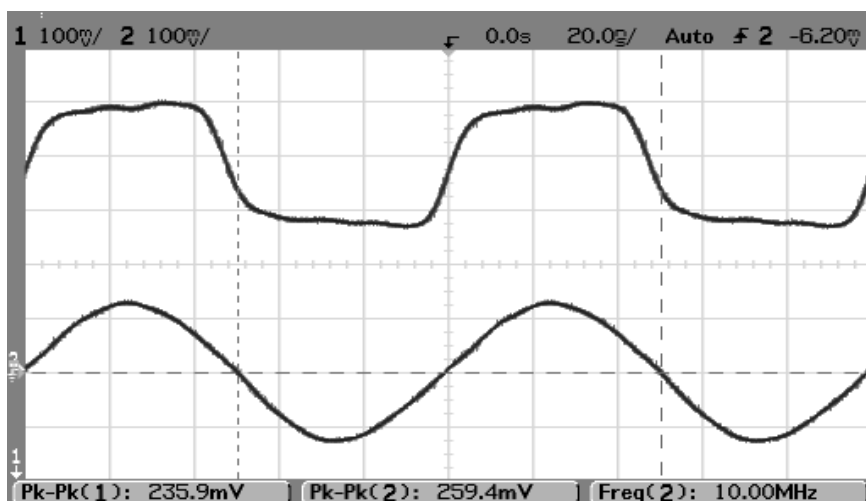
Pomocí rovnic (11,12,13) z kapitoly 3.3.2 je možné spočítat velikost první harmonické složky vstupního signálu, jako $C_k = 2 * c_k = 2 * D \frac{\vartheta}{T_1} \text{sinc} \left(\frac{\vartheta}{2} k \omega_1 \right) =$

$$2 * D \frac{\vartheta}{T_1} * \frac{\sin \left(\frac{\vartheta}{2} k \omega_1 \right)}{\frac{\vartheta}{2} k \omega_1} = 2 * 0,2 \frac{40 * 10^{-9}}{100 * 10^{-9}} * \frac{\sin \left(\frac{40 * 10^{-9}}{2} * 1 * \frac{2\pi}{100 * 10^{-9}} \right)}{\frac{40 * 10^{-9}}{2} * 1 * \frac{2\pi}{100 * 10^{-9}}} = 121,1 \text{ mV}.$$

Spočítaná velikost první harmonické složky odpovídá údajům získaných při simulaci.

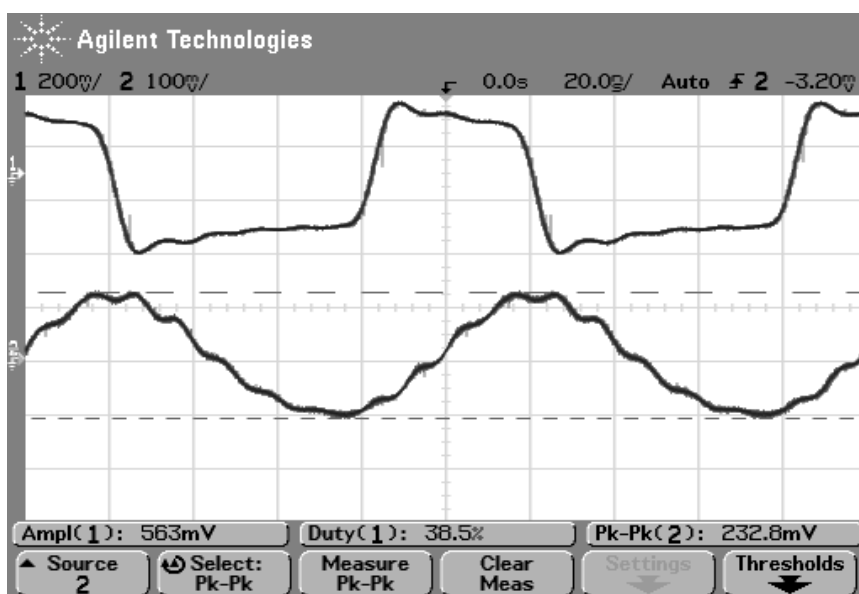
4.2.2.1.2 Měření odezvy PP na obdélníkový signál

