

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole



Diplomová práce

**Návrh a realizace OLED vysílače pro komunikace
ve viditelném světle**

**Design and Realization of OLED Transmitter for Visible Light
Communications**

Vedoucí práce: prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Druhý vedoucí: Ing. Petr Dvořák, Ph.D.

Student: Martin Gill

Praha 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 5. 1. 2019

.....

Podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gill** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **383264**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Komunikační systémy a sítě**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a realizace OLED vysílače pro komunikace ve viditelném světle

Název diplomové práce anglicky:

Design and Realization of OLED Transmitter for Visible Light Communications

Pokyny pro vypracování:

Charakterizujte vybraný OLED panel a navrhnete jeho náhradní obvod. Navrhnete a odsimulujete VLC (Visible Light Communication) vysílač formou proudového zdroje s využitím náhradního obvodu panelu. Vysílač zrealizujete a následně charakterizujete (zejména z hlediska přenosu, frekvenční charakteristiky, komprese zisku, atd.). Ověřte kvalitativní a výkonnostní parametry celého systému měřením BER a přenosových rychlostí pro zvolený modulační formát. Dále se rovněž zabývejte možností ekvalizace pro vytvořený vysílač.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Lin, R.L.; Tsai, J.Y.; Buso, D.; Zisis, G.: OLED Equivalent Circuit Model with Temperature Coefficient and Intrinsic Capacitor. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 1, pp. 493-501, Jan.-Feb. 2016. doi: 10.1109/TIA.2015.2464180
[2] Haigh, P. A. et al.: Visible light communications using organic light emitting diodes. Communications Magazine, IEEE, vol. 51, pp. 148-154, 2013.
[3] Haigh, P.A.; Burton, A.; Komanec, M.; Ghassemlooy, Z.; Zvanovec, S.: Optoelectronic and OLED devices. Visible Light Communication Systems: Theory, Applications and Future Trends, ed. Luis Nero et al., CRC Press, 2017.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Petr Dvořák, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Datum zadání diplomové práce: **16.01.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem vysílače pro OLED (Organic Light Emitting Diode) panel a jeho následným využitím v rámci technologie VLC (Visible Light Communication). Bylo vytvořeno několik návrhů řešení. Součástí této práce jsou simulace v programu LTspice, Tina a Multisim. Po realizaci základních testů v rámci simulací byly vyrobeny desky plošných spojů, na kterých byly následně realizovány verifikační testy. Při těchto verifikačních testech byly změřeny klíčové parametry BER, EVM, MER a také frekvenční charakteristika a komprese zisku.

Klíčová slova:

vysílač, OLED, komunikace, VLC, tranzistor, operační zesilovač

Summary:

The MA thesis deals with a transmitter designed for an OLED (Organic Light Emitting Diode) panel and its subsequent use in the VLC (Visible Light Communication) technology. Several designs were created. Simulations in LTspice, Tina and Multisim were also part of the project. For realizing the basic tests, printed circuit boards were made and subsequently used for conducting the verification tests. The key parameters namely BER, EVM, MER and also frequency characteristics and gain compression were measured during the verification test.

Index Terms:

transmitter, OLED, communication, VLC, transistor, operational amplifier

Poděkování

Předně bych chtěl poděkovat profesoru Zvánovcovi a doktoru Dvořákovi, kteří mi byli dobrými vedoucími a pomáhali mi s nalezením řešení pro problémy, které se v rámci mé práce občas objevily. Doktoru Dvořákovi děkuji za hodiny, které mi věnoval a strávil se mnou v laboratoři.

Rád bych poděkoval i všem ostatním lidem, se kterými jsem konzultoval některé otázky a kteří mi pomohli vnést do práce zase jiný pohled na mnou řešené věci a díky nimž jsem se mohl posouvat dál.

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Analýza zadání | 5 |
| 2.1 | VLC princip | 5 |
| 2.2 | Typy možných modulací | 6 |
| 2.3 | OLED technologie | 7 |
| 2.3.1 | Substrát | 7 |
| 2.3.2 | Organické vrstvy | 8 |
| 2.3.3 | Zapouzdření | 8 |
| 2.3.4 | Funkční princip | 8 |
| 2.4 | Využití OLED ve VLC | 9 |
| 2.5 | Ekvalizace | 10 |
| 2.6 | Proudové zdroje | 11 |
| 2.7 | Blokové schéma vysílacího a přijímacího řetězce | 12 |
| 3 | Návrh | 15 |
| 3.1 | Obecné hodnoty vstupního signálu | 15 |
| 3.2 | OOK modulace | 15 |
| 3.3 | QAM modulace | 16 |
| 3.4 | Elektrické parametry OLED panelu | 19 |
| 3.5 | Parametry požadovaného výstupního signálu | 20 |
| 3.6 | Náhradní model OLED panelu | 21 |
| 3.7 | Zapojení 1 | 22 |
| 3.8 | Zapojení 2 | 26 |
| 4 | Simulace | 29 |
| 4.1 | Zapojení 1 | 29 |
| 4.1.1 | První stupeň | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1.2 | Druhý stupeň | 31 |
| 4.2 | Zapojení 2 | 33 |
| 4.2.1 | První stupeň | 33 |
| 4.2.2 | Druhý stupeň | 34 |
| 5 | Návrh desek plošných spojů a jejich oživení | 37 |
| 5.1 | Návrh a realizace DPS pro první zapojení | 37 |
| 5.1.1 | Prototypová deska | 39 |
| 5.1.2 | Deska pro OPA2192 a OPA197 | 40 |
| 5.2 | Návrh a realizace DPS pro druhé zapojení | 42 |
| 6 | Měření | 45 |
| 6.1 | BER | 46 |
| 6.2 | EVM | 46 |
| 6.3 | MER | 47 |
| 6.4 | Měření zapojení 2 | 48 |
| 6.4.1 | Měření frekvenční charakteristiky | 48 |
| 6.4.2 | Měření komprese zisku | 49 |
| 6.4.3 | Měření EVM a MER | 50 |
| 7 | Závěr | 57 |

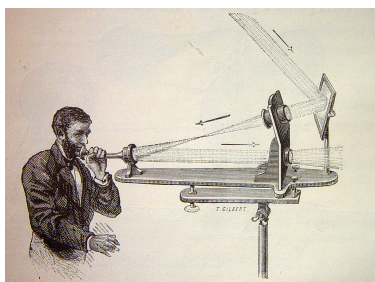
Kapitola 1

Úvod

Nejprve je nutné uvědomit si a definovat, co se vlastně pod termínem komunikace ve viditelném světle (VLC, v originále Visible Light Communication) skrývá.

Při pohledu do historie je možné nalézt zmínky o tom, že komunikace ve viditelném spektru se na různých technologických úrovních používá už mnoho staletí. Již v pravěku po objevení ohně je možné vidět snahy jednotlivých skupin o komunikaci, ať už pomocí paprsků světla generovaných právě ohněm nebo kouřem z ohně. Zajímavým příkladem je také použití železných vojenských štítů, které měly přední stranu natolik lesklou, že jimi byly odráženy sluneční paprsky, a tím docházelo k předávání signálu z jednoho místa na druhé. Díky tomu tak například voják bojující v údolí mohl předat zprávu hlídce, která byla na kopci, a došlo k interpretaci signálu.

Objevily se ovšem i vynálezy, které nenalezly reálně moc velké uplatnění. Jedním z nich je Bellův „fotofon“ (v originále „photophone“), jehož nákres je na obrázku 1.1. Jednalo se o soustavu zrcadel a čoček, které převedly hlas na vibrace světelného paprsku, a poté došlo k přenosu hlasu.



Obrázek 1.1: Dobová ilustrace Bellova fotofonu [1].

Některé vynálezy ovšem vydržely sloužit mnohem delší dobu, a to i když to s nimi na počátku z hlediska reálného použití nevypadalo zcela optimisticky. Takovým příkladem je „Morseova lampa“, která je v současnosti stále používána. Funguje opět na principu generování světelných pulzů pomocí světelného zdroje (například lampa nebo jakýkoliv jiný světelný zdroj). Tento zdroj stmíváme a rozsvěcíme, v podstatě můžeme zdroj světla překrýt a odkrýt (máme binární zdroj dat, svítí = 1, nesvítí = 0). Jedná se tedy o změny zachytitelné bezpřístrojově lidským okem. Tohoto principu se využívá v Morseově telegrafu. Je zde nutná přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem a to je také hlavní nevýhodou tohoto řešení.

Výše zmíněné vynálezy a technologie fungovaly na principu změny světla, které bylo možné pozorovat pouhým okem. Bylo možné jen přenášet data, ale nebylo možné tímto zdrojem trvale svítit (bez blikání). Toto řešení by bylo z dnešního pohledu nevhodné pro globální nasazení a vývoj se tak začal ubírat směrem k velkým přenosovým rychlostem a typům modulací, kde lidské oko nedokáže zaznamenat to, že zdroj světla mění svoji intenzitu svitu (bliká), a neví tedy, že právě dochází k přenosu dat.

Díky masivnímu rozvoji v oblasti LED (Light Emitting Diode) zdrojů, které se čím dál více uplatňují v domácnostech, průmyslu a dalších oblastech, se používají v dnešní době převážně LED a OLED (Organic Light Emitting Diode). I kvůli vlastnostem daných LED technologií dochází k tomu, že se LED objevují prakticky na každém rohu. Ať už se jedná o LED technologii ve světlometech aut nebo LED veřejné osvětlení na ulici.

I z důvodu výše zmíněného globálního rozmachu se mnoho firem začalo zabývat myšlenkou použít pro VLC právě LED nebo OLED technologie. V listopadu 2015 otestovala estonská společnost Velmenni řešení, které se jmenuje „Li-Fi“. Podle [2] je v laboratorních podmínkách možné dosáhnout teoreticky maximální přenosové rychlosti až 224 Gbps. I když uvážíme, že v reálném provozu budou výsledné přenosové rychlosti nižší, jedná se stále o hodnotu, která značně překonává současné technologie (Wi-Fi). Aktuálně nejvíce využívané Wi-Fi technologie pracují s rychlostmi nižšími. Standard 802.11n pracuje s rychlostí 300 Mbps. Modernější standard 802.11ac dosahuje teoretických přenosových rychlostí v závislosti na konfiguraci klientské strany až 7 Gbps. Ovšem i díky zarušení frekvenčních pásem pro Wi-Fi dosahují používaná zařízení reálných rychlostí kolem 1 Gbps. V přehledu v článku [3] je uvedena nejvyšší reálná rychlost VLC systému za použití modulace OFDM („Orthogonal Frequency Division Multiplex“) 10 Gbps.

Je patrné, že technologie VLC dnes poskytuje skutečně velké možnosti pro řešení rozličných technologických problémů, ať už se jedná o využití v dopravě nebo komunikaci například s lampami veřejného osvětlení. Zde by se dalo uvažovat o tom, že lampa předá informaci zabudovanému systému ve voze a následně se pak řidiči objeví varování o tom,

že před ním je nějaké nebezpečí, například ve formě autonehody, nebo třeba informace o náledí (ale to už uvažujeme koncept skutečně chytrých měst). Díky tomu bude mít řidič čas se připravit na danou situaci. Pokud bychom uvažovali dnešní rozmach autonomních vozidel, tak si lze představit, že řidič ani nebude vědět, že nastala takováto událost, a auto samo přeplánuje například cestu domů tak, aby řidič utrpěl co nejmenší časovou ztrátu. Další ze zajímavých myšlenek je využití pro slepce. Jedná se o koncept tzv. chytré slepecké hole, která bude komunikovat s osvětlením v rámci kancelářské budovy a bude tak slepce navigovat po budově do například požadovaných dveří. Slepce vstoupí do budovy a od prvního světla získá informaci, že se nachází ve firmě XY a že má na holi zvolit číslo kanceláře, a poté bude postupně od dalších světel dostávat směrové informace.

OLED technologie se od LED technologie odlišuje především tím, že se jedná o plošné zdroje světla, jako jsou panely různých velikostí, ale i vlastností. Co se týče fyzických vlastností, ty se dělí do dvou hlavních skupin: flexibilní a pevné. Flexibilní panely mají obrovskou výhodu, a to, že se dají vytvarovat a přizpůsobit v podstatě jakémukoliv tvaru, který zákazník požaduje.

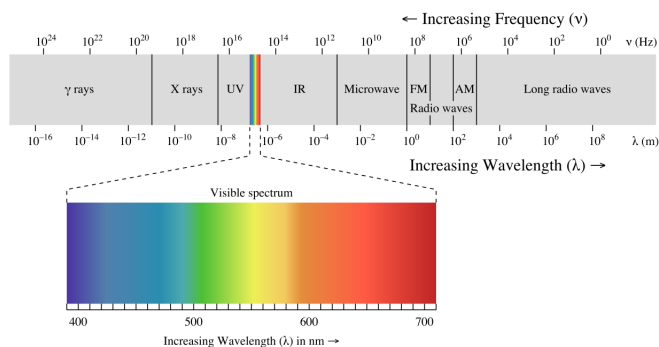
Tato práce se zaměřuje na návrh a realizaci OLED vysílače pro komunikace ve viditelném světle. V kapitole 2 je popsána analýza zadání, ve které je ve zkratce popsán princip technologie VLC, dále pak uvedené typy modulací, vysvětlena OLED technologie a její využití ve VLC a také vysvětleno, co je ekvalizace, proudový zdroj a také je tam uvedeno ilustrační blokové schéma vysílacího a přijímacího řetězce. V kapitole 3 je popsán vstupní signál, podrobněji vysvětleny modulace, elektrické parametry OLED panelu a parametry požadovaného výstupního signálu. Dále je zde uveden náhradní model OLED panelu a návrhy obou zapojení včetně výpočtů. V kapitole 4 jsou popsány a zobrazeny simulace obou zapojení. Kapitola 5 detailně popisuje všechny návrhové kroky, které vedly k realizaci finálních desek plošných spojů. Dále je pak v kapitole 6 popsáno měření klíčových parametrů BER, EVM, MER a dále pak měření frekvenční charakteristiky a komprese zisku. V 7. kapitole je pak závěrečné shrnutí a zhodnocení této diplomové práce.

Kapitola 2

Analýza zadání

2.1 VLC princip

Světlo je ve své podstatě elektromagnetické záření, které má určitou vlnovou délku. Lidské oko dokáže vnímat světlo v rozmezí vlnových délek 390 až 790 nm. Je zřejmé, že lze pracovat s poměrně velkou šířkou pásma, kterou lze využít při návrhu vysílače. Šířka pásma je znázorněna na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Elektromagnetické spektrum světla [4].

Aktuálním trendem je používání hlavně LED a OLED světelných zdrojů. To je dáno především jejich vlastnostmi, které umožňují takové použití, které u starších technologií (wolframové, halogenové a jiné typy starších světelných zdrojů) není možné. Hlavní výhodou je tzv. doba náběhu, tedy čas, který je potřebný k rozsvícení LED žárovky z 10 na 90 % její intenzity. U LED a OLED se uvádí řádově nanosekundy, u specializovaných laserových LED se jedná i o desítky pikosekund. Tyto rychlé doby náběhu umožní

získat velké přenosové rychlosti pro například VLC.

Z hlediska funkčního principu dochází k modulaci napětí, respektive proudu vstupujícího do LED diody při vysoké frekvenci. O lidském oku se obecně uvádí, že od zhruba 60 Hz nedokáže rozpoznat, jestli zdroj světla bliká, nebo svítí konstantně. Toho se využívá právě ve VLC. Člověk není rušen přenosem dat, protože díky malé rychlosti vnímání oka nevnímá samotný přenos, ale jen stálý svit.

2.2 Typy možných modulací

U VLC je možné využít více druhů modulací. Mezi nejzajímavější z nich patří:

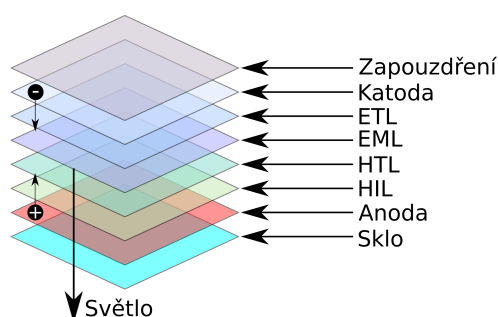
1. Modulace „OOK“, v originále „on-off keying“ (česky „klíčování amplitudovým posunem“). Tato modulace funguje tak, že v případě přítomnosti „logické 1“ se vysílá nosný signál a ve chvíli, kdy máme v nějakém datovém rámci „logickou 0“, se nosný signál nevysílá. Toto je výhodné z hlediska úspory energie. Jedná se o dvoustavovou modulaci. Tato modulace byla v této práci zvolena jako primární z důvodu potenciálně snadného řešení a díky teoreticky vysokým rychlostem.
2. Modulace „QAM“, v originále „Quadrature Amplitude Modulation“ (česky kvadrurní amplitudová modulace). U této modulace se používají standardně dva signály, které se vůči sobě posunou fázově o 90 stupňů, a zároveň dojde i k jejich amplitudovému posunutí. Sloučením těchto signálů získáme výsledný signál, který je možné demodulovat v QAM demodulátoru a následně tato data interpretovat v konstelačním diagramu. V této modulaci je frekvence konstantní a mění se amplituda a fázový posun. Tato modulace byla zvažována jako sekundární pro tuto práci, a to díky poměrně vysokým přenosovým rychlostem, ale na druhou stranu představuje složitější řešení než výše zmíněná OOK. Tento typ modulace bude podrobněji popsán v části 3.3.
3. Modulace „PWM“, v originále „Pulse Width Modulation“ (česky „Pulzně šířková modulace“). U této modulace se mění šířka vyslaného pulzu v závislosti na amplitudě vstupního signálu. Tato modulace se většinou kombinuje s modulací „PPM“, v originále „Pulse Position Modulation“ (česky „Pulzně polohová modulace“).

