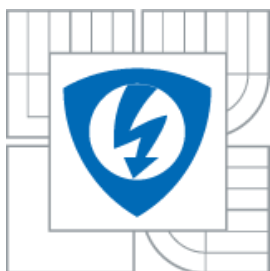




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTROTECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

BEZMEMBRÁNOVÝ REPRODUKTOR

MEMBRANELESS SPEAKER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

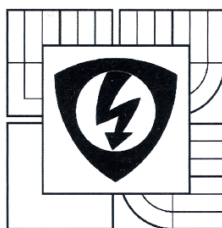
Josef Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Josef Kovář

Ročník: 3

ID: 155134

Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

Bezmembránový reproduktor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte elektroniku pro řízení bezmembránového plasmového reproduktoru. Pro generování audiosignálu použijte pulsně-šířkovou modulaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10. 2. 2015

Termín odevzdání: 4.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
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.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Bezmembránového reproduktoru**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. června 2015

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Michalovi Pavlíkovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

Děkuji Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D za odbornou pomoc při laboratorním měření.

Dále bych chtěl poděkovat panu Martinu Kovaříkovi za podporu a inspiraci při realizaci zařízení.

V Brně dne 4. června 2015

.....
podpis autora

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá shrnutím teoretického základu a návrhem jednokanálového bezmembranového reproduktoru. Bezmembranový reproduktor postrádá mechanické prvky a tudíž není zatížen frekvenční limitací. Návrh sestává ze zdroje pro jednotlivé části obvodu, řídicí elektroniky, která zajišťuje modulaci signálu, měniče a výstupního transformátoru. Zdroj je realizován pomocí transformátoru, který snižuje napětí a stabilizátorů. Modulaci řídí integrovaný obvod TL 594, jehož střída se nastavuje potenciometrem P_1 a frekvence potenciometrem P_2 . Použitý měnič je jednočinný o jednom směru proudu a dvou polaritách napětí. Výstupní transformátor byl použit z barevné televize.

Abstract

The bachelor thesis consists of theoretic basics and describes the design and construction of one-channel membraneless speaker. Absence of mechanical components gives the membraneless speaker no frequency limitation. The design consists of power source, control electronics, which modulates the signal, convertor and output transformer. The power source is realized by transformer, which lowers the voltage and stabilizers. Modulation is provided by integrated circuit TL 594, its duty is adjusted by potentiometer P_1 and frequency by potentiometer P_2 . Power conversion provides dual forward converter. As a output transformer was used transformer from color television.

Klíčová slova

Bezmembranový reproduktor, plazma, ionophone, integrovaný obvod, měnič, transformátor, plazmový reproduktor, filtr, procesor, oscilátor, komparátor, ionizace, stabilizátor

Keywords

Membraneless speaker, plasma, ionophone, integrated circuit, convertor, transformer, plasma speaker, filter, processor, oscillator, comparator, ionization, stabilizator,

Bibliografická citace práce: KOVÁŘ, J. *Bezmembránový reproduktor – bakalářská práce.* Brno, 2015. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Pavlík, Ph.D. FEKT VUT v Brně.

Obsah

Úvod	9
1 Teoretický základ bezmembránových reproduktorů	10
1.1 Historie plazmového reproduktoru.....	10
1.1.1 Ionophone	11
1.1.2 Bezmembránový reproduktor využívající plamen	12
1.2 Princip plazmového reproduktoru	13
1.3 Typy plazmových reproduktorů a jejich využití.....	14
1.3.1 Reproduktor s vysokoteplotní plazmou	14
1.3.2 Reproduktor s nízkoteplotní plazmou.....	14
1.4 Využití plazmových reproduktorů	15
1.5 Plazma	15
1.5.1 Stupeň ionizace plazmatu	16
1.5.2 Teplota plazmatu.....	17
1.6 Elektrické výboje	17
1.6.1 Závislost elektrického výboje na napětí	17
2 Návrh plazmového reproduktoru.....	19
2.1 Blokové schéma.....	19
2.1.1 Zdroj napájecího napětí.....	19
2.1.2 Pulzní šířková modulace	20
2.1.3 Měnič.....	23
2.1.4 Vysokonapěťový transformátor	24
2.1.5 Shrnutí	24
3 Dimenzování součástek.....	25
3.1 Výpočet ztrátového výkonu	25
3.2 Ztráty přepínáním.....	26
4 Měření plazmového reproduktoru.....	27
4.1 Měření frekvenční charakteristiky	27
4.2 Měření harmonického zkreslení THD.....	28
4.3 Měření charakteristické citlivosti plazmového reproduktoru.....	29
Závěr.....	31
Bibliografie	32