U zvolené varianty pásmové propusti bylo provedeno měření, při kterém byl na vstup pásmové propusti přiváděn obdélníkový signál odpovídající průběhu vstupního signálu získaného na výstupu optického zesilovače. Na výstupu byl měřen průběh signálu a jeho parametry. Měření proběhlo pro nezátěženou propust (viz obrázek 4.13),



4.13 Průběh vstupního a výstupního signálu nezatížené PP

pro niž je z průběhů signálů zobrazených v tomto obrázku patrné velké potlačení vyšších harmonických složek obdélníkového signálu, na výstupu je tedy patrná pouze požadovaná první harmonická složka odpovídající referenčnímu signálu. Pokud je k této pásmové propusti připojena zátěž o velikosti 200Ω , klesne činitel jakosti rezonančních obvodů tvořících propust. To má za následek zvýšení šířky pásma propustnosti pásmové propusti. Díky tomu klesne útlum druhé harmonické složky a ta se projevuje v průběhu výstupního signálu zobrazeného na následujícím obrázku (viz obrázek 4.14).



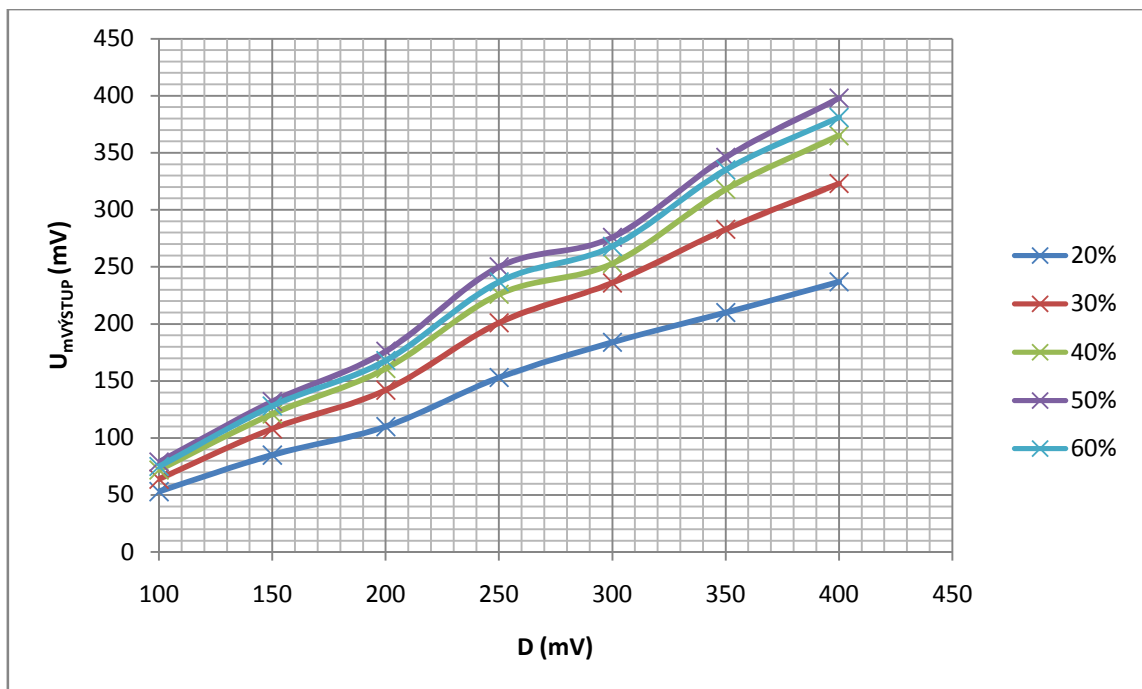
4.14 Průběh vstupního a výstupního signálu zatížené PP

Hodnoty maximální úrovně harmonické složky pro různé hodnoty šířky (ϑ) a velikosti pulzů (D) přiváděných na vstup pásmové propusti zatížené impedancí 200Ω jsou zaznamenány v tabulce (viz Tabulka 5).