U PPM je aktuální hodnota signálu vyjádřena jako časová poloha impulzu v daném datovém rámci. Délka rámce je shodná s délkou vzorkovací periody. PPM slouží k vysílání dat a PWM pro změnu jasu daného světelného zdroje. PWM lze použít samostatně, ale kvůli její složitosti to není vhodné řešení pro tuto práci.

4. Modulace „OFDM“, v originále „Orthogonal Frequency Division Multiplex“ (česky „ortogonální multiplex s frekvenčním dělením“). Přivedený signál je rozdělen do mnoha dílčích signálů. Pro každý dílčí signál se použije jiná frekvence, proto je nutné mít velkou šířku pásma. Z důvodu neporušení ortogonality musí mít dílčí signály ekvidistantní rozdělení.

2.3 OLED technologie

OLED je zkratkou pro anglický termín „Organic Light Emitting Diode“. V češtině se tento výraz obvykle překládá jako organická elektroluminiscenční dioda.



Obrázek 2.2: OLED struktura.

Z obrázku 2.2 je patrné, že OLED panel je složen z několika vrstev. OLED panely, které byly použity v této práci, mají podle datasheetu výrobce sedm vrstev [5]. Těchto 7 vrstev můžeme rozdělit na několik dílčích prvků:

- substrát,
- organické vrstvy,
- zapouzdření.

2.3.1 Substrát

Jako substrát se dnes používají převážně 3 druhy materiálů [6], konkrétně pak kovová folie, plast a sklo. Tyto materiály mají samozřejmě různé výhody a nevýhody. Kovová folie má největší nevýhodu v tom, že není transparentní, ale snese řádově vyšší teploty než například plastový substrát. Zároveň je odolná proti elektromagnetickému rušení. Plastový substrát má hlavní nevýhodu v tom, že je náročnější na výrobu, která probíhá

ve vyšších teplotách. Jeho hlavní výhodou je, že s ním lze realizovat ohebný OLED panel. Skleněný substrát je nejsnazší na výrobu, ale zároveň má největší křehkost. Je také nejtěžší.

2.3.2 Organické vrstvy

Jak lze vidět na obrázku 2.2, mezi anodou (dochází na ní k pohlcování elektronů) a katodou (dochází na ní k tvorbě elektronů) se ještě nachází několik vrstev, které jsou nutné k emisi náboje – tedy světla. Jednotlivé vrstvy zajišťují tyto funkce:

1. HIL v originále „Hole Injection Layer“ (česky „vrstva vytvářející díry“). V této vrstvě se generují díry.
2. HTL v originále „Hole Transport Layer“ (česky „vrstva přenášející díry“). V této vrstvě se přenáší díry.
3. EML v originále „Emissive Layer“ (česky „emisní vrstva“). V této vrstvě se vyzáří foton.
4. ETL v originále „Electron Transport Layer“ (česky „vrstva přenášející elektrony“). V této vrstvě se přenáší elektron směrem dále od katody.

2.3.3 Zapouzdření

OLED technologie bohužel trpí velkou náchylností k okolním vlivům. Jedním z takových vlivů je třeba působení vody, nebo i jen působení kyslíku, oboje totiž může vést ke zničení OLED panelu. Proto je nutné dokonale OLED panel zapouzdřit (utěsnit) proti těmto okolním vlivům, ale zároveň je nutné dodržet požadavek, aby měl panel co největší transparentnost a případně aby si po zapouzdření zachoval i svoji ohebnost (pokud se jedná o ohebný OLED panel). Pro panely, které jsou neohebné, se nejčastěji používají skleněné materiály. U panelů, u kterých je požadavek ohebnosti, se používají zpravidla tenké filmy z polymerových materiálů. U panelu, který byl použit v rámci této práce, výrobce používá technologii, která se nazývá „Face Seal“. Podle výrobce [7] jde o vícevrstvý film složený z několika organických a anorganických vrstev. „Face Seal“ se používá u ohebných i pevných panelů.

2.3.4 Funkční princip

Přivede-li se napětí na katodu, dojde k zahájení vyzářování elektronů (negativních nábojů). Elektrony následně projdou přes vrstvu ETL a EML. Současně v daný okamžik

dojde k tomu, že anoda vyše pozitivní náboj, který vstoupí do HIL vrstvy. Tento náboj způsobí, že ve vrstvě HIL se začínají generovat díry a ty začínají postupovat skrz vrstvu HTL a následně vstupují do vrstvy EML. Jak je patrné, tak právě ve vrstvě EML dojde k tomu, že se elektrony potkají s dírami a to vede ke vzniku párů elektron-díra. Při vzájemné rekombinaci párů ve vrstvě EML dochází k jejich zániku a právě při zániku páru dojde k vyzaření fotonu. Tento děj probíhá neustále ve chvíli, když je připojený zdroj napětí. Ve chvíli, kdy je zdroj napětí odpojen, se proces přeruší a nedochází ke generaci fotonů. Tedy díky rekombinaci párů dojde k tomu, že panel začne vyzařovat světlo.

2.4 Využití OLED ve VLC

OLED technologie pro použití ve VLC je stále spíše otázkou výzkumu. Podle zdroje [8] je hlavní doménou pro OLED technologii využití převážně v displejích (ať už se jedná o displeje dnešních tabletů, mobilních telefonů nebo i televizorů). V osvětlovací technice si svoji cestu stále ještě razí. Přeci jen OLED není ani v současnosti výrobně levná záležitost [8], a proto se objevuje u například drahých designových svítidel. Tam se pak už využívají i ohebné panely pro různě tvarované oblouky a další dekorační prvky. V tuto chvíli se OLED panely vyrábí pomocí metody vakuové depozice, případně pomocí napařování. Pro obě tyto metody jsou výrobní procesy velmi nákladné. Zároveň jednou z nevýhod je i relativně nízká životnost OLED panelu. U panelu použitého v této práci se jedná o životnost 40000 hodin, což na první pohled vypadá jako dobrá životnost, ale je nutné brát v potaz poměrně malou svítivost daného panelu (20 lm při ideálních podmínkách). U panelů s vyšší svítivostí se jejich životnost snižuje i na hodnotu kolem 10000 hodin.

Jak bylo zmíněno v kapitole 1, v dnešní době se ve VLC používají převážně LED diody, nikoliv OLED. Přitom OLED má velkou výhodu v tom, že s rostoucími rozměry daného OLED panelu nerostou přímo náklady na výrobu. Kdežto vyrobit velkou LED diodu s velkou plochou svitu je drahé. Limitací rozměru OLED panelu je jen a pouze velikost stroje, který daný panel vyrábí. Nevýhodou OLED panelu je jeho velká kapacita, která je způsobena nízkou tloušťkou. Velká kapacita pak vede k poměrně malé šířce modulačního pásma.

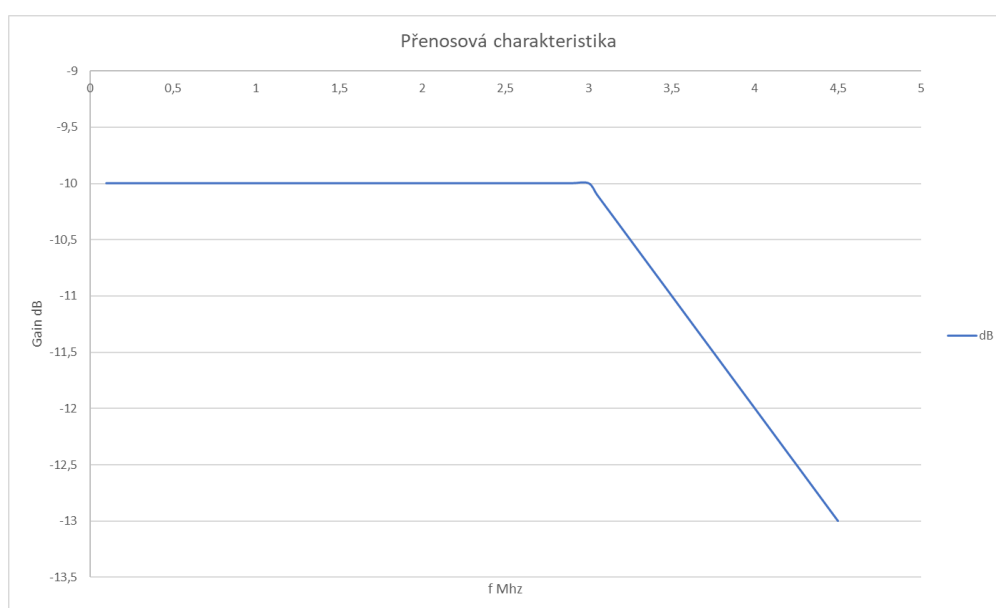
K OLED panelu je nutné přistupovat jinak než k LED. Jednou z možností, jak řešit dosažení vyšších rychlostí, je ekvalizace. Zde je možné použití i moderního strojového učení (umělá neuronová síť), což následně umožňuje dosáhnout i maximální rychlosti přenosu a zároveň minimálních přeslechů mezi modulovanými daty (stavy).

Jak tedy vyplývá s přehledu výše, majoritně užívaným řešením jsou stále spíše LED

technologie a doménou OLED technologie je bohužel především výzkum. Nepodařilo se dohledat žádné konkrétní zařízení s OLED technologií, které by se masově vyrábělo a bylo by ho možné zakoupit. LED těží z toho, že existuje delší dobu, a tedy čas strávený výzkumem LED a OLED se velmi liší.

2.5 Ekvalizace

Pokud je vytvářen návrh zesilovače nebo i vysokofrekvenčního proudového zdroje, tak je nutné zohlednit to, že se v celém frekvenčním pásmu nebude OLED panel chovat stejně (ilustrační přenosová charakteristiky viz obrázek 2.3).

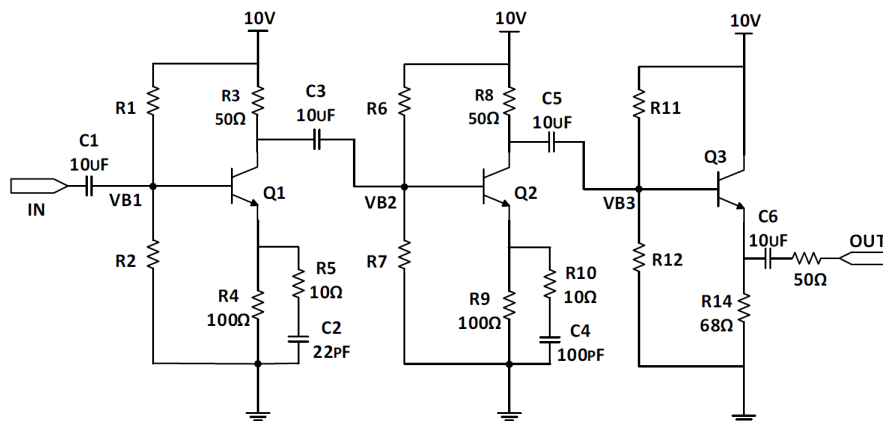


Obrázek 2.3: Ilustrační přenosová charakteristika vysílače.

V ideálním případě bychom tedy měli stále neklesající přímku, kdy se snižujícím se, respektive zvyšujícím se kmitočtem bude amplituda signálu pořád stejná a nebude zde docházet k útlumu. Toho nelze v reálném prostředí dosáhnout a je nutné to vyřešit jiným způsobem – ekvalizací.

Ekvalizaci si v základu můžeme představit tak, že se nám ohyb (místo, kdy začne prudce klesat zisk) z grafu posune více doprava a tedy zvýší šířku pásma mnou navrženého vysílače. Ekvalizaci je možné řešit jak na straně vysílače, tak i přijímače. Jednoduchou ekvalizaci lze realizovat například jako tranzistorové zesilovače pro dané kmitočty, kdy ještě můžeme dosáhnout toho, aby amplituda stále neklesala.

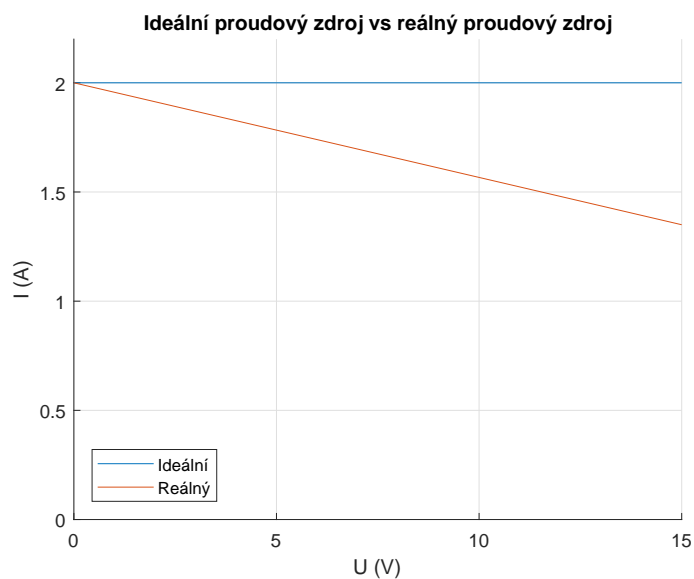
V rámci řešení pro tuto práci byl nalezen článek [9], který nabízí poměrně jednoduchou ekvalizaci. Jedná se o třístupňový zesilovač s velkou šířkou pásma (schéma na obrázku 2.4). Tento návrh se jeví použitelný pro mnou navržený vysílač na bázi proudového zdroje.



Obrázek 2.4: Ekvalizační obvod [9].

2.6 Proudové zdroje

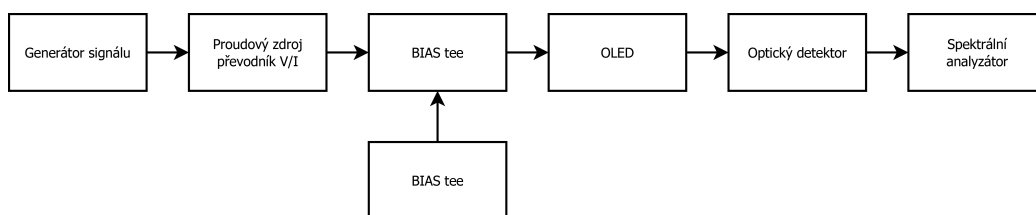
Ideální proudový zdroj je takový zdroj, který dokáže dodat požadovaný proud nezávisle na potřebném napětí (srovnání ideálního a reálného zdroje na obrázku 2.5). Takovýto ideální zdroj má pak nekonečný vnitřní odpor. Samozřejmě, že u reálného zdroje nelze docílit nekonečného vnitřního odporu.



Obrázek 2.5: Porovnání ideálního a reálného proudového zdroje.

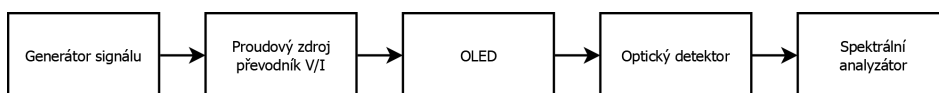
2.7 Blokové schéma vysílacího a přijímacího řetězce

Zadáním práce je navrhnout a odsimulovat vysílač pro komunikaci ve viditelném spektru formou proudového zdroje. Bylo tedy nutné sestavit blokové schéma celkového komunikačního řetězce. Byla vytvořena dvě možná schémata. První schéma, ve kterém je použit prvek „bias tee“, je ilustrováno na obrázku 2.6. Toto řešení bylo navrženo se záměrem pomocí proudového zdroji tím, že se na panel přivede stejnosměrná složka o takové úrovni, aby OLED panel byl ideálně v lineární oblasti, tedy aby svítil alespoň na určité úrovni.



Obrázek 2.6: Blokové schéma zapojení.

Druhé schéma, obrázek 2.7, je bez tohoto členu. Do panelu tedy bude dodán požadovaný proud s takovou napěťovou úrovní, aby panel fungoval korektně.



Obrázek 2.7: Blokové schéma zapojení.

Bylo také nutné vybrat vhodný generátor. V této práci byly použity dva generátory. Jako první byl použit signálový generátor firmy Hameg HMF2525. Tento generátor je výhodný v tom, že do něj lze přes USB rozhraní nahrát signál vygenerovaný například v Matlabu. Toho bylo v této práci využito, jak bude podrobněji vysvětleno v další kapitole. Pro začátek bylo potřeba zvolit určitou napěťovou úroveň, v rámci prvotních výpočtů bylo pracováno s hodnotou 2 V. Generátor je impedančně přizpůsoben pro 50 Ω a tedy je schopný do této zátěže takový výkon dodat.

Druhý použitý generátor je od firmy Rohde & Schwarz a jedná se o model SMW200A. Tento generátor je mnohem pokročilejší oproti prvnímu a skýtá široké možnosti nastavení jednotlivých modulací, datových rámců a výkonových úrovní.

Pro proudový zdroj bylo simulováno a vyzkoušeno několik různých zapojení.

V této práci byl použit jeden typ OLED panelu o rozměrech 53 \times 55 mm, který je vyroben firmou LG Chem Ltd. Jeho modelové označení je N6SB30 (přehled parametrů tohoto panelu viz obrázek ??).

Optické detektory použité v práci byly pak dva různé modely, konkrétně modely PDA10A a APD430A od výrobce Thorlabs, Inc [11].

Jako spektrální analyzátor byl zvolen model FSW od firmy Rohde & Schwarz a jako osciloskop pak LeCroy WaveRunner 640z.

Výhodou tohoto řešení je, že lze snadno změnit způsob modulace a měnit tak například kmitočet nebo přenosovou rychlost.