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vnitřní schéma ionofonu [5]	11
Obrázek 2: Schéma bezmembránového reproduktoru využívajícího plamen [1].....	12
Obrázek 3: Acapella ION TW 1S (Ionic Tweeter).....	13
Obrázek 4: Blokové schéma plazmového reproduktoru.....	19
Obrázek 5: Usměřovač pro napájení výkonové části	19
Obrázek 6: Napájení pro budič a signálovou část.....	20
Obrázek 7: Vnitřní zapojení integrovaného obvodu TL 594[19].....	21
Obrázek 8: Schéma zapojení obvodu s TL 594.....	22
Obrázek 9: Schéma výkonového měniče s toroidním transformátorem[17]	23
Obrázek 10: Schéma celého obvodu	24
Obrázek 11: Frekvenční charakteristika plazmového reproduktoru	27
Obrázek 12: Zkreslení druhé harmonické složky signálu.....	28
Obrázek 13: Celkové harmonické zkreslení.....	29
Obrázek 14: Charakteristická citlivost plazmového reproduktoru	30

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí bezmembránového reproduktoru. Téma bezmembránového reproduktoru bylo v minulosti podrobena velkému výzkumu. Jedná se o typ reproduktoru, který nemá žádné pohyblivé části, tudíž není frekvenčně limitován a jeho funkčnost je lepší a přesnější než funkce normálního membránového reproduktoru. Tento typ reproduktorů bývá v současnosti využíván většinou jako výškové reproduktory. Jejich cena je však bohužel hodně vysoká. Plazmový reproduktor využívá změny tlaku vzduchu kolem obloukového výboje mezi elektrodami vysokonapěťového transformátoru k vytváření zvuku. Modulace napětí mezi elektrodami je realizována pomocí audio signálu. Pro modulaci signálu je použit integrovaný obvod TL 594. Předmětem této bakalářské práce je teoretický rozbor plazmového reproduktoru a návrh tohoto zařízení, jeho následná konstrukce a měření výstupních frekvenčních charakteristik a jejich analýza.

1 Teoretický základ bezmembránových reproduktorů

Tato kapitola se zabývá shrnutím dosažených výsledků při konstrukci bezmembránových reproduktorů v minulosti. Popisuje plazmu jako čtvrté skupenství hmoty a zabývá se také problematikou elektrických výbojů a jejich závislosti na napětí.

1.1 Historie plazmového reproduktoru

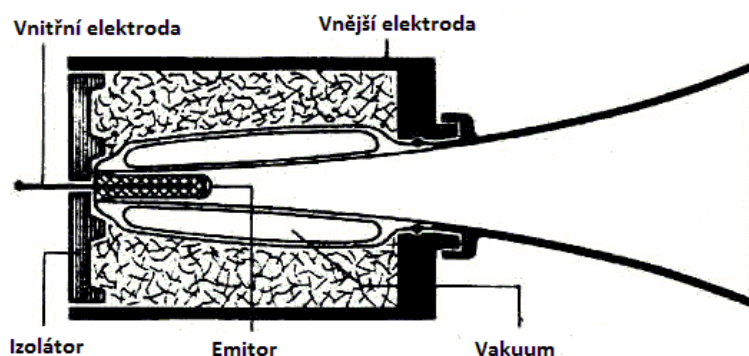
Plazmový reproduktor je fenomén, kterým se v historii zabývala spousta vědců a výzkumných týmů. První, kdo přišel s nápadem hrajícího výboje, byl v roce 1858 John Leconte. Leconte si při návštěvě jednoho z koncertů filharmonie všimnul toho, že výbojka, která byla instalována v sále, reaguje na určité tóny hrané orchestrem a to konkrétně na dolní konec audiospektra. Tóny o frekvenci jen pár hertzů. Leconte nahlásil svůj objev Královské Akademii a prohlásil, že tímto problémem je potřeba se nadále zabývat.[1]