Tabulka 5 Velikost harmonické složky na výstupu PP

D (mV)	U _m VÝSTUP (mV)				
	ϑ=20%	ϑ=30%	ϑ=40%	ϑ=50%	ϑ=60%
100	53	64	72	79	75
150	85	108	121	132	128
200	110	142	161	176	168
250	153	201	226	250	237
300	184	236	253	276	268
350	210	283	318	346	335
400	237	323	365	398	381

Závislost maximální hodnoty signálu na výstupu na velikosti pulzů přiváděných na vstup pásmové propusti pro hodnoty střidy vstupního signálu 20=% je zobrazena v následujícím grafu (viz obrázek 4.15).



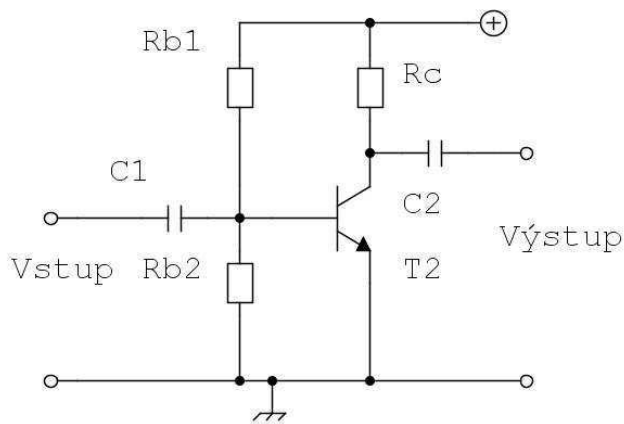
4.15 Graf závislosti maximálního výstupního napětí na velikosti pulzů přiváděných na vstup PP

Pokud nasimulovanou hodnotu převedeme na výkonovou úroveň při zátěži 50Ω , výsledná úroveň spočítaná jako $P = 10 \log \left(\frac{U^2/50}{1mW} \right) = 10 \log \left(\frac{0,108^2/50}{1mW} \right) = -6,32 \text{ dBm}$, není pro synchronizaci měřicího přístroje dostatečná a tudíž je zapotřebí použít zesilovač.

4.2.3 Návrh zesilovače výstupního modulu

Pro zesílení signálu na výstupu pásmové propusti bylo zvoleno použití

jednostupňového zesilovače, v němž je jako aktivní prvek použit vysokofrekvenční bipolární tranzistor BF 240 v zapojení se společným emitorem SE. Zapojení tohoto zesilovače je zobrazeno na obrázku (viz obrázek 4.16).



4.16 Zapojení zesilovače přijímacího modulu

Celá perioda zpracovávaného signálu by měla být zesilována rovnoměrně, proto je zapotřebí nastavit zesilovač tak, aby pracoval v třídě účinnosti A. Klidový pracovní bod je tedy třeba nastavit doprostřed pracovní charakteristiky tranzistoru při velikosti rezistoru $R_c=200\Omega$ (viz 4.9), čímž je zajištěn úhel otevření tranzistoru 360° . Této poloze klidového pracovního bodu odpovídá přepětí na bázi tranzistoru o velikosti 800mV. To je zajištěno pomocí napěťového děliče tvořeného rezistory Rb1 a Rb2. Jelikož rezistor Rb2 tvoří zátěž pásmové propusti. Je nutné jeho hodnotu zvolit tak, aby byla zajištěná dostatečná selektivita této propusti.

Při konstrukci vysílacího modulu byla jako kompromis mezi velikostí signálu přiváděného na vstup zesilovače z výstupu pásmové propusti a její selektivitou zvolena hodnota $R_b2=200\Omega$. Rezistory Rb1 a Rc byly realizovány odporovými trimry, díky čemuž je možné doladit přesné nastavení zesílení a polohu pracovního bodu.