[Type 1] Bare panel (Panel without PCB)

1. Ordering Information

| Model | Description | Efficacy | CCT | Product Code |
|----------|-------------|----------|-------|-----------------|
| N6SB30-B | Bare Panel | 60lm/W | 3000K | OR01SAA9FBAAF00 |

2. General Conditions

| Parameter | Temperature | Humidity | Remark |
|---------------------|-------------|----------|-----------------|
| Storage condition | 0°C~40°C | < 70% RH | |
| Transport condition | -20°C~60°C | < 85% RH | Not over 170hrs |
| Operating condition | 0°C~40°C | < 70% RH | |

3. Maximum Ratings

| Parameter | Sym | Unit | Max. | Condition |
|--------------------|----------------|------|------|----------------------|
| DC Forward Voltage | V _F | V | 10.0 | T _A =25°C |
| DC Forward Current | I _F | mA | 70 | T _A =25°C |

Disclaimer: Device reliability may be affected if product is operated beyond the given conditions for an extended period of time

4. Electrical & Optical Characteristics

Operation @ 20lm

| Parameter | | unit | Min. | Typ. | Max. |
|-----------------|---|-----------------------------|--------|---------------------------------|-------|
| Electrical data | Forward voltage | V | 8.2 | 8.5 | 8.8 |
| | DC forward current (Current density) | mA (mA/cm ²) | | 40 (1.85mA/cm ²) | |
| | Power consumption | W | 0.33 | 0.34 | 0.35 |
| Optical data | CCT (integrated) | K | 2800 | 3000 | 3200 |
| | CRI | Ra | 88 | 90 | |
| | Duv | | -0.005 | | 0.005 |
| | Spatial uniformity* | % | 85 | | |
| | Efficacy | lm/W | 55 | 60 | 65 |
| | Flux | lm | 17 | 20 | 23 |
| Lifetime** | LT70, @ 1.85mA/cm ² | Hrs. | 40000 | | |

* Luminous uniformity calculation formula: $U = [1 - (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})] \times 100\%$

** Operating Lifetime is from the beginning of operation until brightness reaches 70% of the initial luminance.
(Assumed Operating Condition: 25 °C at typical brightness level)

Obrázek 2.8: Parametry OLED panelu N6SB30. [10]

Kapitola 3

Návrh

3.1 Obecné hodnoty vstupního signálu

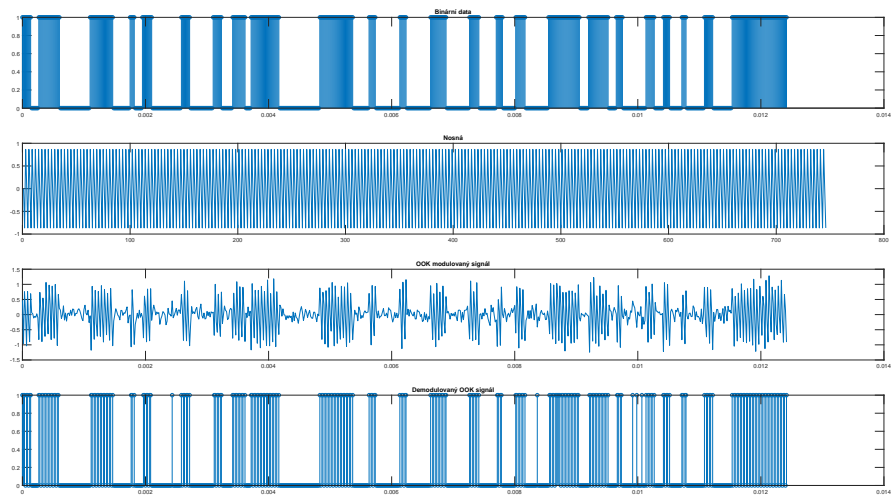
Ve všech zapojeních bylo uvažováno, že v rámci vstupního signálu bude možné nastavovat úroveň amplitudy. Pro finální zapojení bylo potřeba, aby se vstupní hodnota napětí (úroveň amplitudy) pohybovala od 0 V do 2 V. Se změnou velikosti amplitudy dochází přímo k řízení výstupního proudu. Čím větší je napětí, tím větší je proud na výstupu. Toto je detailněji popsáno v kapitole s návrhem zapojení (viz 4.2). Co se týče frekvencí, byl uvažován signál v rozmezí od 50 kHz do 2 MHz a v tomto pásmu byly prováděny verifikační testy daného zapojení.

3.2 OOK modulace

OOK (OOK v originále „on-off keying“) modulace by měla být pro tuto problematiku vhodná.

V této modulaci máme nosný signál, pro který se použije sinusový průběh. Kromě nosného signálu máme i modulační signál, kde „logická 1“ značí přítomnost nosného signálu a „logická 0“ naopak signalizuje, že zde nosný kmitočet není. Toto chování je zobrazeno na ilustračním průběhu z Matlabu, viz 3.1.

Je samozřejmě možné realizovat vícecestavovou modulaci, při které se řeší více úrovní amplitudy. Tato modulace byla řešena pomocí programu Matlab. Bylo samozřejmě nezbytné dodržet požadavky firmy Hameg. V bližší specifikaci je uvedeno, že hodnoty amplitudy se uvádí v rozmezí +1 až -1 (tedy například 1 znamená 100 % navolené amplitudy na generátoru). Tímto byl tedy vytvořen požadovaný signál, který se následně nechal generovat v nekonečné smyčce s libovolnou napěťovou úrovní od 5 mV_{PP} do 10 V_{PP} (V_{PP}



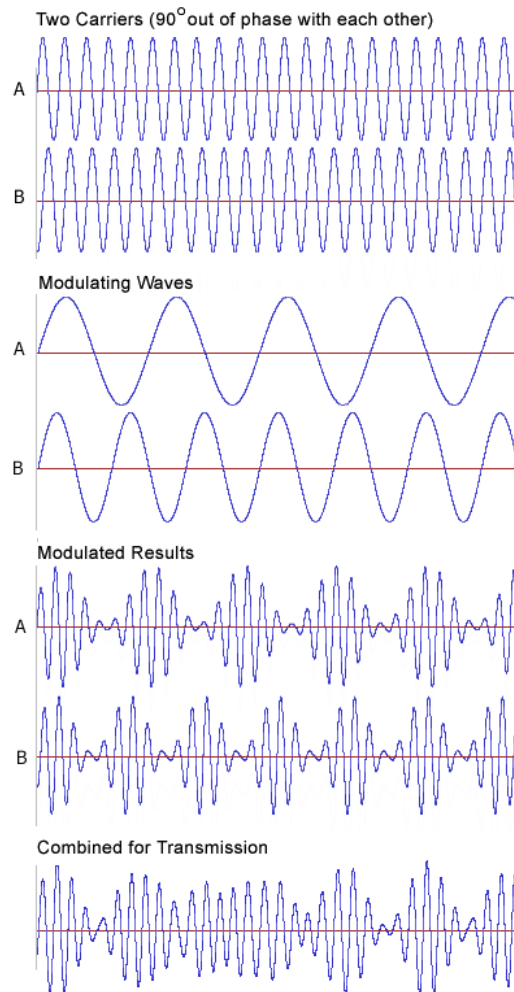
Obrázek 3.1: Ilustrace OOK modulace

je napětí od vrcholu kladné půl vlny až do vrcholu záporné půlvlny sinusového signálu).

3.3 QAM modulace

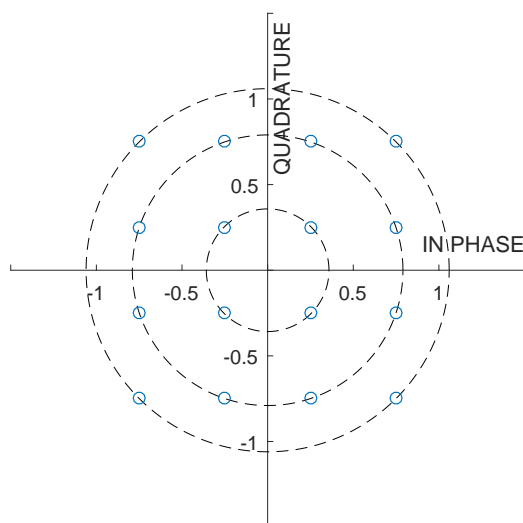
QAM modulace, jak je z názvu patrné, slučuje dvě modulace, konkrétněji pak amplitudovou a fázovou modulaci. Jak je patrné z obrázku 3.2, v QAM modulaci jsou v nosné složce dva fázově vůči sobě posunuté signály. Fázový posun mezi nimi je přesně 90° . Následně se tyto nosné signály modulují amplitudově pomocí modulačního signálu. Amplitudová modulace však sama o sobě nestačí a je nutné tyto signály spolu sloučit (sečíst). Tímto se vytváří finální QAM modulace.

ANALOG QAM



Obrázek 3.2: QAM modulace [12].

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) reprezentuje vícecestavovou modulaci, ve které se pomocí kombinace modulace amplitudy a fázového posunu dá přesně vyjádřit stav, který reprezentuje určitou pozici v konstelačním diagramu. V mnou zvoleném řešení bylo použito několik různých QAM modulací. Například byla experimentálně použita v rámci měření vysílače i QAM 16, tedy šestnácti stavová kvadraturní amplitudová modulace. Na základě pozdějších měření ale bylo zjištěno, že není vhodná pro navržený vysílač. Tato modulace přenáší v jednom symbolu 4 bity. Konstelační diagram takové funkce můžeme vidět na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Konstelační diagram v IQ rovině pro QAM 16.

Přenosová rychlost takové modulace je potom vyjádřena ze vztahu:

$$v_p = v_m \cdot n = 200000 \cdot 4 = 800000 = 800 \text{ kbps} \quad (3.1)$$

kde v_p je přenosová rychlost, v_m modulační (symbolová) rychlost a n počet bitů.

3.4 Elektrické parametry OLED panelu

U OLED panelu (byl použit model N6SB30 od firmy LG Chem.) bylo nejprve nutné zjistit z katalogového listu [10], jakou úroveň napětí a proudu potřebuje pro provoz v ideálních pracovních podmínkách.

Pro panel N6SB30:

| Elektrické parametry | Jednotka | Minimální | Typické | Maximální |
|----------------------|----------|-----------|---------|-----------|
| Dopředné napětí | V | 8,2 | 8,5 | 8,8 |
| Dopředný proud | mA | | 40 | |
| Spotřeba | W | 0,33 | 0,34 | 0,35 |

Tabulka 3.1: Elektrické parametry pro N6SB30.

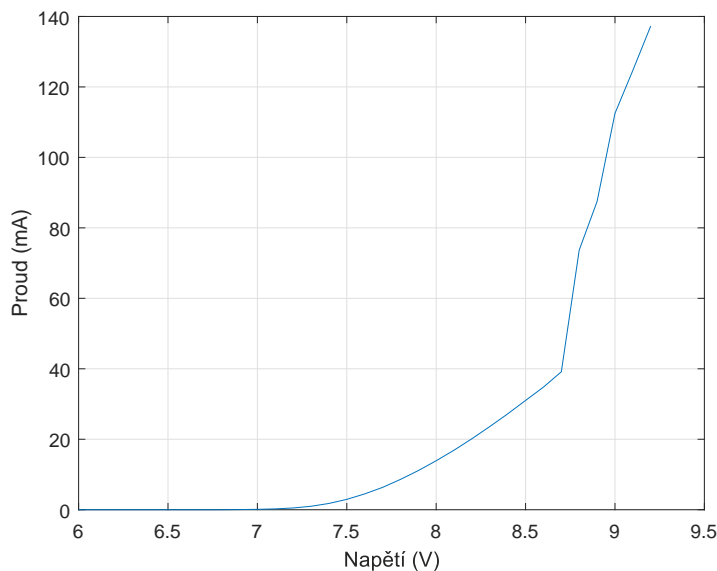
Dalším důležitým krokem bylo změření V/A charakteristiky panelu, viz obrázek 3.4, pro určení toho, kdy se panel pohybuje v lineární oblasti. U panelu byla stanovena lineární oblast v rozmezí 8–8,5 V.

Z těchto hodnot bylo možné spočítat dynamický odpor, tedy odpor, který má daný OLED v „otevřeném (svítícím) stavu“ pro malý střídavý proud. Ten se spočítá jako:

$$r_d = \frac{\Delta(U)}{\Delta(I)} \quad \text{kde} \quad \Delta(U) = 8,5 - 8 \text{ V} \quad \text{a} \quad \Delta(I) = 0,037 - 0,018 \quad (3.2)$$
$$r_{d(N6SB30)} = \frac{0,5}{0,019} = 26,32 \Omega$$

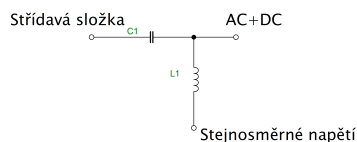
3.5 Parametry požadovaného výstupního signálu

V předcházejících kapitolách bylo zjištěno, jaké napětí a proud je nutné dodat OLED panelu pro pohyb v lineární oblasti V/A charakteristiky, viz obrázek 3.4.



Obrázek 3.4: Změřená voltampérová charakteristika N6SB30.

Byl stanoven proud o hodnotě 45 mA s tím, že potřebné napětí při tomto proudu je 8,5 V. Při použití proudového zdroje, který nedokázal dodat potřebnou úroveň napětí nebo nefungoval optimálně, byl použit výše zmíněný bias tee člen. Díky němu bylo možné nastavit stejnosměrný pracovní bod a pracovat tak v lineární části V/A charakteristiky.



Obrázek 3.5: Zjednodušené schéma Bias tee.

Na obrázku 3.5 je principiální schéma takového členu. Cívka slouží k tomu, aby nepronikla střídavá složka do zdroje napětí. Funkcí kondenzátoru je zabránit průniku stejnosměrného napětí směrem do proudového zdroje. Součástky se volí pro nejmenší kmitočet, který bude použit. Tento člen byl navržen několikrát pro několik různých frekvencí, ale nakonec nebylo nutné ho použít.

3.6 Náhradní model OLED panelu

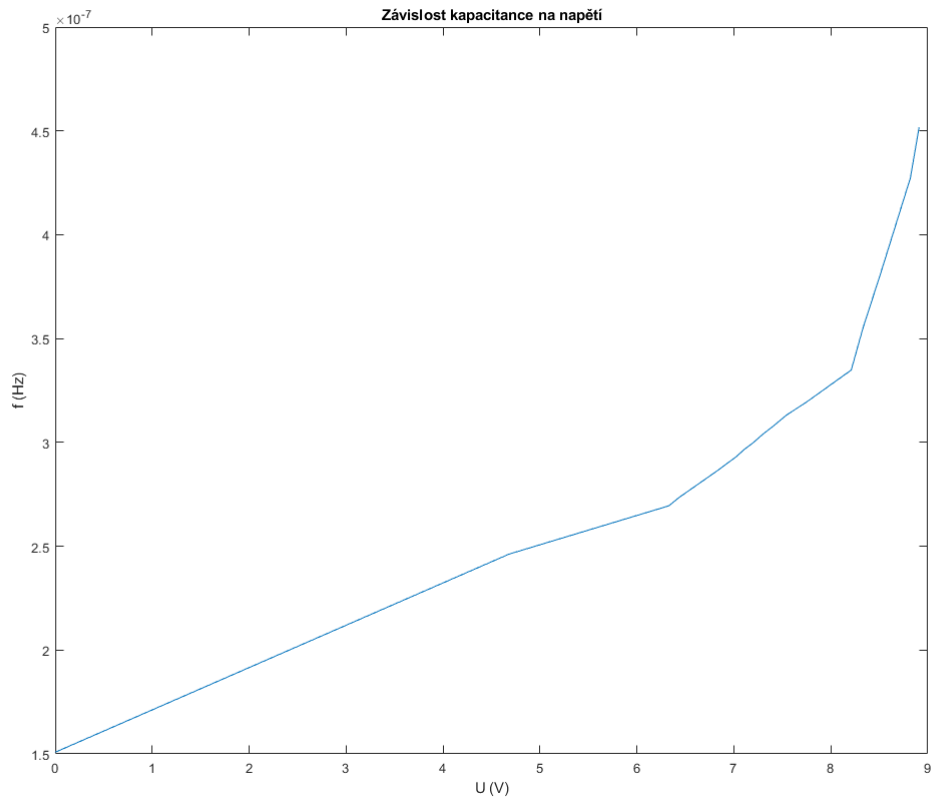
Při návrhu náhradního obvodu bylo nutné změřit a zjistit všechny důležité hodnoty daného OLED panelu. Bylo provedeno měření tzv. S parametru S_{11} , tedy parametru, který stanovuje vstupní koeficient odrazu při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží. Toto měření bylo provedeno vektorovým síťovým analyzátozem E5071C ENA od firmy Keysight Technologies.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

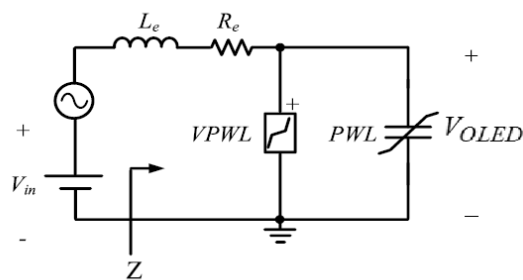
Z toho bylo zjištěno, jak se chová panel při určitých napájecích napětích a frekvencích. Díky změření těchto parametrů bylo možné vypočítat kapacitanci daného panelu a následně vykreslit její závislost na napájecím napětí panelu. Jak je patrné z grafu na obrázku 3.6, tak se skutečně kapacitance panelu mění a je tedy nutné toto zohlednit při návrhu modelu.

V rámci návrhu náhradního modelu OLED panelu bylo využito schématu navrženého v práci od Lin a kol., [13].