Další zmínka o této problematice je datována do roku 1899. Během minulosti byly v ulicích Anglie instalovány právě výbojkové lampy, které neposkytovaly příliš kvalitní osvětlení. Fungovaly na podobném principu jako elektrický oblouk při svařování. Dvě elektrody byly připojeny k baterii a vzdáleny od sebe jen pár milimetrů. Po připojení napětí následoval průraz vzduchu elektrickým výbojem a proud začal následně protékat z jedné elektrody do druhé. Poté byly elektrody od sebe vzdáleny o pár dalších milimetrů, aby se výboj prodloužil a bylo tak docíleno lepšího zdroje světla. Tato forma osvětlení však nebyla úplně ideální, protože světlo bylo slabé a navíc byla výbojka provázána dalšími problémy, jako byla nestabilita elektrického oblouku, koroze elektrod a rychlé vyčerpání baterie. Dalším nepříjemným vedlejší efektem, který neodmyslitelně doprovázel tento zdroj osvětlení, bylo neustále bzučení. První člověk, který se tímto bzučením lamp zabýval, byl britský inženýr a vynálezce William Duddell.[1][2][8] Během svých experimentů Duddell zjistil, že při použití různých napájecích napětí lamp se změní taky frekvence bzučení, které lampy produkovaly. Duddell poté pokračoval ve výzkumu výboje. Zjistil, že pokud připojí k elektrodám kondenzátor a indukčnost do série, vznikne rezonanční obvod, který bude oscilovat na frekvenci stanovené velikostí kapacity a indukčnosti v obvodu. V obvodu se totiž uplatňuje tzv. negativní rezistivita. Ta se projeví tím, že při zvýšení elektrického napětí mezi elektrodami obvodu dojde ke snížení proudu mezi elektrodami a naopak. Jedná se tedy o jakýsi obrácený Ohmův zákon. To vysvětluje princip oscilačního obvodu použitého Wiliamem Dudellem. Po připojení LC filtru k obvodu se začne nabíjet kondenzátor, čímž se odvede část proudu, která by normálně procházela elektrickým obloukem a která teď nabíjí kondenzátor. Vzhledem k charakteristikám oblouku a jeho negativní rezistivitě dojde tedy k nárůstu napětí mezi elektrodami. Poté co dojde k maximálnímu nabití, se proud obrátí a dojde k vybití kondenzátoru směrem do elektrického oblouku. Jak se proud protékající obloukem zvyšuje, klesá potenciál mezi dvěma elektrodami a tudíž i napětí mezi nimi. To má za následek vybití kondenzátoru. Po vybití kondenzátoru, se tento proces opět opakuje jeho nabitím a snížením proudu protékajícího mezi elektrodami. Pokud je rezistivita obvodu dostatečně malá, bude se tento

efekt opakovat dokola a obvod bude tedy oscilovat. Duddell zjistil, že je nezbytné použití kondenzátoru minimálně o velikosti 1 μF k získání oscilací potřebné energie. Při použití větší kapacity nebylo možné dosáhnout dostatečně vysokých frekvencí pro přenos signálu. Duddell pokračoval dále a vytvořil si speciální klávesnici, která se skládala z několika odstupňovaných rezonančních obvodů, které stiskem klávesy připojoval k elektrickému oblouku, který tak měnil svou frekvenci bzučení. Odtud se vzal název zpívající elektrický oblouk, který je dodnes často používán. Vytvořil tak vlastně první elektronický nástroj, který byl slyšitelný i bez použití předzesilovačů, které ještě nebyly vynalezeny. Duddell předvedl svůj vynález na Londýnském institutu inženýrství. Nesetkal se však s velkým ohlasem a jeho objev se nestal ničím více než pouhou novinkou, která lidi bavila. Nikdy svůj vynález nezkomercializoval, jezdil po Británii a ukazoval lidem svůj objev, který však bohužel nikdo nepovažoval za průlomový. [2][3]

1.1.1 Ionophone

Další člověk, který se zabýval fenoménem zvuku ovládaného napětím, byl francouzský inženýr Siegfried Klein, který také poprvé zkomercializoval svůj výrobek a nazval ho Ionophone.