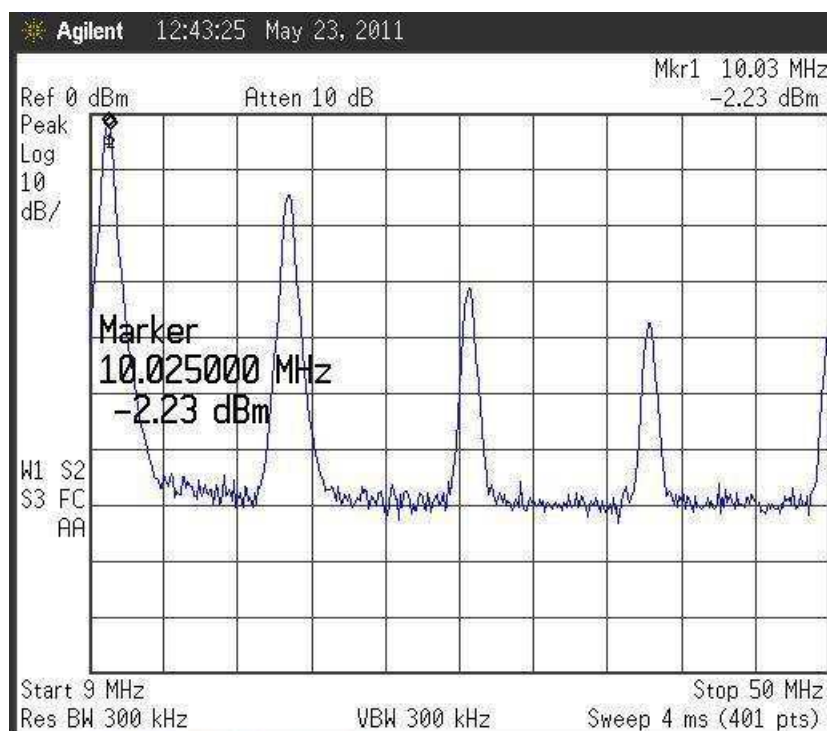
5 TESTOVÁNÍ ZHOTOVENÝCH MODULŮ

Funkce zhotovených modulů byla testována pomocí signálního generátoru (SG) firmy ROHDE&SCHWARZ SML 03 a pektorálního analyzátoru (SA) E7404A vyrobeného firmou HP (dnes AGILENT).

5.1 Zdroj reference ze SG

První byla testována možnost využití signálního generátoru jako zdroje referenčního signálu. Tato varianta je pro funkci synchronizačních modulů méně náročná, jelikož úroveň signálu na referenčním vstupu i výstupu SG jsou oproti SA vyšší. Tudiž je na vysílací modul přiváděn větší signál a na přijímacím modulu, k němuž je připojen SA, je oproti SG požadována menší úroveň signálu.

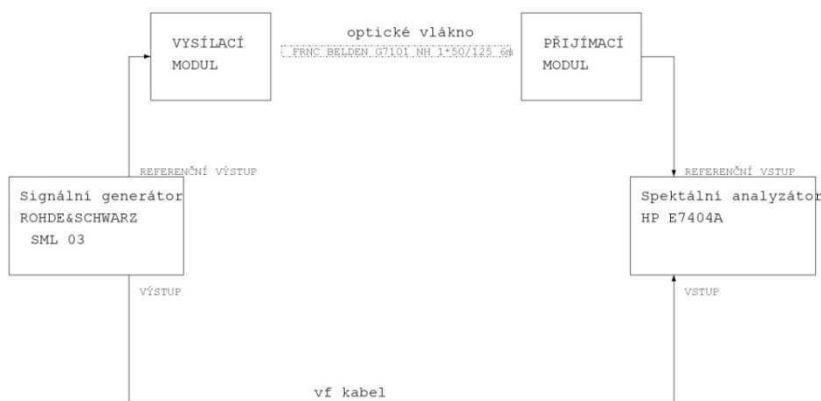
Spektrum signálu na výstupu vysílacího modulu pro tuto variantu je zobrazeno na následujícím obrázku (viz obrázek 5.2).