Součástky použité ve schématu 3.7 jsou: L_E je kapacita přívodních vodičů a R_e jejich odpor. VPWL je napěťově závislý rezistor. PWL je napěťově závislý kapacitor.



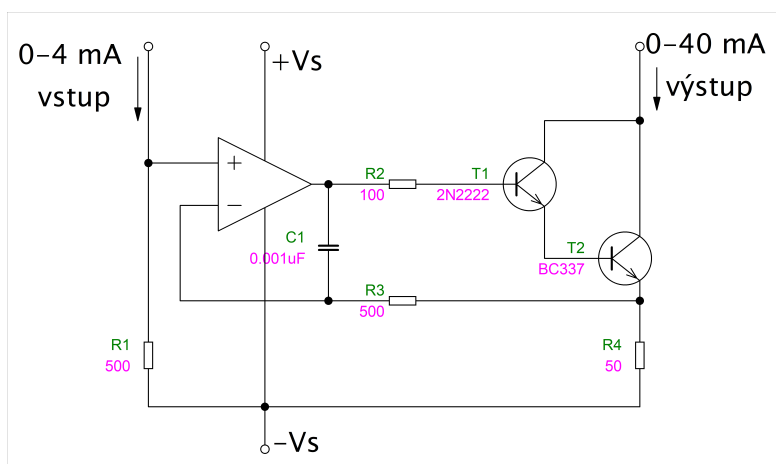
Obrázek 3.6: Závislost kapacity na napětí



Obrázek 3.7: Schéma náhradního modelu [13]

3.7 Zapojení 1

Toto zapojení vychází z ukázkového zapojení od firmy Texas Instruments [14].



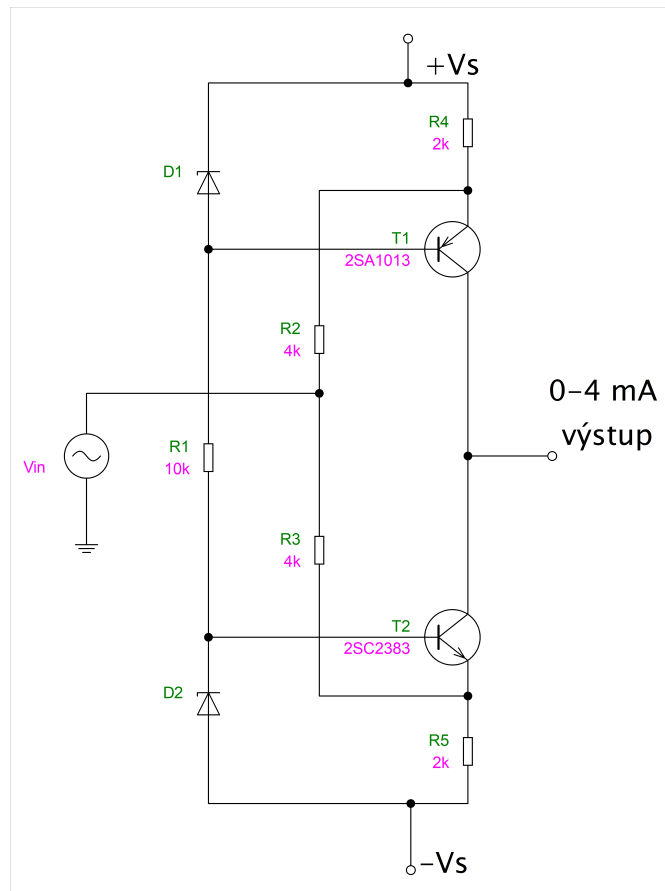
Obrázek 3.8: První použité schéma

V tomto schématu, viz obrázek 3.8, je patrné, že se jedná o zapojení v konfiguraci proudového zrcadla. Tento operační zesilovač má zápornou zpětnou vazbu s tranzistorem, která slouží ke zvýšení stability daného obvodu. Zároveň tato zpětná vazba, kvůli tomu, že stabilizuje výstup operačního zesilovače, zabrání tomu, aby zesiloval nad určitou mez. Zapojení dvou bipolárních NPN tranzistorů je v konfiguraci Darlingtonova zapojení. V Darlingtonově zapojení jsou kolektory obou tranzistorů propojené a přivedené na kladné napájecí napětí. Tohoto se využívá z důvodu eliminace Millerova efektu (Millerův efekt se týká parazitní kapacity tranzistoru). Zesílení Darlingtonova zapojení je součinem β obou tranzistorů (β je zesilovací činitel tranzistoru), což znamená, že je větší, než kdyby byl použit pouze jeden tranzistor. Tedy na vstupu do obvodu je možné mít pouze malý vstupní proud. V tomto případě bylo v rámci simulace počítáno s hodnotou vstupního proudu zhruba 4 mA. Výhodou tohoto zapojení je i velká šířka pásma podle vhodně zvoleného operačního zesilovače.

Na vstupu je nutné mít určitou hodnotu proudu, ale generátor signálu je v podstatě napěťový zdroj. Tedy bylo nutné získat požadovanou hodnotu proudu. Zde bylo možné využít několika možností. Teoreticky nejméně vhodné, ale zároveň nejrychlejší na vyzkoušení, bylo zapojit na vstup z generátoru rezistor s požadovanou hodnotou. Toto řešení vykazovalo dle očekávání velkou řadu negativních vlastností (vliv teploty, neefektivnost atd.), takže od něj bylo upuštěno.

Jako vhodnější se jevílo zapojení viz 3.9.

Jde o zapojení komplementárního zesilovače v zapojení se společnou bází. Vstupní signál je přiveden mezi 2 rezistory, které určují výslednou hodnotu výstupního proudu

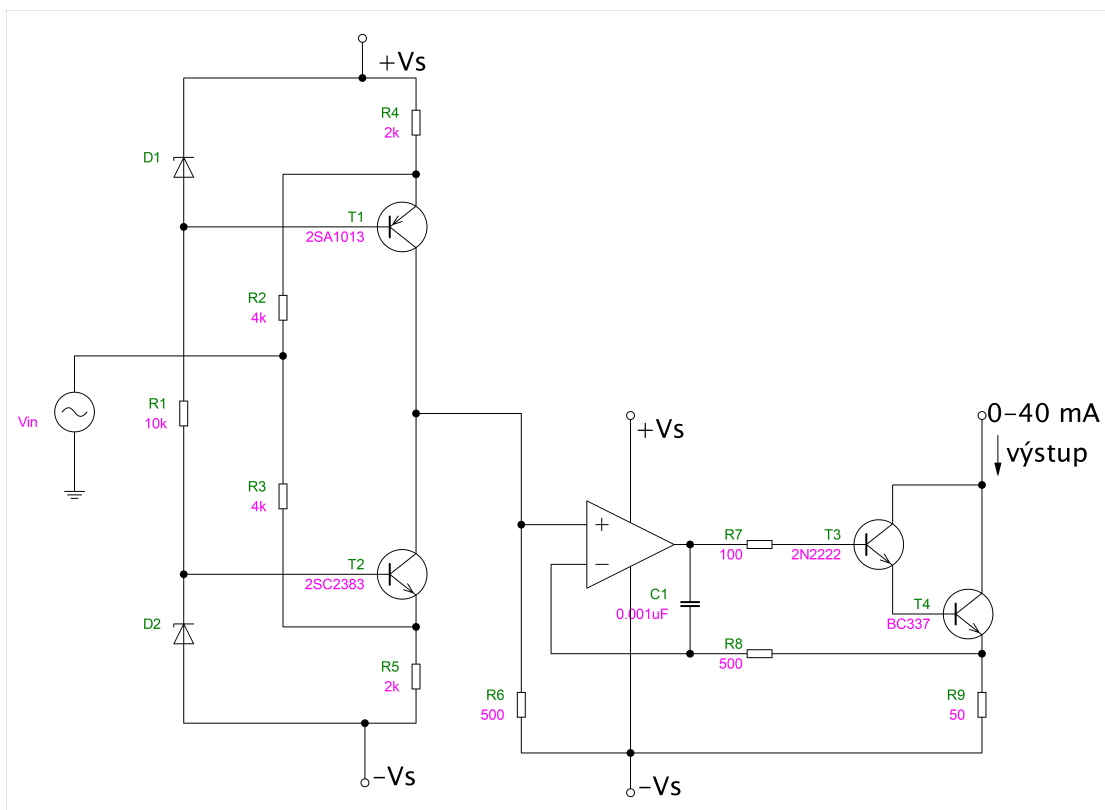


Obrázek 3.9: Komplementární zesilovač jako proudový zdroj

podle vztahu:

$$I_{OUT} = \frac{-V_{IN}}{\frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} \quad (3.3)$$

Kladná půlplna signálu otevírá NPN tranzistor a záporná PNP tranzistor. Zenerovy diody jsou použity z důvodu úbytku a stabilizace napětí. U tohoto zapojení je výhodné, že pokud vypneme vstupní generátor, tak je na výstupu hodnota blíží se 0. Respektive na výstupu z jednoho tranzistoru je -1 mA a na druhém tranzistoru $+1 \text{ mA}$, tedy se tyto proudy mezi sebou odečtou. Toto zapojení je vhodné i pro vyšší frekvence, i když to už závisí na použitých tranzistorech. Jednou z nevýhod je, že je nutné použít ideálně párované dvojice komplementárních tranzistorů. Tedy tranzistory, které mají velmi blízký (v ideálním případě stejný) zesilovací činitel β . Pokud by se tento činitel významně lišil, tak zde dojde k deformaci výstupního signálu a jednotlivé půlplny mohou mít rozdílné amplitudy.

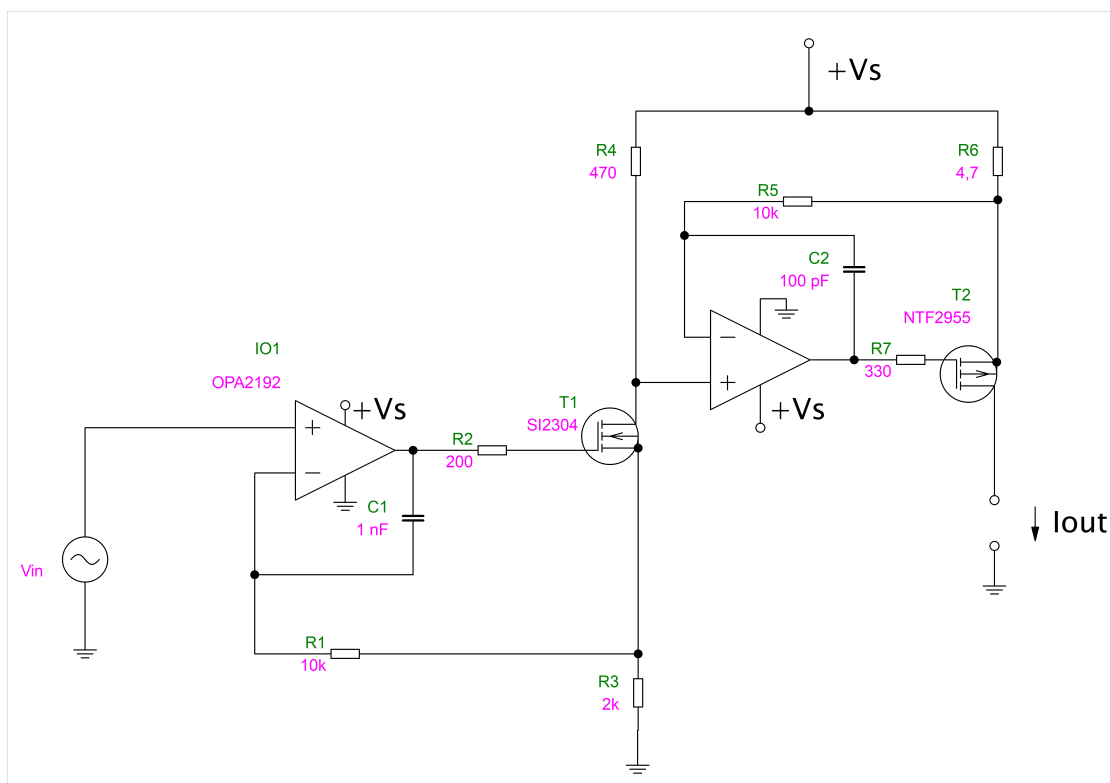


Obrázek 3.10: Celkové schéma 1. zapojení

Na obrázku 3.10 je celkové zapojení prvního navrženého proudového zdroje.

3.8 Zapojení 2

Toto zapojení opět vychází z ukázkového zapojení od firmy Texas Instruments, konkrétněji pak z dokumentu [15]. V zapojení bylo provedeno několik úprav, aby vyhovovalo požadavkům na výstupní signál. Tyto požadavky byly splněny změnou operačního zesilovače (popsáno v kapitole 4.2) výměnou kondenzátoru.



Obrázek 3.11: Celkové schéma 2. zapojení

V první části zapojení, viz obrázek 3.11, se nachází zapojení v konfiguraci „current sink“. V tomto zapojení se využívá toho, že kladné napětí otevře T_1 a napětí na rezistoru R_3 vzroste a tento pokles se přenesne na invertující vstup prvního OZ. Díky záporné zpětné vazbě OZ řídí proud přes R_3 a díky tomu je dosaženo toho, že na rezistoru R_3 je stejné napětí jako na vstupu do neinvertujícího vstupu. Tedy: $V_{IN} = V_{R3}$. Vstupní napětí je volitelné od 0 V do 2 V a tím se nám na výstupu nastaví napětí od 0 mA do 100 mA. Díky tomu, že bylo zvoleno nesymetrické napájení, kdy je na záporném napájecím pinu připojen nulový potenciál, je nutné použít na vstupu stejnosměrný offset.

Hodnota rezistoru R_3 je nastavená s ohledem na maximální vstupní signál a požadovaný maximální výstupní proud. Hodnota proudového zesílení druhé části je přibližně stonásobná za ideálních podmínek. Toto zesílení nastavuje poměr rezistorů R_4 a R_6 . Je žádoucí, aby byla co nejvíce splněna podmínka, že $I_{R3} \cong I_{R4}$.

$$R_3 = \frac{V_{IN}}{I_{R3}} = \frac{2}{1 \cdot 10^{-3}} = 2 \text{ k}\Omega \quad (3.4)$$

V druhé části bude nastaveno stejné napětí pro V_{R4} a V_{R6} . To je způsobeno tím, že R_6 je umístěn v invertující zpětné vazbě a OZ kvůli tomu nastaví tato napětí shodná. Napětí V_{R6} se mění v závislosti na tom, jaký proud do zátěže protéká. Hodnota rezistoru R_4 se nastaví v závislosti na tom, jaké je napájecí napětí a jaká úroveň napětí je požadována na výstupu. Pro počáteční pokusy (s jiným typem OZ, než je použit ve finálním schématu) bylo zvoleno 0,470 V. Tím bylo zajištěno, že výstup může jít až do 4,5 V.

$$R_4 = \frac{V_{R6}}{I_{R4}} = \frac{0,470}{1 \cdot 10^{-3}} = 470 \text{ }\Omega \quad (3.5)$$

Podobně jako v první části i zde $I_{R6} \cong I_{OUT}$. Hodnota rezistoru R_6 se stanoví podle maximálního výstupního proudu a uvažovaného napětí V_{R6} .

$$R_6 = \frac{V_{R6}}{I_{OUT}} = \frac{0,470}{1 \cdot 100^{-3}} = 470 \text{ }\Omega \quad (3.6)$$

Zbylé rezistory R_1 a R_2 v první části a rezistory R_5 a R_7 v druhé části slouží jako kompenzační rezistory, které pomáhají izolovat OZ od kapacitní zátěže na gate MOSFET tranzistoru. Kondenzátory C_1 a C_2 pomáhají se zpětnou vazbou pro vysoké frekvence, kdy kvůli kondenzátorům ve zpětné vazbě dojde k přímému připojení zpětné vazby z výstupu na invertující vstup OZ a odstranění zisku MOSFET a dojde tím k nahrazení stejnosměrné zpětné vazby.

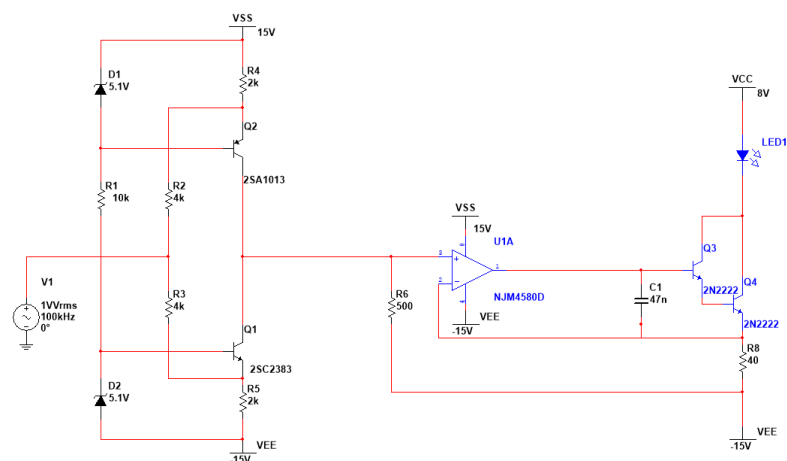
Kapitola 4

Simulace

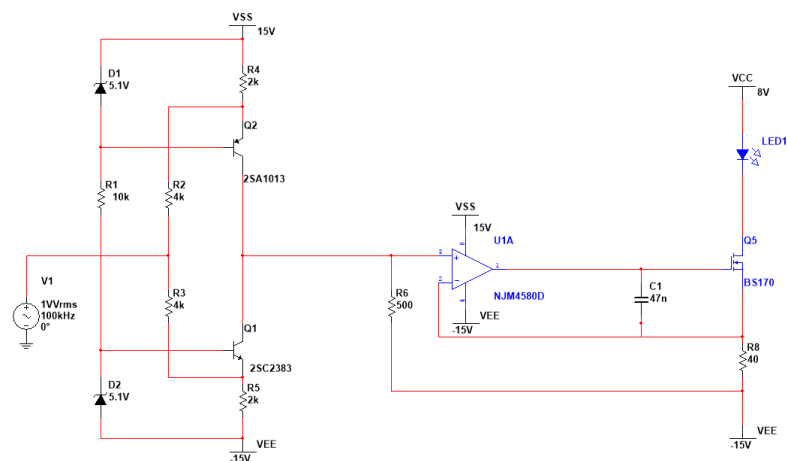
4.1 Zapojení 1

Celkové schéma použité v rámci simulace je představeno na obrázku 4.1. V první fázi bylo použito zapojení s dvojicí bipolárních tranzistorů v Darlingtonově konfiguraci. V další fázi došlo ke změně a bylo simulováno i zapojení s unipolárním tranzistorem typu MOSFET s N kanálem viz 4.2. Simulace byla realizovaná v programu Multisim ([16]). Simulace, která je zde popsána a změřena, se týká prvního prototypového návrhu, ale neobsahuje finální použitý OZ. Bohužel při realizaci a měření prvního prototypu bylo zjištěno několik negativních vlastností, které se v rámci simulace neprojeví, a OZ byl nahrazen za OPA2192 a OPA197. Tyto OZ už nebyly ověřovány v rámci simulace proto, že zapojení jako takové mělo podle prvotní simulace principiálně fungovat a tyto OZ byly v podstatě už jen vylepšením návrhu původního. Bližší informace jsou pak v kapitole 5.