5.1 Spektrum signálu na výstupu přijímacího modulu při referenci z SG

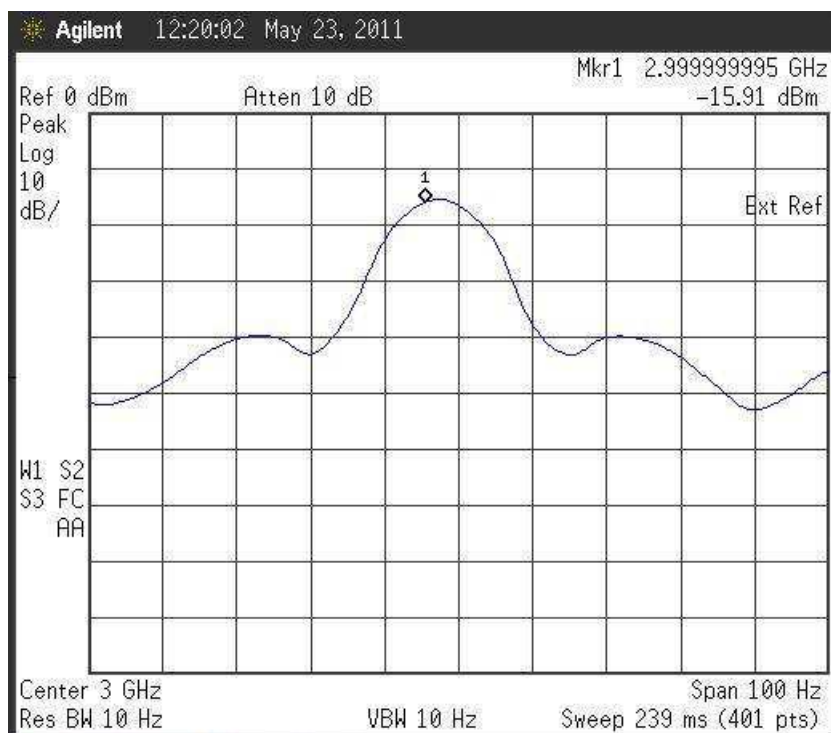
Ze zobrazeného spektra jsou patrné harmonické složky signálu, první harmonická složka odpovídající referenčnímu signálu má výkonovou úroveň rovnu -2.23 dBm, což je pro referenční vstup SA dostačující. Druhá harmonická složka má velikost 14,63dBm a má tedy o 12,4 dB menší hodnotu oproti referenčnímu kmitočtu 10MHz.

Zapojení jednotlivých přístrojů během testování funkce je zobrazeno v následujícím blokovém schématu (viz obrázek 5.2).



5.2 Schéma zapojení přístrojů při testování SG, jako zdroje referenčního signálu.

Jak je ze schématu patrné jsou oba přístroje, u nichž je požadována synchronizace, propojeny vysokofrekvenčním kabelem. Pomocí tohoto kabelu byl z výstupu SG na vstup SA přenášén signál s nosným kmitočtem 3GHz. Výsledky získané na spektrálním analyzátoru jsou zobrazené na obrázku (viz obrázek 5.3).



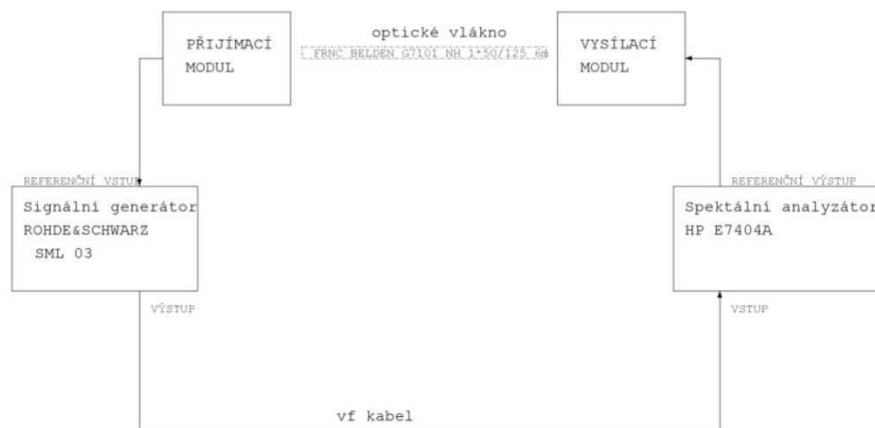
5.3 Výsledky testování SG, jako zdroje reference.

Ve změřeném spektru je patrná složka odpovídající signálu ze signálního generátoru potvrzující synchronizaci přístrojů. Naměřená odchylka signálu o 5Hz je při porovnání s kmitočtem signálu dostatečně malá. Pro toto využití tedy synchronizační moduly zajišťují pro spektrální analyzátor dostatečnou referenci, a tudíž plní svou funkci.

5.2 Zdroj reference ze SA

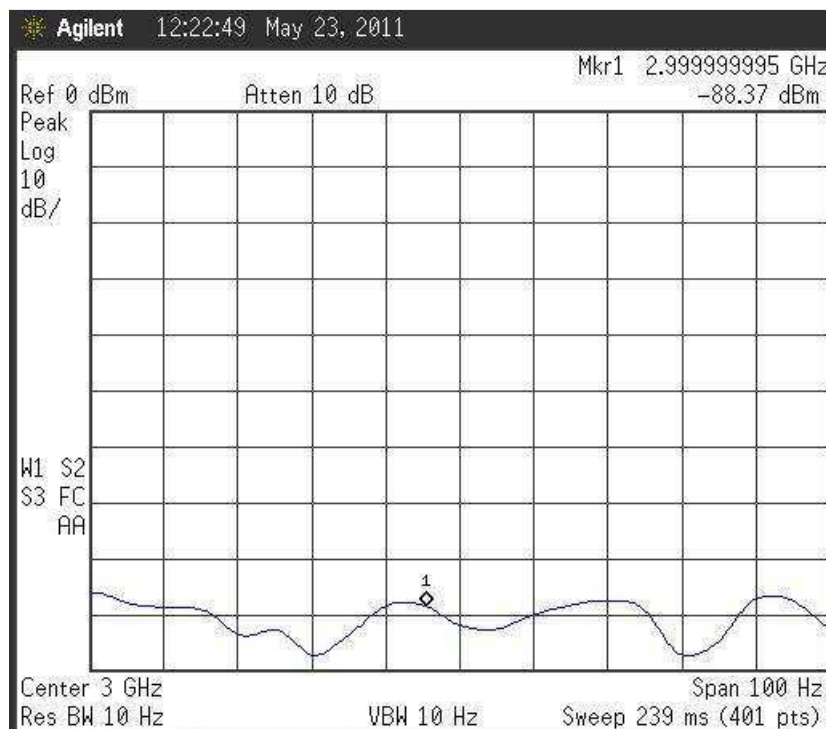
Druhá varianta, využívající jako zdroje referenčního signálu SA, klade na synchronizační moduly vyšší nároky. A to z důvodu, že výrobcem udávaná minimální velikost signálu na referenčním vstupu je o 21dB větší než u SA, navíc dosahuje signál na referenčním výstupu SA menších hodnot než u SG.

Funkce pro tuto variantu použití byla testována stejným způsobem jako u předchozí varianty. Blokové zapojení přístrojů pro tuto variantu je zobrazeno v následujícím obrázku (viz obrázek 5.4).