Simulace je rozdělena do několika dílčích kroků, které jsou z hlediska práce důležité.



Obrázek 4.1: Celkové schéma proudového zdroje s Darlingtonovým zapojením



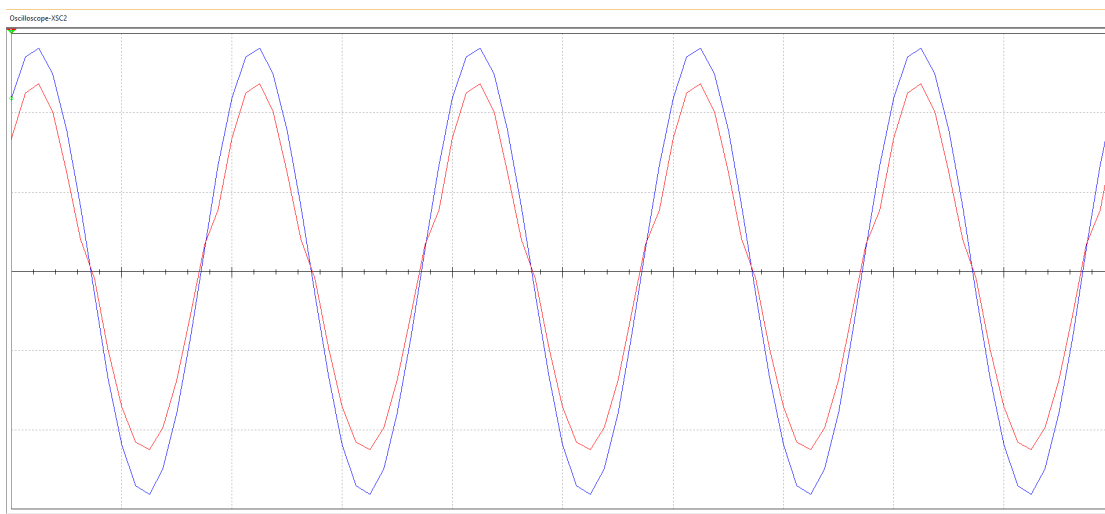
Obrázek 4.2: Celkové schéma proudového zdroje s unipolárním MOSFET tranzistorem

4.1.1 První stupeň

Nejprve bylo nutné ověřit funkčnost prvního bloku (komplementárního zesilovače). Ta byla ověřena pomocí srovnání vstupního a výstupního signálu na osciloskopu, viz obrázek 4.3. Tím bylo zjištěno, k jak velké deformaci signálu dochází (deformací signálu je myšlen především fázový posun, případně další negativní jevy jako například dosažení saturace u OZ nebo různé ořezy a zkreslení) a jestli je toto zapojení použitelné. Následně pak bylo nutné vyzkoušet, jestli navržené zapojení plní požadavky na výstupní proud. Toto bylo realizované pomocí virtuální zátěže, konkrétně pak zapojením rezistoru, který simuloval hodnotu dynamického odporu OLED panelu. Požadavky byly v rámci testu splněny a

na výstupu byla změřena hodnota proudu, která zhruba odpovídá tomu očekávanému, tedy 4 mA. Poté byla v simulaci použita LED dioda, která byla upravena podle hodnot náhradního modelu, aby simulovala chování OLED panelu.

V rámci simulace byl přiveden vstupní sinusový signál o amplitudě 4 V na vstup do komplementárního zesilovače. Jak je zřejmé z průběhu 4.3, je patrné určité zkreslení. Toto je velmi pravděpodobně způsobené tím, že se program snaží simulovat rozdílné β jednotlivých tranzistorů a kvůli tomu dojde ke zkreslení horní poloviny sinusového signálu.

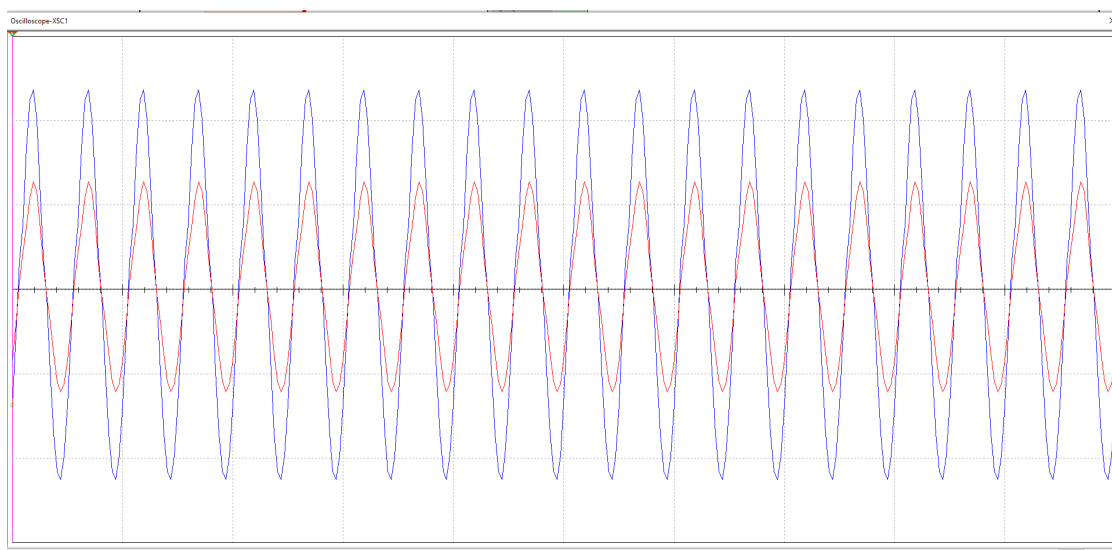


Obrázek 4.3: Průběh z komplementárního zesilovače (modrý je vstup s rozlišením 2 V na dílek, červený je výstup s rozlišením 200 mV na dílek)

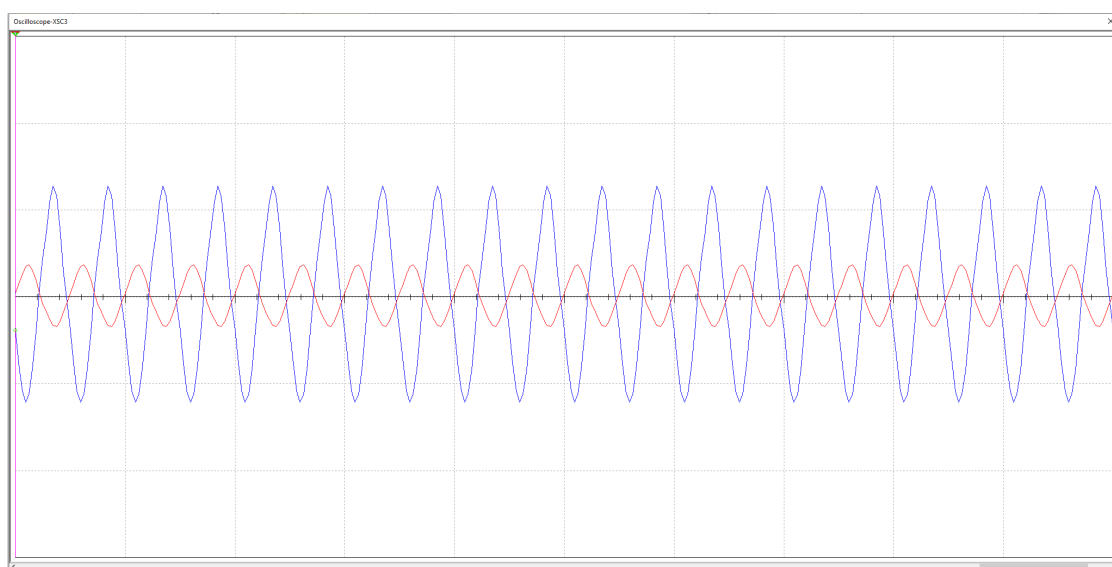
4.1.2 Druhý stupeň

V druhé části simulace byl přiveden signál z výstupu prvního stupně do operačního zesilovače. Následně bylo změřeno, jestli dojde k deformaci signálu v rámci samotného OZ (viz 4.4). Došlo ke snížení velikosti výstupní amplitudy na poloviční hodnotu oproti vstupu, což je v pořádku, protože na výstupu je v rámci práce důležitý proud. Sinusový signál není deformovaný. Na obrázku 4.5 je porovnání vstupního signálu do MOSFET tranzistoru a na výstupu z něj. Jak je z průběhu zřejmé, dojde k tomu, že signál na výstupu tranzistoru je invertovaný, což vůbec nevádí. Je zde patrné, že na výstupu z tranzistoru dojde ke zmenšení amplitudy, ale požadovaný proud do zátěže protéká, konkrétně je to 35 mA. Tedy i tato část simulace splnila počáteční požadavky a bylo možné přistoupit k fyzické realizaci. Bylo nutné také ověřit, jestli se v případě, že na vstupu z generá-

toru nebude žádný signál, tranzistor tzv. zavře a přestane jím protékat proud potřebný k rozsvícení LED. Tento požadavek byl v rámci simulace také splněn.



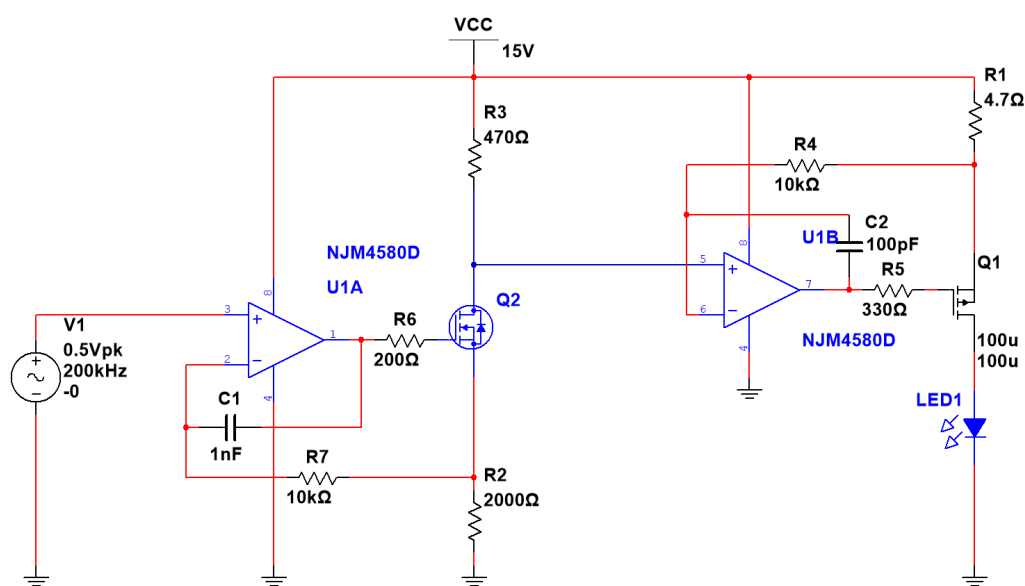
Obrázek 4.4: Průběh na vstupu do OZ a na výstupu do tranzistoru (modrý je vstup s rozlišením 200 mV na dílek, červený je výstup s rozlišením 500 mV na dílek)



Obrázek 4.5: Průběh na vstupu do unipolárního tranzistoru a výstupu do zátěže (modrý je vstup s rozlišením 500 mV na dílek, červený je výstup s rozlišením 50 mV na dílek)

4.2 Zapojení 2

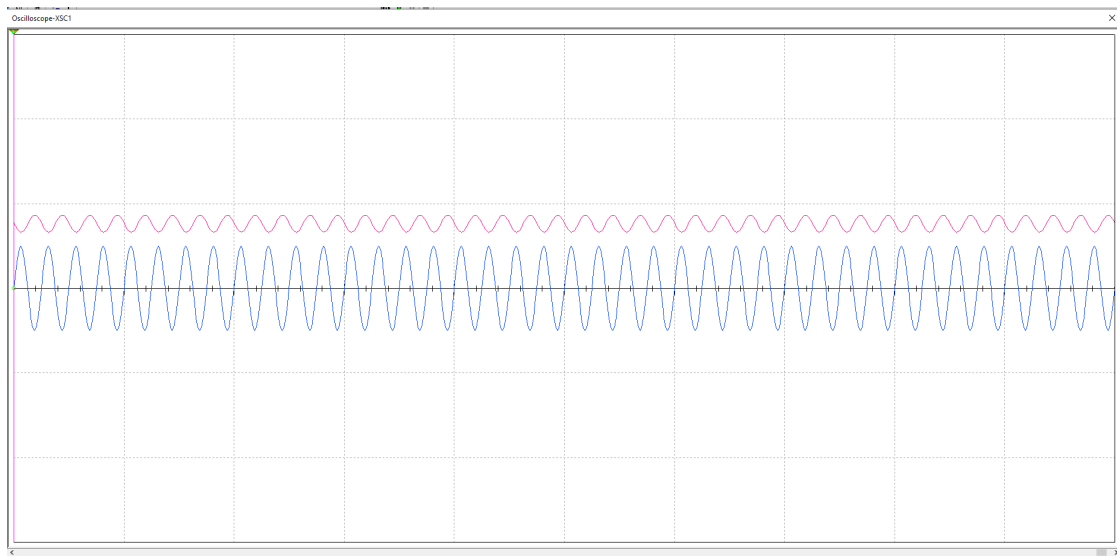
Celkové schéma použité v rámci simulace je možné vidět na obrázku 4.6. Simulace, která je zde popsána a změřena, se týká návrhu v rámci simulace, kdy nebyl k dispozici model použitého OZ, ale byl použit takový, který má podobné hodnoty. Při reálném měření byly použity OPA2320, OPA197 a do finálního návrhu použit OPA21292. Tyto OZ nebyly ověřovány v rámci simulace proto, že s v principu horším OZ zapojení fungovalo korektně. Bližší informace k tomuto zapojení jsou v kapitole 5.



Obrázek 4.6: Celkové schéma druhého zapojení

4.2.1 První stupeň

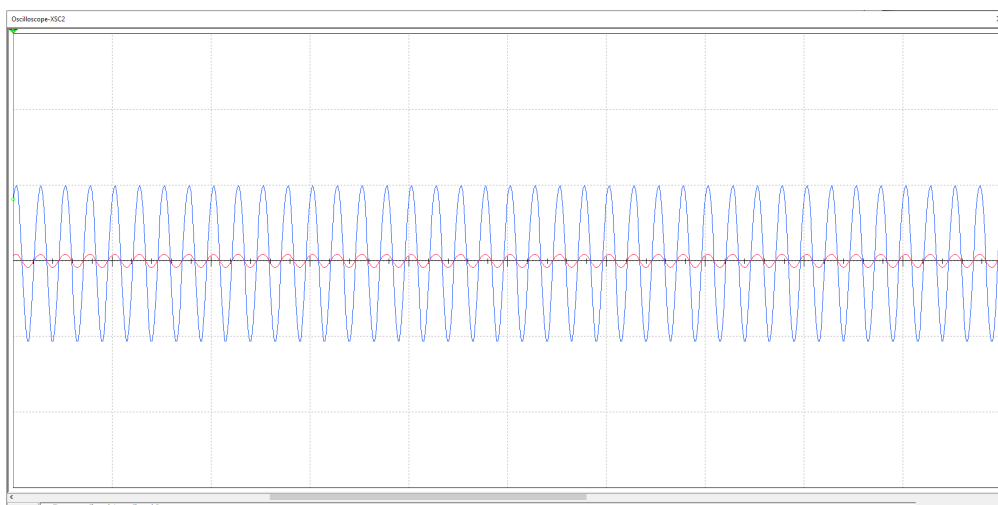
Nejprve bylo i v tomto případě nutné ověřit funkčnost prvního bloku. Ta byla ověřena analogicky jako u prvního zapojení. V zapojení byl v rámci simulace použit sinusový signál o amplitudě 1 V. Tato hodnota byla zvolena proto, že finální proud pro tuto úroveň je zhruba 50 mA. Na obrázku 4.7 je porovnání vstupního sinusového signálu s výstupním signálem za prvním tranzistorem. Je zde patrný posun o stejnosměrnou složku, ale to je způsobeno konstrukcí a není to závadou. Zároveň také první stupeň obrací fázi. Na první pohled zde nedochází k deformaci signálu a toto zapojení se tak dá považovat za funkční.



Obrázek 4.7: Průběh prvního stupně (modrý je vstup s rozlišením 1 V na dílek, červený je výstup s rozlišením 1 V na dílek)

4.2.2 Druhý stupeň

Na průběhu 4.8 je zobrazený vstupní signál do druhého stupně (druhého OZ) a signál na výstupu z druhého stupně (na zátěži). Pro větší názornost byla na osciloskopu použita střídavá vazba. Průběh má opět menší amplitudu, ale proud dodávaný do zátěže je dle očekávání. Je vidět, že došlo jen k nepatrnému fázovému posunu, a tedy i tento stupeň je použitelný.



Obrázek 4.8: Průběh druhého stupně (modrý je vstup s rozlišením 200 mV na dílek, červený je výstup s rozlišením 10 mV na dílek)

Kapitola 5

Návrh desek plošných spojů a jejich oživení

Desky plošných spojů byly vyhotoveny ve více návrzích. První (prototypová) verze byla určena hlavně ke zjištění a odladění případných nedostatků reálného zapojení.

5.1 Návrh a realizace DPS pro první zapojení

Výběru finálních součástek samozřejmě předcházelo měření na předchozích prototypových verzích. Konkrétně bylo zapojení realizováno na nepájivém poli, univerzální desce plošných spojů a následně pak na „finální“ DPS. Bohužel na této desce byla návrhová chyba v druhé části zapojení (OZ), což vedlo ke zpoždění při práci. Tuto chybu bylo problematické odhalit, protože při měření napětí na několika místech desky hodnoty napětí odpovídaly simulaci a nic nenapovídalo tomu, že byla v rámci návrhu vytvořena kritická chyba a omylem došlo k odstranění záporného napájení OZ a jeho zpětnovazebního tranzistoru. Toto byl jeden z kritických problémů, ale i při jeho odstranění v rámci nouzové opravy pomocí drátové propojky to k plné funkčnosti nevedlo a hodnoty na výstupu neodpovídaly simulaci ani výpočtu. Následně byly navrženy dvě nové desky, kde měl být problém v zapojení záporného napětí vyřešen a také zdokonaleny některé aspekty, které byly na prototypové desce nedostatečné (měřicí body a přípojky osciloskopu).

Výchozím bodem při realizaci byly součástky, které byly předem ověřeny v rámci simulace. Simulátor ovšem ne zcela odpovídal realitě a bylo proto nutné postupně vyzkoušet součástek více.

Jako první pár tranzistorů do komplementárního zesilovače byly použity PNP 2N3906 [17] a NPN 2N3904 [18], které frekvenčně vyhovují požadavkům. Reálně fungovala tato

dvojice tranzistorů špatně, docházelo k velkému zkreslení signálu jednotlivých půlvln. Měřením bylo zjištěno, že β tranzistorů se liší i o více než 120 (měřeno více kusů od každého typu). Došlo tedy k zakoupení z výroby párované komplementární dvojice tranzistorů PNP 2SA1013 [19] a NPN 2SC2383 [20]. U nich se β lišila o 15, což je vynikající hodnota, a na průběhu z osciloskopu se to projevilo výrazně. Tím byl zvolený potřebný pár tranzistorů pro komplementární zesilovač.

Následně bylo nutné vybrat vhodný operační zesilovač. Při prvním výběru z důvodu rychlého osazení došlo k výběru v první řadě podle požadavků na OZ, ale také na základě dostupnosti u dodavatele. Jediný zesilovač, který vyhovoval parametrickým požadavkům a zároveň byl skladem ve chvíli osazování desky, byl operační zesilovač NJM4580 [21]. Tento OZ se při měření ukázal jako špatně zvolený. Nedokázal při nulovém vstupním signálu dosáhnout nulového výstupního signálu a vždy byla na výstupu taková úroveň, která vedla k otevření tranzistoru (v prvních prototypoch bylo použito Darlingtonovo zapojení dvou bipolárních tranzistorů 2N2222 [22]). Bylo nutné nalézt vhodný rail-to-rail operační zesilovač (což znamená, že OZ je schopný pracovat se stejným rozsahem napětí jako je vstupní napětí, tedy že se dokáže přiblížit mj. i nule). Volba padla na OPA2192 [23], který je rail-to-rail jak na vstupu, tak i na výstupu. Frekvenčním rozsahem je také vhodný. Stačil by samozřejmě OZ, který má v pouzdře jen jeden zesilovač, ale nebyl by kompatibilní s první prototypovou deskou (proto byl mimo jiné zvolen tento) a nebylo by možné ho rychle vyměnit za původní NJM4580. Jako OZ s jedním zesilovačem v pouzdře byl zvolen OPA197 [24], který má jiné rozložení pinů. Proto jsou ve finálním návrhu dvě desky plošných spojů, aby došlo k porovnání těchto dvou OZ.

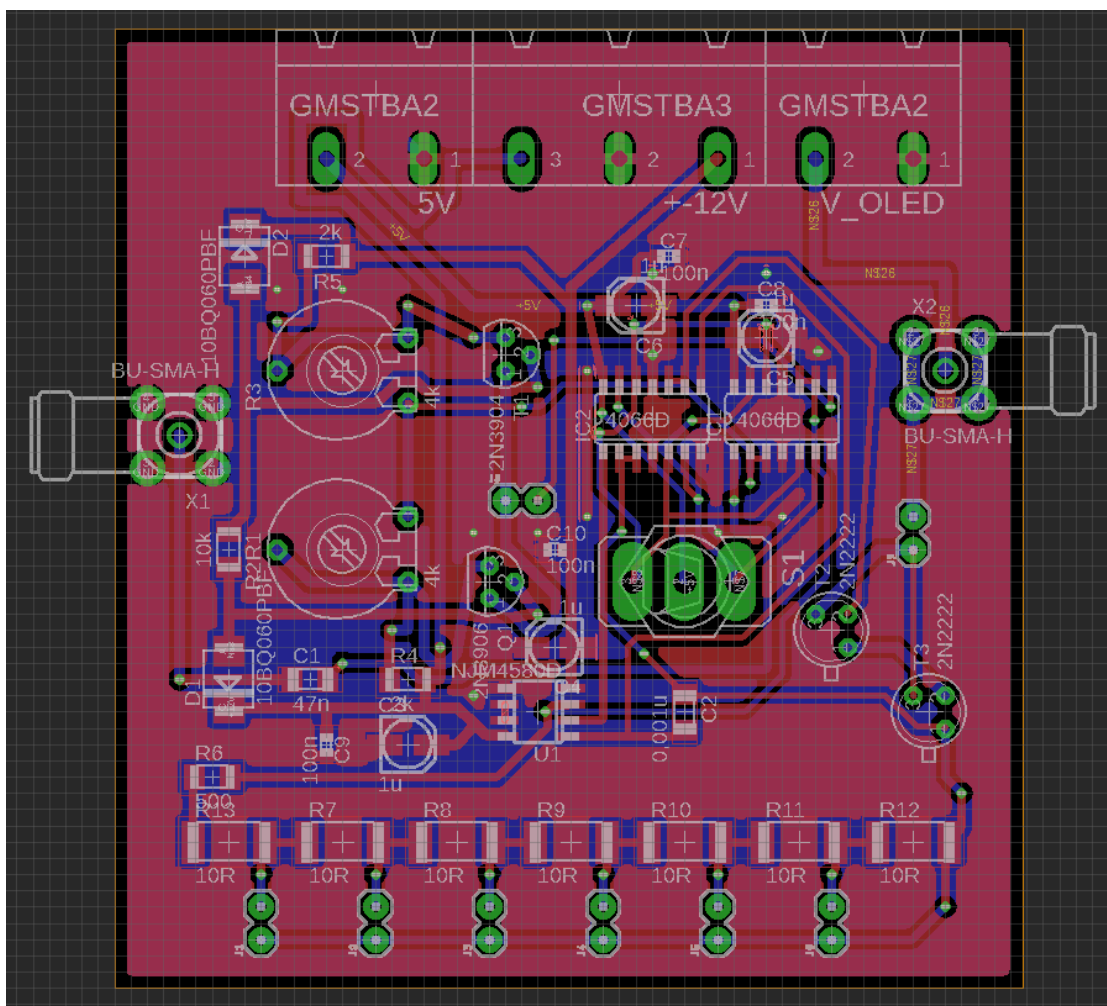
Poslední kritická součástka byl tranzistor ve zpětné vazbě OZ. Nejprve byl zvolen výše zmíněný tranzistor 2N2222 v Darlingtonově zapojení. Později byl vyměněn za unipolární tranzistor BS170 [25] z důvodu možnosti teoretického zlepšení.

Desky byly navrhovány v programu Eagle [26]. Při návrhu byla použita dvouvrstvá DPS (deska plošných spojů) s prokovenými otvory.

Na desce oproti schématu 4.2 je místo odporu R_8 použito několik rezistorů, kde se výsledná velikost odporu volí pomocí jumperu (zkratovací propojky). Trimr není použit vůbec, a to z důvodu nízké výkonové zatížitelnosti.

5.1.1 Prototypová deska

U prototypové desky je oproti schématu 4.2 použito dvou integrovaných obvodů 4066 [27]. Ty byly do návrhu přidány k vyřešení problému s tím, že NJM4580 nedodal na výstup nulový signál. IO 4066 je v podstatě pouhý elektronický přepínač, který měl za cíl vyřešit přepnutí ve chvíli, kdy dojde k vypnutí zdroje. Díky vysokému vnitřnímu odporu to nebylo vhodné řešení. Proto proběhla modifikace prototypové desky za chodu, a IO byly odpájeny a nahrazeny drátovými propojkami.



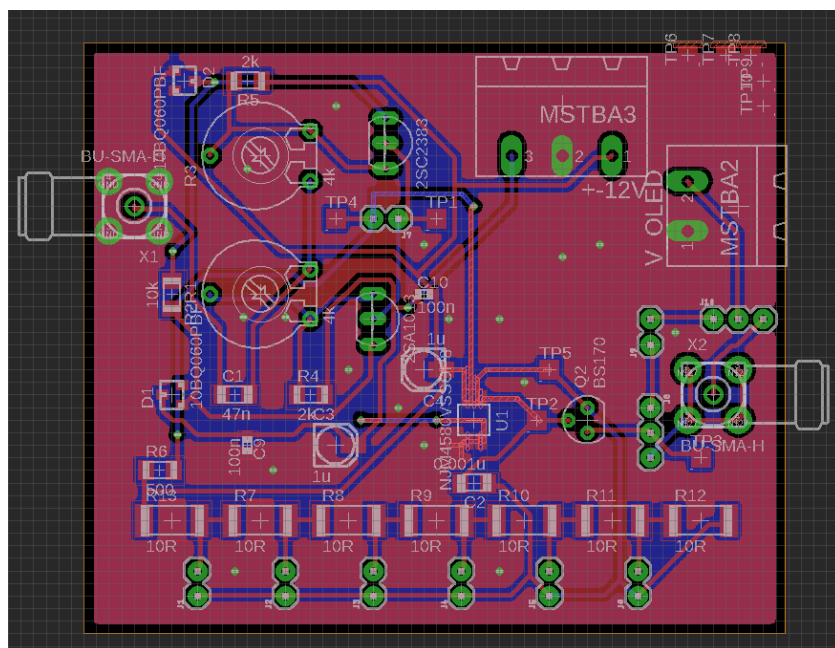
Obrázek 5.1: Prototypová DPS

5.1.2 Deska pro OPA2192 a OPA197

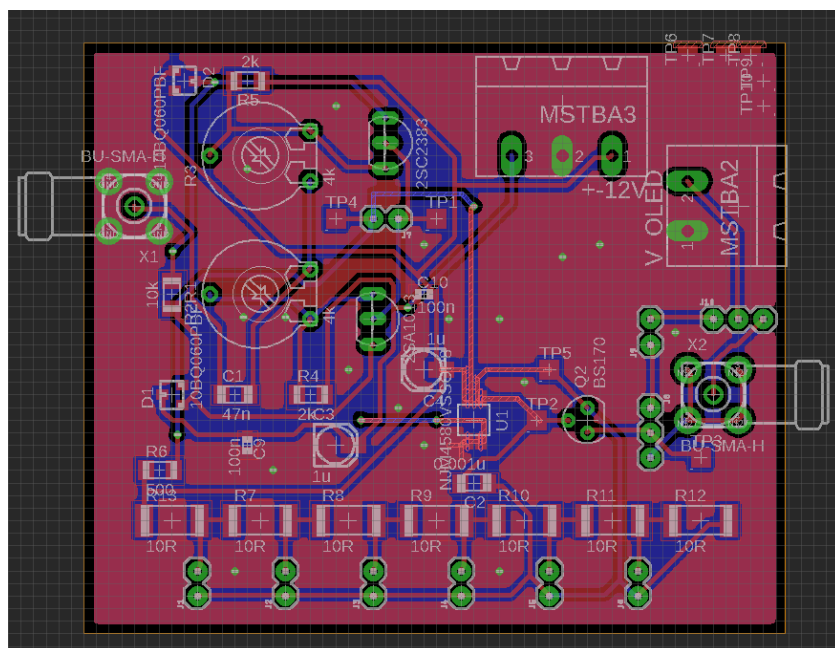
U těchto dvou desek už byly zvaženy a opraveny nedostatky, které měl první návrh. Hlavní opravou bylo odstranění závady na záporném napájení OZ a zpětnovazebního tranzistoru. Při měření na prototypové desce byl také problém s tím, že v případě potřeby připojit do zátěže něco bez SMA konektoru to bylo možné udělat pouze velice improvizovaně a navíc s rizikem poškození SMA konektoru. Například rezistor, který simuloval ohmickou zátěž panelu, byl připojen jen tzv. na kontakt a tedy měření nebylo ideální.

Z toho důvodu jsou zde nově jumpery (zkratovací propojky) ve výstupní části, které umožní přepnout výstup buď na SMA konektor nebo na připojení pomocí pinů. Další z částí, které prošly drobným vylepšením, byly měřicí body pro osciloskop nebo obecně jakékoliv měřicí sondy. Ty byly realizovány jako měděné plošky a u okraje desky pak i jako větší plocha, která slouží pro připojení zemnicího vodiče, například sondy osciloskopu.

Při oživení s rezistorem vše fungovalo korektně, ale při měření s OLED panelem obě zapojení přestala fungovat (na výstupu nebyla měřitelná úroveň signálu a docházelo k velkému zkreslení i na prvním stupni). Při měření jednotlivých bodů na desce nikde nebyla nalezena závada a všechno se jevílo korektně, nicméně panel stále nefungoval. S rezistorem přitom vše opakovaně fungovalo korektně. Z časových důvodů bylo rozhodnuto, že dosavadní postup na těchto dvou deskách bude pozastaven a bude použito jiné zapojení. Obě původní desky jsou ale stále k dispozici a probíhá analýza zapojení tak, aby byl odhalen problém a desky mohly být zprovozněny. Po odstranění problému by tedy měly být s panelem funkční.



Obrázek 5.2: DPS pro OPA2192



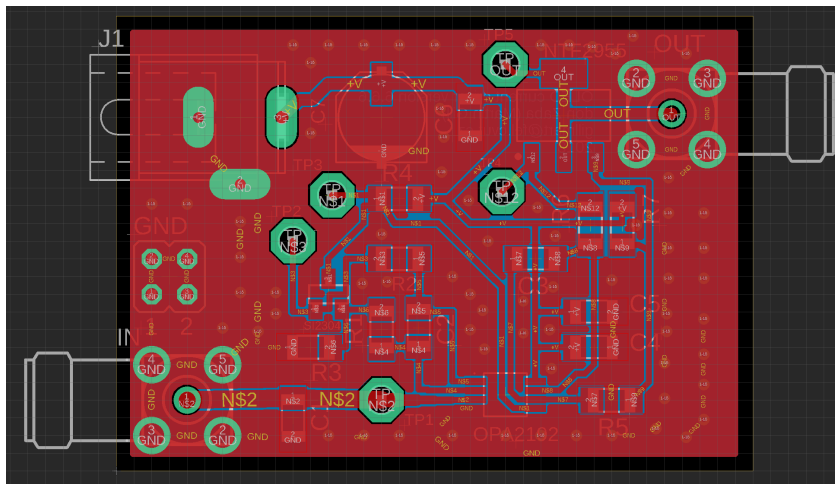
Obrázek 5.3: DPS pro OPA197

5.2 Návrh a realizace DPS pro druhé zapojení

Stejně jako u předchozího zapojení i zde probíhalo postupné ladění. Zapojení se realizovalo na univerzální plošný spoj a bylo tak možné v rychlosti měnit případně nevhodně zvolené součástky. Jako první operační zesilovač byl zvolen OPA2320 (kvůli doporučení k zapojení od Texas Instruments). Tento operační zesilovač je nesymetricky napájený a je napájený maximálně 5 V. To znamená, že na výstupu není možné se dostat přes toto napájecí napětí. Teoreticky se to nejevilo jako příliš velký problém, protože je možné na výstupu přidat bias tee a posunout se tak o stejnosměrnou složku do lineární oblasti panelu. Prakticky však toto řešení nebylo optimální. Na výstupu byl výstupní signál velmi malý (jednotky až desítky mV), zkreslení signálu bylo velké a překvapivě velký byl i šum. Proto bylo rozhodnuto použít OPA2192.