5.4 Schéma zapojení přístrojů při testování SA, jako zdroje referenčního signálu.

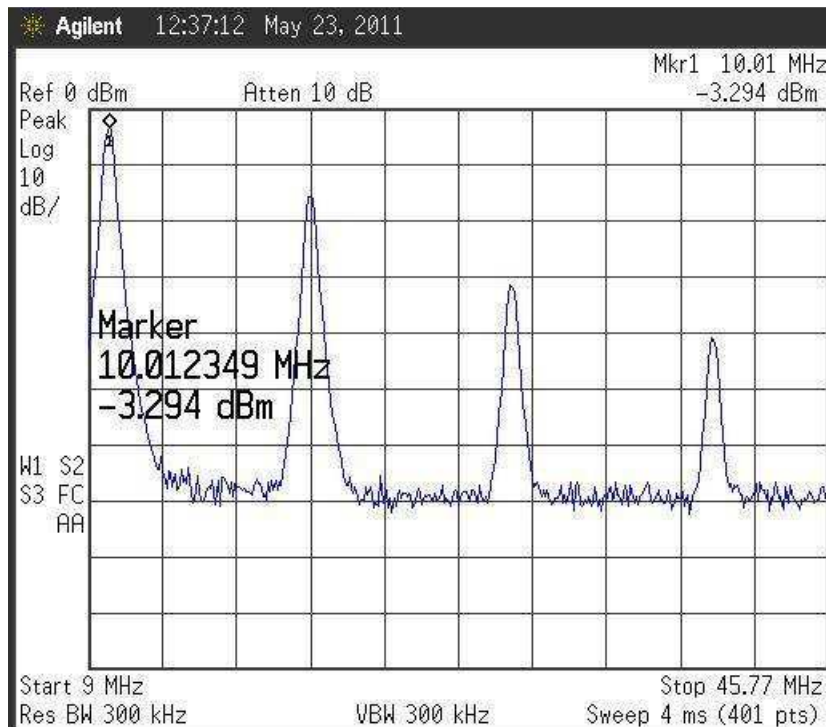
Na dalším obrázku (viz obrázek 5.5) jsou zobrazeny výsledky pro toto zapojení.



5.5 Výsledky testování SA, jako zdroje reference.

Z údajů získaných ze vstupu SA je parné, že odchylka kmitočtu přenášeného mezi přístroji je větší než 50Hz a požadavek na synchronizaci mezi přístroji není splněn.

Na obrázku (viz obrázek 5.6) je zobrazeno spektrum signálu na výstupu přijímacího modulu při využití reference ze SA.



5.6 Spektrum signálu na výstupu přijímacího modulu při referenci z SA

V zobrazeném spektru má první harmonická, odpovídající kmitočtu referenčního signálu 10MHz, velikost -3,294dBm a její odstup od druhé harmonické je 12,21dB. Synchronizace mezi přístroji tedy není zajištěna z důvodu nedostatečné úrovně signálu přiváděného na referenční vstup SG, na kterém je požadována minimální úroveň signálu 7dBm.

Při tomto testování synchronizačních modulů byl využíván optický kabel FRNC BELDEN G7101 NH1*50/125 s délkou přibližně 6m. Tento optický kabel zapůjčil vedoucí této práce Ing. Jiří Dřínovský Ph.D.

6 ZÁVĚR

V první části práce byly prostudovány vlastnosti jednotlivých optických vláken. Z nich bylo s ohledem na potřebné parametry a přiměřenou cenu řešení zvoleno použití multivídrového simplexního vlákna s rozměry 50/125 μm nebo 62,5/125 μm . Pro toto vlákno byly zjištěny parametry na trhu běžně dostupných vláken tohoto typu. Další části přenosové optické cesty byly zvoleny ze série HFBR 0400 vyráběné firmou AGILENT. Konkrétně se jedná o kombinaci optického vysílače HFBR 1414 a optického přijímače HFBR 2416, které pracují s různými velikostmi vláken a vyžadují zakončení vlákna konektory typu ST.

K prozkoumání bližších parametrů referenčního signálu se práce zaměřila na spektrální analyzátoři ze série AGILENT E7400 a signální generátory ze série ROHDE&SCHWARZ SML.