Při výměně za OPA2192 se bohužel objevil nový problém. Při napájení zesilovače 15 V už se panel při přivedení sinusového signálu rozsvítil díky tomu, že do něj zesilovač dodával stejnosměrnou složku, avšak sinusový signál na něm nebyl měřitelný. OLED panel byl odpojen a byl připojen rezistor o hodnotě 47 Ω , který představoval lineární zátěž. S tímto rezistorem se zapojení chovalo velmi dobře. Výstupní signál odpovídal předpokladům a požadavkům z návrhu. Jakmile došlo k připojení OLED panelu, tak se opakoval problém s tím, že na výstupu nebyl měřitelný sinusový signál. Po kontrole výpočtu a všech hodnot součástek proběhlo mnoho měření na většině míst zapojení. První stupeň zapojení fungoval korektně, ovšem druhý stupeň nefungoval prakticky vůbec. Na pinu „source“ druhého tranzistoru nebyl přítomný sinusový signál. Protože toto je problém, druhý stupeň byl detailně prozkoumán. Postupným měřením bylo zjištěno, že závada je na zpětnovazebním kondenzátoru C_2 , který měl hodnotu 2,2 nF. Tato hodnota byla příliš velká a když došlo ke snížení na hodnotu 100 pF, tak proudový zdroj začal korektně fungovat i s OLED panelem.

Proto bylo přistoupeno k návrhu finální desky, u které došlo k další optimalizaci oproti zapojení 1. Nově jsou na ní místo měřících plošek umístěna očka, ke kterým lze připojit háček sondy osciloskopu, aniž by během měření sonda upadla. Napájecí konektor byl zvolen ještě menší, aby došlo k celkové miniaturizaci desky.



Obrázek 5.4: DPS pro druhé zapojení

Kapitola 6

Měření

Nyní bylo potřeba zjistit, jestli navržená zapojení (která v simulaci fungovala) budou fungovat i ve skutečnosti. Bylo nutné stanovit si určité verifikační testy a postupy. Měřicí stanoviště, které bylo použito, bylo sestavené podle schématu 2.7. Měření probíhalo za denního světla v normálně osvětlené místnosti bez jakéhokoliv zatemnění nebo snahy potlačit okolní světlo. Ze zadání práce byly dané 2 charakteristiky, které bylo nutné změřit, konkrétně pak:

- frekvenční charakteristiky,
- komprese zisku.

Ovšem toto by nestačilo pro kvalitní zhodnocení navrženého proudového zdroje, respektive vysílače. Proto bylo změřeno ještě několik dalších klíčových parametrů:

- BER (daný taktéž už v zadání práce) (z originálu „Bit Error Rate“ česky pak „bitová chybovost“) v závislosti na použité modulaci a přenosové rychlosti,
- EVM (z originálu Error Vector Magnitude česky pak „amplituda chybového vektoru“) v závislosti na použité modulaci a přenosové rychlosti,
- MER (z originálu „Modulation Error Ratio“ česky pak „chyba modulovaného signálu“) v závislosti na použité modulaci a přenosové rychlosti.

Měření byla realizovaná tak, že se požadovaná modulace s dalšími parametry (jako například symbolová rychlost a nosná frekvence) nastavila na generátoru signálu a stejně tak se musel nastavit i spektrální analyzátor. Do něj byl přiveden signál z optického detektoru.

6.1 BER

BER se dnes používá jako klíčový parametr pro hodnocení přenosu. Využívá se zde toho, že známe přesně vyslanou posloupnost dat v signálu a tedy víme, jak by měl signál vypadat po příjmu. Spektrální analyzátor tuto známou posloupnost porovnává s tím, co skutečně obdržel za přijatý signál. Samozřejmě platí, že čím nižší hodnota BER je, tím je kvalitnější přenos.

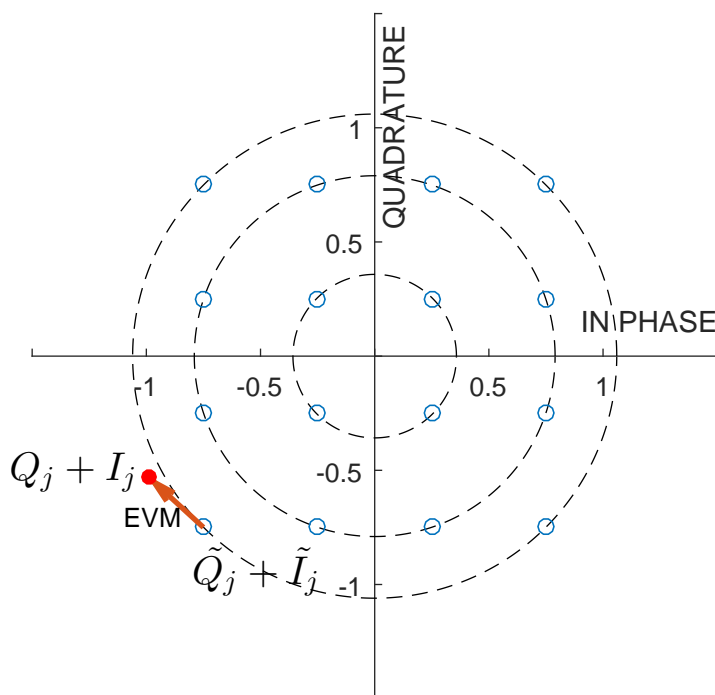
6.2 EVM

EVM se používá jako další klíčový parametr pro hodnocení kvality přenosu. Opět zde platí ten samý princip, že detektor je nastavený na příjem konkrétního formátu dat. Je nutné znát typ modulace a ideálně i vysílaný řetězec. V rámci této diplomové práce byla využívána posloupnost PRBS 9. Jedná se o pseudonáhodnou posloupnost binárních dat. Díky těmto znalostem dokáže spektrální analyzátor určit, kde měl bod z konstelačního diagramu původně být a kde se ve skutečnosti nachází. Toto se stane díky zkreslení, které může být fázové nebo amplitudové. Tedy změřený bod je o trochu posunut vůči referenčnímu bodu, viz 6.1.

EVM se dá vyjádřit jako RMS, pak se jedná o efektivní hodnotu, nebo jako špičková hodnota (PEAK), což je nejvyšší hodnota EVM ze všech přenesených symbolů. EVM se uvažuje v procentech.

$$EVM_{RMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]}}{|v_{max}|} \quad (\%) \quad [28] \quad (6.1)$$

Vysvětlení jednotlivých proměnných je v kapitole 6.3.



Obrázek 6.1: Ilustrace chyby EVM.

6.3 MER

MER bylo zvoleno jako třetí parametr pro hodnocení kvality přenosového kanálu. Zde dochází k měření odstupu signálu od šumu pro digitálně modulovaný signál. Šum je rušení vyskytující se při přenosu a je způsoben vnějšími vlivy, které nelze efektivně potlačovat, ale ani ovlivňovat. Je tedy nutné mít odstup signál/šum co největší, aby se co nejvíce potlačilo zkreslení a další nepřesnosti při demodulaci takovým způsobem ovlivněného signálu.

$$MER = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \cdot (\tilde{I}_j^2 + \tilde{Q}_j^2)}{\sum_{i=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]} \right) \quad (\text{dB}) \quad [28] \quad (6.2)$$

Vysvětlení použitých symbolů v MER a EVM Kde:

- \tilde{I}_j je referenční I pozice j-tého symbolu,
- \tilde{Q}_j je referenční Q pozice j-tého symbolu,
- I_j je I pozice změřeného j-tého symbolu,
- Q_j je Q pozice změřeného j-tého symbolu,

- N je počet stavů dané modulace, v tomto případě je to 16.
- v_{max} je maximální absolutní hodnota vektoru symbolu.

6.4 Měření zapojení 2

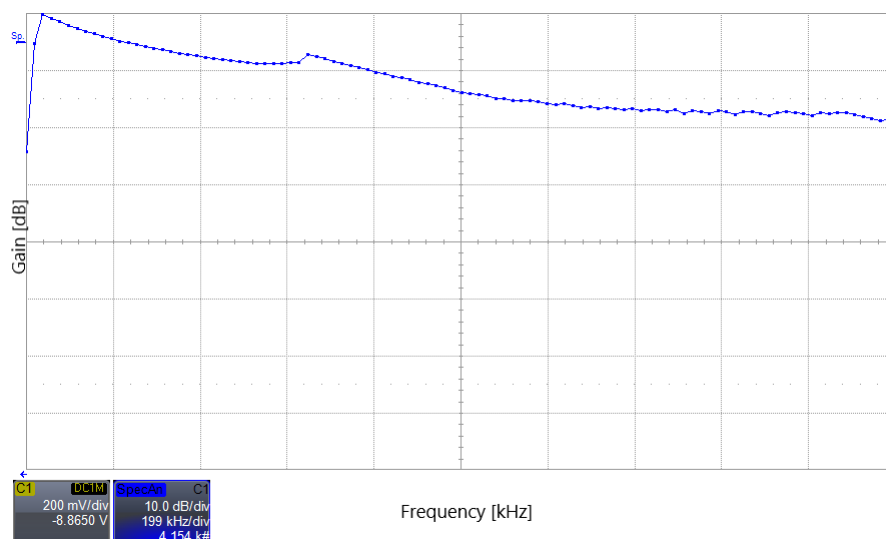
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, měření bylo realizováno jen se zapojením 2 popsaným v kapitole 4.2.

6.4.1 Měření frekvenční charakteristiky

První, co bylo měřeno, je frekvenční charakteristika, která zobrazuje výstupní výkon v závislosti na konkrétní vstupní frekvenci.

Při měření frekvenční charakteristiky se měří výstupní výkon daného vysílače pro určité frekvence. Měření probíhalo s generátorem Hameg2525, na kterém se nastavil tzv. „frequency sweep“ s logaritmickým krokem. To znamená, že generátor pro určitou hodnotu amplitudy postupně projde s určitým krokem (který si generátor v případě měření nastavil sám podle nastaveného času pro celý sweep 180 sekund) od minimální do maximální frekvence. Konkrétně pak byla nastavena amplituda signálu $V_{in} = 1,8$ V a nastavený stejnosměrný offset $V_{offset} = 1$ V. Osciloskopem (LeCroy 640Zi) se měří sondou připojenou k OLED panelu. Minimální frekvence byla $f_{min} = 80$ kHz a maximální frekvence $f_{max} = 2$ MHz

Na obrázku 6.2 je vidět průběh frekvenční charakteristiky pro navržený vysílač (formou screenshotu z osciloskopu).

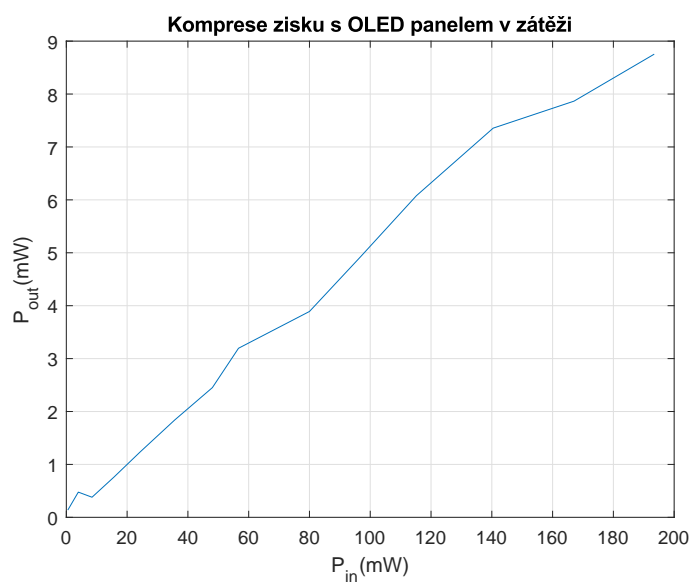


Obrázek 6.2: Frekvenční charakteristika vysílače (na ose x jsou vyznačeny frekvence (kHz) a na ose y pak výkon (dB))

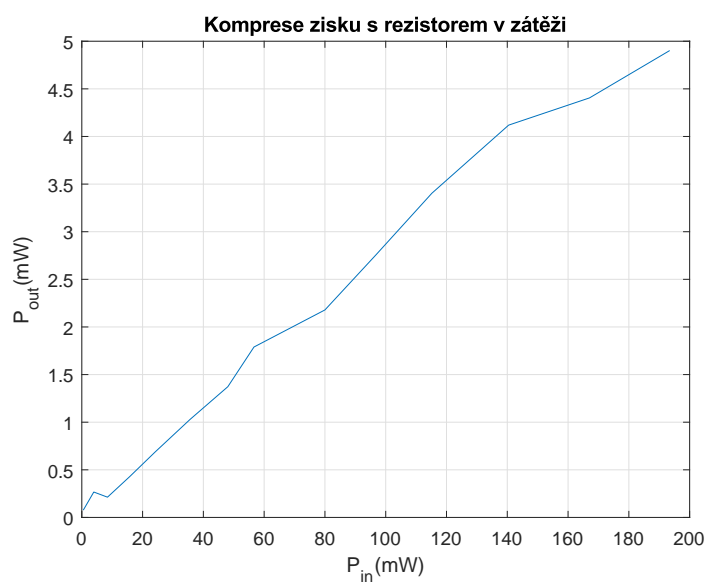
6.4.2 Měření komprese zisku

Při tomto měření se měří závislost výstupního výkonu na vstupním a hledá se úroveň, při které už výstupní výkon zůstává stále stejný (dochází k saturaci), i když nadále zvyšujeme vstupní výkon. Při tomto měření tento bod nebyl změřen, protože výstupní výkon vysílače by přesáhl maximální vstupní výkon do panelu a došlo by tak k jeho nevratnému poškození. Přesný postup měření byl takový, že se na generátoru Hameg2525 nastavila konstantní frekvence $f = 200$ kHz a měnila se amplituda signálu po určitém kroku. Tato úroveň vstupní amplitudy byla měřena osciloskopem, výstupní napětí na zátěži bylo měřeno druhou sondou. Jako zátěž zde byl použit samotný OLED panel, a pak i rezistor $R = 47 \Omega$ pro simulaci lineární zátěže.

Tato změřená napětí se následně přepočítala na hodnoty výkonu. Na vstupu z generátoru se uvažuje impedance $Z = 50 \Omega$ a na výstupu jsem pro výpočet použil dynamický odpor panelu $R_{OLED} = 26,32 \Omega$. Z toho bylo možné vypočítat všechny potřebné údaje a vykreslit grafy 6.3 a 6.4, které zobrazují kompresi zisku.



Obrázek 6.3: Komprese zisku pro OLED panel v zátěži



Obrázek 6.4: Komprese zisku pro rezistor v zátěži

6.4.3 Měření EVM a MER

Tato měření byla realizována za pomoci generátoru Rohde & Schwarz SMW200A a spektrálního analyzátoru Rohde & Schwarz model FSW. Na generátoru byla nastavena mo-

dulace společně se symbolovou rychlostí a nosnou frekvencí. Tyto údaje musely být nastaveny i na analyzátoru, aby bylo zřejmé, jak má přijatá data interpretovat. Konkrétní parametry budou pak popsány pro každou modulaci zvlášť.

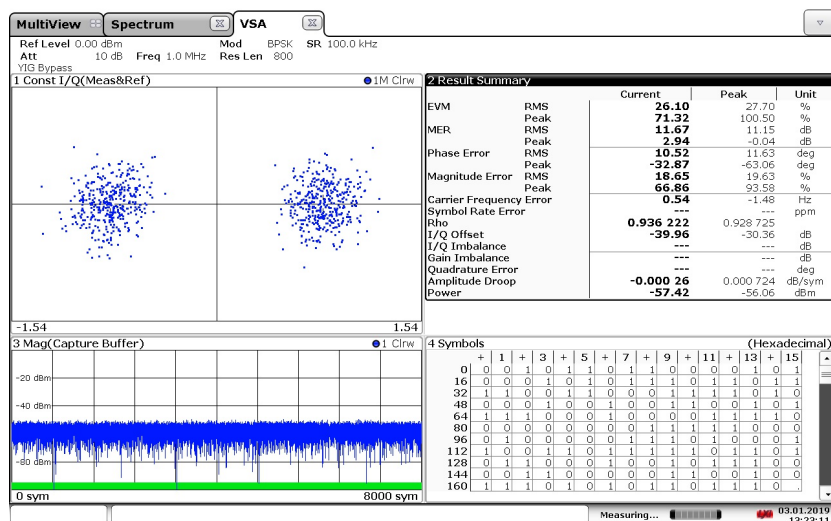
BPSK

Jak je z obrázků 6.5 a 6.6 zřejmé, tak se zvyšující se symbolovou rychlostí narůstá chybavost EVM i MER. Symbolovou rychlost si můžeme přepočítat na přenosovou rychlost podle vztahu:

$$\begin{aligned} v_{p100} &= v_m \cdot n = 100000 \cdot 2 = 200000 = 200 \text{ kbps} \\ v_{p70} &= v_m \cdot n = 70000 \cdot 2 = 140000 = 140 \text{ kbps} \end{aligned} \tag{6.3}$$

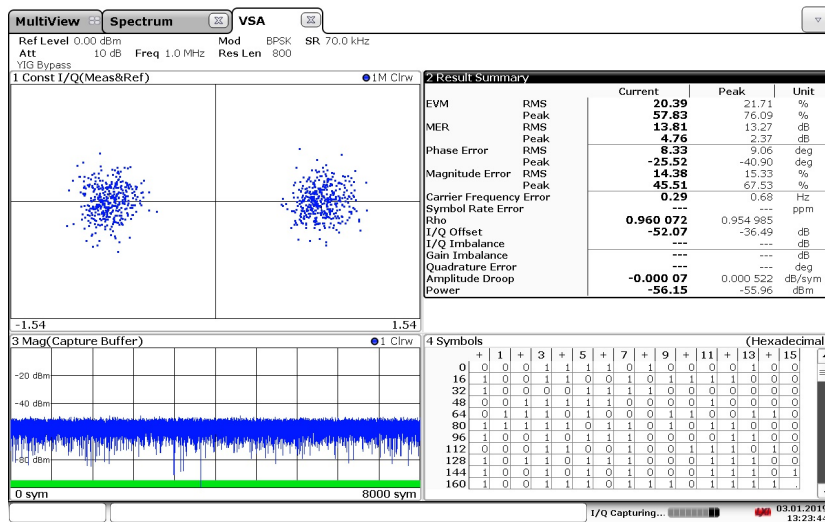
| Symbolová rychlost (ksymbol/s) | EVM (RMS) | MER (RMS) |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| 100 | 26,1 | 11,67 |
| 70 | 20,39 | 13,81 |

Tabulka 6.1: EVM a MER pro BPSK



13:23:12 03.01.2019

Obrázek 6.5: EVM a MER pro modulaci BPSK, symbolová rychlost 100 ksymbol/sec, nosná frekvence 1 MHz



13:23:44 03.01.2019

Obrázek 6.6: EVM a MER pro modulaci BPSK, symbolová rychlost 70 ksymbol/sec, nosná frekvence 1 MHz

I když se na první pohled jeví hodnoty EVM a MER vysoké, tak u takovéto dvoustavové modulace to není na závadu. Stavů jsou od sebe natolik daleko, že je stále možné bezpečně je rozpoznat od sebe.