Pro požadované parametry referenčního signálu kladené měřicími přístroji byly vybrány dvě možnosti přenosu referenčního signálu přes optické vlákno. První možností byla amplitudová modulace optického signálu, který je posílán mezi moduly, referenčním signálem. V druhé možnosti je využito faktu, že pro správnou synchronizaci je zásadní kmitočet referenčního signálu. Díky tomu jsou po optickém vláknu přenášeny pouze pulzy, z nichž je v přijímacím modulu za pomoci pásmové propusti obnoven referenční signál.

Pro obě možnosti byly navrženy jednotlivé části vysílacího modulu. Od první možnosti bylo během realizace upuštěno z důvodu velkého zkreslení signálu na vysílacím modulu. Návrh obou modulů byl tedy dokončen pouze pro druhou variantu.

Navržené moduly byly zhotoveny a jejich funkce ověřena při provozu se signálním generátorem ROHDE&SCHWARZ SML 03 a spektrálním analyzátořem AGILENT E7404A. Správná funkce synchronizačních modulů byla ověřena pro využití signálního generátoru, jako zdroje referenčního signálu pro spektrální analyzátoř. Pro opačný případ nebyla úroveň na výstupu přijímacího modulu pro signální generátor dostatečná. Pokud by moduly měly být schopny provozu pro obě varianty, bylo by zapotřebí zvýšit výkon zesilovače přijímacího modulu. Avšak nevýhoda takového řešení by byl malý rozdíl (3dB) mezi potřebnou úrovní signálu pro signální generátor a maximální úrovní signálu na referenčním vstupu spektrálního analyzátoř.

LITRATURA

- [1] WILFERT, O. *Optoelektronika*. Elektronický učební text. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [2] HANUS, S.; SVAČINA, J. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. Přednášky. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [3] BRANČÍK, L. *Analogové elektronické obvody*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [4] PROKEŠ, A. *Rádiové přijímače a vysílače*. Přednášky. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005.
- [5] ŠEBESTA, V.; SMÉKAL, Z. *Signály a soustavy*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [6] MARŠÁLEK, L. *Optická vlákna*. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky informatiky, 2006.
- [7] 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>
- [8] GM Electronic, *Katalog elektronických součástek pro rok 2010*.
- [9] Alternetivo s.r.o. *Sortiment nabídky firmy Alternetivo* [online]. Dostupný z WWW: < <http://www.optickekabely.cz/#> >.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

α_m	mezní úhel dopadu světelného paprsku do optického vlákna
θ_{max}	Příjmový úhel vlákna optického vlákna
$\alpha_{1,OV}$	Koeficient útlumu optického vlákna
α_V	Útlum vazeb optické přenosové cesty
ρ	Systémová rezerva přenosové cesty
$P_{0,P}$	Citlivost optického přijímače
L_{max}	Maximální délka optického vlákna
P_V	Výkon optického vysílače
NA	Numerická aparatura
AVC	Automatické řízení zesílení (Automatic Volume Control)
s	Vyjádření obecného periodického signálu v časové oblasti
T1	Základní perioda periodického signálu
ω_1	Úhlový kmitočet základní periody signálu
c_k	Koeficient z komplexního vyjádření tvaru Fourierovy řady
C_k	Amplituda k-té harmonické složky
φ_k	Počáteční fáze k-té harmonické složky
f_m	Mezní kmitočet dolní propusti
f_r	Rezonanční kmitočet rezonančního obvodu
D	Amplituda pulzu
ϑ	Doba trvání pulzu
X_c	Reaktance kondenzátoru
SA	Spektrální analyzátor
SG	Signální generátor

SEZNAM PŘÍLOH

A Návrh vysílacího modulu

- I Obvodové zapojení
- II Deska plošného spoje 1:1
- III Seznam součástek

B Návrh přijímacího modulu

- I Obvodové zapojení
- II Deska plošného spoje 1:1
- III Seznam součástek