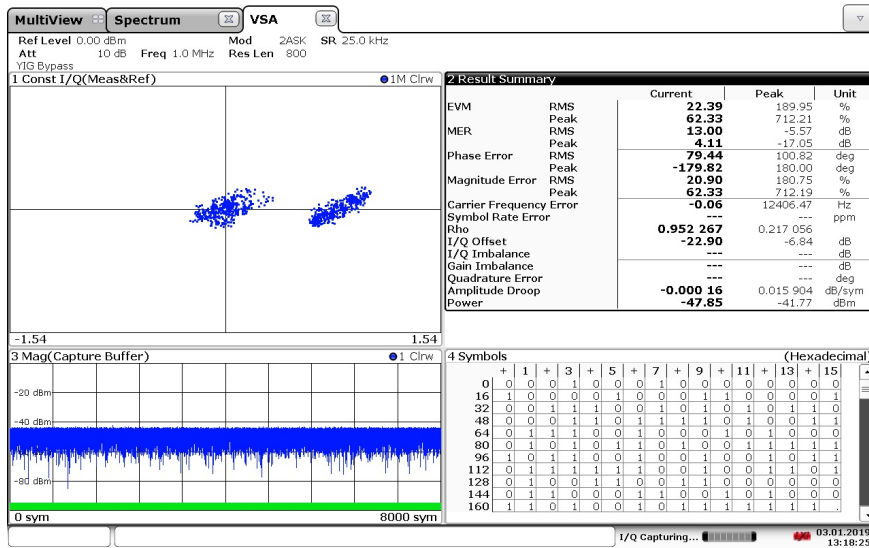
2ASK

Tato modulace vykazuje vyšší hodnotu EVM a MER a musela být použita nižší symbolová rychlost. Přenosová rychlost:

$$v_{p25} = v_m \cdot n = 25000 \cdot 2 = 50000 = 50 \text{ kbps} \quad (6.4)$$

| Přenosová rychlost (kbps) | Symbolová rychlost (ksymbol/s) | EVM (RMS) | MER (RMS) |
|---------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|
| 50 | 25 | 22,39 | 13 |

Tabulka 6.2: EVM a MER pro 2ASK



13:18:25 03.01.2019

Obrázek 6.7: EVM a MER pro modulaci 2ASK, symbolová rychlost 25 ksymbol/sec, nosná frekvence 1 MHz

QPSK a offset QPSK

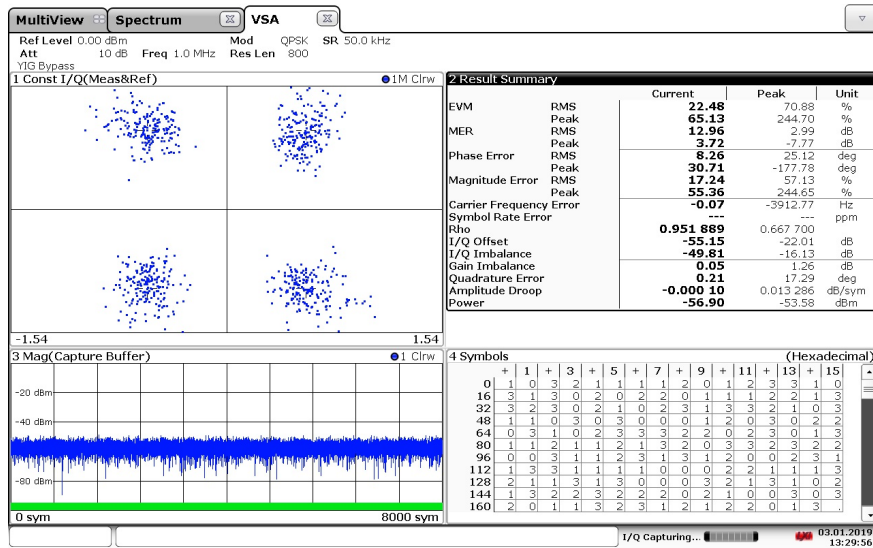
U modulace offset QPSK byla použita nižší symbolová rychlost, protože EVM a MER byl příliš velký. Přenosová rychlost:

$$v_{pQPSK} = v_m \cdot n = 50000 \cdot 4 = 200000 = 200 \text{ kbps} \quad (6.5)$$

$$v_{pQPSK} = v_m \cdot n = 10000 \cdot 4 = 40000 = 40 \text{ kbps}$$

| Typ | Přenosová rychlost (kbps) | Symbolová rychlost (ksymbol/s) | EVM (RMS) | MER (RMS) |
|-------|---------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|
| QPSK | 200 | 50 | 22,48 | 12,96 |
| OQPSK | 40 | 10 | 30,09 | 10,43 |

Tabulka 6.3: EVM a MER pro QPSK a OQPSK



13:29:57 03.01.2019

Obrázek 6.8: EVM a MER pro modulaci QPSK, symbolová rychlost 50 ksymbol/sec, nosná frekvence 1 MHz

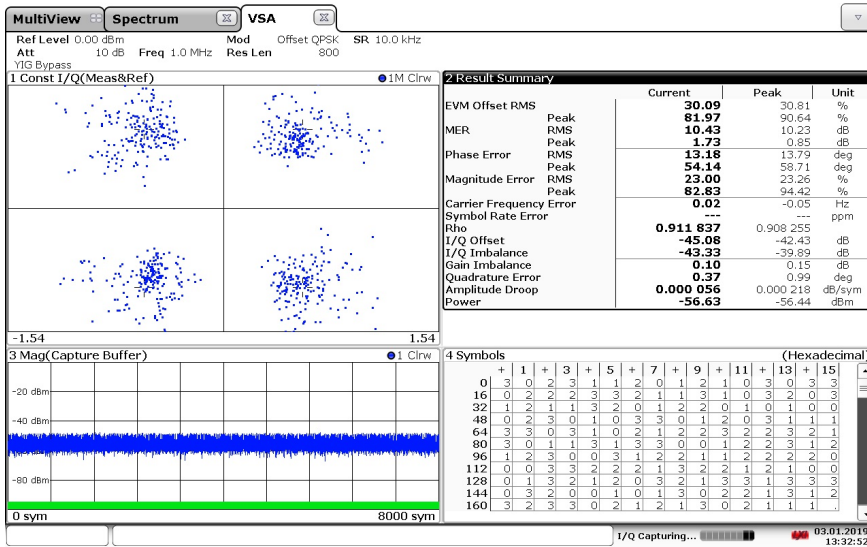
BER

Pro měření parametru BER byla použita modulace 2ASK s přenosovou rychlostí 50 kbps.

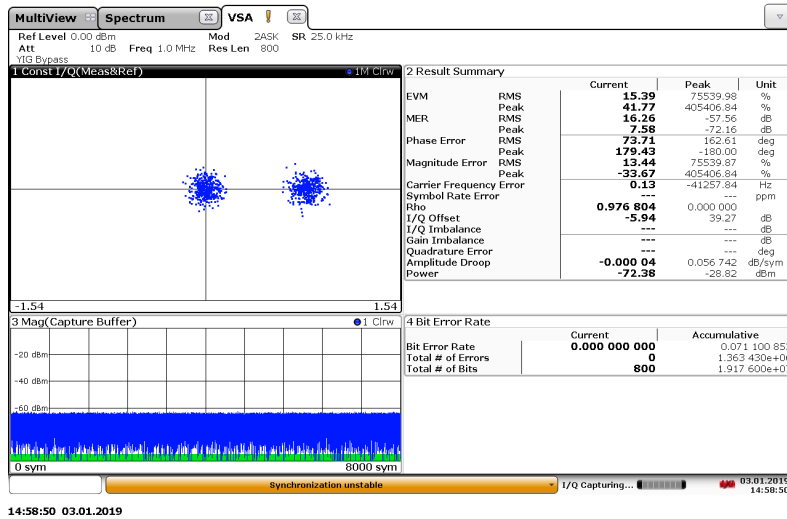
| Počet chybně přijatých | Celkový počet přijatých | BER | BER (%) |
|------------------------|-------------------------|-------------|---------|
| 1.363430E6 | 1.917600E7 | 0.071100853 | 7,11 % |

Tabulka 6.4: BER

Jak je popsáno v tabulce 6.4, hodnota BER je 7,11 %.



Obrázek 6.9: EVM a MER pro modulaci OQPSK, symbolová rychlost 10 ksymbol/sec, nosná frekvence 1 MHz



Obrázek 6.10: BER pro modulaci 2ASK, přenosová rychlost 50 kbps, nosná frekvence 1 MHz

Kapitola 7

Závěr

Na začátku práce jsem provedl rešerši, v rámci které jsem se soustředoval na případná aktuálně používaná řešení ve VLC. V kapitole 3.4 jsem charakterizoval použitý OLED panel s pomocí údajů z katalogového listu výrobce a následně pak i s pomocí V/A charakteristiky, pro kterou jsem změřil potřebná data. Dále pak ještě proběhlo měření S parametru S_{11} pro stanovení náhradního modelu, viz kapitola 3.6. Díky tomu jsem následně mohl navrhnout náhradní model OLED panelu (3.6) a tím splnit další bod zadání.

V dalším kroku jsem provedl návrhy několika zapojení. V této práci jsem uvedl dvě zapojení, která fungovala nejlépe. V rámci pokusů a zjišťování vhodných postupů byly testovány i proudové zdroje například s tranzistory v konfiguraci kaskodového proudového zrcadla, které se příliš neosvědčily a proto od nich bylo ustoupeno.

Dvě finální zapojení jsou tedy popsána v kapitolách 4.1 a 4.2. Pro obě tato zapojení jsem provedl analýzu a simulaci v rámci přípravy na finální měření, čímž jsem splnil další bod zadání. Pro tato zapojení bylo následně navrženo několik úrovní realizace, včetně realizace na nepájivém univerzálním poli, ale i na univerzální pájivé SMD desce s následnou finalizací na precizně navržených DPS, ve kterých jsem mohl zohlednit všechny negativní vlastnosti zjištěné z prototypování.

V rámci finálních desek jsem pak mohl realizovat měření popsané v kapitole 6.4. Změřil jsem frekvenční charakteristiku přenosu aby byla patrná závislost výstupního výkonu na vstupní frekvenci. Dále jsem změřil kompresi zisku daného vysílače. Z té jsem zjistil, že při úrovni výstupního signálu, kterou ještě panel dokáže bez poškození přežít, ke kompresi nedochází. Následně jsem měřil parametry EVM, MER, BER pro různé typy modulací. Konkrétněji jsem pak používal především dvoustavové modulace, které jsou pro vysílač na bázi proudového zdroje nejvýhodnější. Například u 2ASK modulace jsem

naměřil BER 7,11 což sice není ideální hodnota, jenže toto je způsobeno tím, že OLED panel nemá pro tyto účely zcela ideální vlastnosti jako je například jeho velká kapacita (viz kapitola 2.4), a tedy i tato hodnota se z tohoto pohledu dá považovat za uspokojivou.

V rámci diplomové práce jsem tedy charakterizoval OLED panel, navrhl jeho náhradní obvod, dále pak navrhl a odsimuloval vysílač formou proudového zdroje a navrhl možnost ekvalizace. U tohoto vysílače jsem změřil jeho frekvenční charakteristiku, kompresi zisku a parametr BER. Nad rámec zadání jsem změřil parametry MER a EVM, které jsou také z hlediska hodnocení kvality vysílače důležité. Tímto jsem splnil všechny body zadání své diplomové práce.

Práce je důležitá především z hlediska zkoumání toho, jak je nebo není možné OLED panely využít pro komunikaci ve viditelném světle za použití vysílače na bázi proudového zdroje. Předpokládám, že se OLED technologií bude v budoucnu zabývat větší počet výzkumníků než nyní, a tak dokáží tuto velice zajímavou technologii lépe prozkoumat a navrhnout optimální řešení, které dokáže poskytnout velké přenosové rychlosti a malou chybovost, a bude použitelné v praxi.

Literatura a zdroje

- [1] A. Guillemin, “Illustration of the photophone’s transmitter.” [Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photophone_transmitter_4074931746_9f996df841_b.jpg], 1882. [vid. 21.7.2018].
- [2] D. Gillbert, “What is li-fi? Meet The Revolutionary Wireless Technology That Is 100 Times Faster Than Wi-Fi.” [Dostupné z: <http://intellexcommunications.com/li-fi-meet-revolutionary-wireless-technology-100-times-faster-wi-fi/>], 2015. [vid. 22.11.2018].
- [3] Sujan Rajbhandari a kol., “A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 32/2, pp. 1–40, 1 2017.
- [4] P. Ronan, “*EM spectrum*.” [Dostupné z https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg], 2007. [vid. 10.4.2018].
- [5] LG Display, “You Create We Light.” [Dostupné z: <http://www.lgoledlight.com/index.do#about-oled>]. [vid. 2.10.2018].
- [6] R. Mertens, *The OLED Handbook (2016 edition)*. OLED-Info, 2016.
- [7] R. Mertens, “Oled encapsulation: technological introduction and market status.” [Dostupné z: <https://www.oled-info.com/lg-chem-developed-new-plastic-based-truly-flexible-oled-lighting-panels-mass-produce-them-2015>]. [vid. 22.10.2018].
- [8] Paul A. H., Z. Ghassemlooy a S. Rajbhandari a I. Papakonstantinou, “Visible Light Communications Using Organic Light Emitting Diodes,” *IEEE Communicatins Magazine*, pp. 148–154, 8 2013.

- [9] H. L. a kol., “A 550 mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light led for practical high-speed lowcomplexity application,” *OPTICS EXPRESS*, vol. 22, pp. 637–640, 8 2014.
- [10] L. LG Chem, “N6sb30 technical data sheet.” [Dostupné z https://www.buerklin.com/medias/sys_master/download/download/h87/h75/8892085305374/technical-data-sheet-lg-chem-n6sb30-en-20160314.pdf], 4 2014.
- [11] Thorlabs, Inc., “Si Transimpedance Amplified Photodetectors.” [Dostupné z http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3257&pn=PDA10A#], [vid. 20.11.2018].
- [12] T. C. L. C. Inc., “Analog qam.” [Dostupné z <http://www.yourdictionary.com/qam>]. [vid. 14.5.2018].
- [13] R.-L. L. a kol., “Oled equivalent circuit model with temperature coefficient and intrinsic capacitor.” [Dostupné z: "<https://ieeexplore.ieee.org/document/7175001/>"], 2015. [vid. 20.4.2018].
- [14] T. Instruments, “Implementation and applications of current sources and current receivers.” [Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sboa046/sboa046.pdf>]. [vid. 8.2.2018].
- [15] T. Instruments, “High-side voltage-to-current (v-i) converter.” [Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slau502/slau502.pdf>]. [vid. 29.12.2018].
- [16] National Instruments Corporation, “NI Multisim.” [Dostupné z: <http://www.ni.com/multisim/>], 5 2016. [vid. 14.10.2018].
- [17] ST, “2n3905 / 2n3906.” [Dostupné z: "<http://files.rct.ru/pdf/transistor/2n3905-06.pdf>"], 11 2016.
- [18] G. semiconductor, “2n3904.” [Dostupné z: "<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/2N3903-D.PDF>"], 1 1999.
- [19] Toshiba, “2sa1013.” [Dostupné z: "<https://www.promelec.ru/pdf/2SA1013.pdf>"], 9 1997.
- [20] Toshiba, “2sc2383.” [Dostupné z: "https://www.fecegypt.com/uploads/dataSheet/1471347300_31-toshiba-2sc2383.pdf"], 12 2009.

- [21] I. New Japan Radio Co., “Njm4580.” [Dostupné z: "https://www.njr.com/semicon/PDF/NJM4580_E.pdf].
- [22] O. Semiconductor, “Bp2n2222a.” [Dostupné z: "<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/P2N2222A-D.PDF>], 1 2013.
- [23] T. Instruments, “Opa2192.” [Dostupné z: "<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2192.pdf>], 12 2013.
- [24] T. Instruments, “Opa197.” [Dostupné z: "<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa197.pdf>], 3 2018.
- [25] D. SEMICONDUCTORS, “Bw170.” [Dostupné z: "<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BS170-D.PDF>], 4 1995.
- [26] CadSoft, “Eagle.” [Dostupné z <http://www.cadsoftusa.com/>], 5 2016. [vid. 14.9.2018].
- [27] I. CIRCUITS, “74hc/hct4066 quad bilateral switches.” [Dostupné z: "<https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74LVC4066.pdf>], 11 1998.
- [28] National Instruments Corporation, “Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM).” [Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en/>], 10 2014. [vid. 20.9.2018].