Obrázek 1: Vnitřní schéma ionofonu [5]

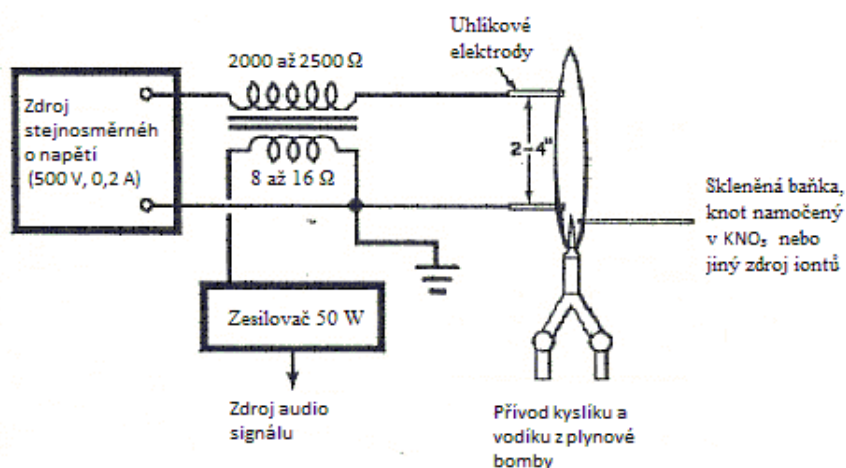
Jeho zařízení pracovalo následujícím způsobem. Jak je patrné z obr.1, řídicí elektroda je umístěna na vstupu rohu a je napájena přes transformátor. Tato elektroda je vlastně považována za anodu a je dále obalena izolátorem, kolem ní je umístěno krytí, které se chová jako druhá elektroda – katoda. Anoda potřebuje napájení asi 700 V stejnosměrného napětí. Elektroda se rozžhává, ionizuje vzduch kolem ní a vytvoří se kolem ní shluk iontů. Pokud dále modulujeme napětí napájecího transformátoru, dojde ke změnám v tlaku vzduchu, které jsou způsobeny kolizí mezi kladně nabitými ionty a neutrálními částicemi.

Svým Ionophonem vytvořil Klein spojení mezi nabitými částicemi a jejich rolí při vytváření zvuku, čehož bylo poté využito i jinými výzkumnými týmy. Kleinovi se podařilo dosáhnout dobrého zvuku při vysokých frekvencích, bohužel však také došel na jednu z největších limitací reproduktorů tohoto typu a to jejich využitím při nízkých frekvencích. Klein tento problém řešil tvarem samotného opláštění a taky velikostí rohu. Nicméně i při

těchto změnách se mu nepodařilo uspokojivě zahrát frekvenci nižší než 200 Hz. Klein dále pokračoval ve vylepšení svého zařízení až do roku 1984.[4,8]

1.1.2 Bezmembránový reproduktor využívající plamen

Za zmínku stojí také „Flame speaker“ doktora Cattanea a jeho týmu. Jejich přístroj též využívá iontů jako přístroj Kleinův, nicméně oba pracují na jiném principu. „Flame speaker“ pracuje na principu modulace iontů vznikajících při spalování kyslíku a acetylenu.



Obrázek 2: Schéma bezmembránového reproduktoru využívajícího plamen [1]

Na obr.2 je vidět jednoduché schéma jejich přístroje. Zapojení přístroje je následovné. Výstup z kazetového přehrávače Sony 365 je zapojen na vstup padesáti wattového zesilovače McIntosh a jeho výstup je pak zapojen na sekundární vinutí transformátoru. Zdroj napětí Hewlett-Packard Model 712-B (500 V DC a 200 mA) je připojen přes primární vinutí transformátoru na systém uhlíkových elektrod. Které jsou vzdáleny 50 - 100 milimetrů od sebe a umístěny v trubici, ve které hoří oheň, jehož složky jsou acetylen a kyslík. Tyto dvě složky ve správném poměru zajistí ohni to, že nevydává při hoření praktický žádný zvuk. Tudiž nedojde k rušení zvuku. Do ohně se poté přidají určité materiály, které zajistí superionizaci a tím tedy i maximální produkci iontů při spalování. Cattaneo se svým týmem použil při experimentu sodíkovou tyčinku. Po tomto kroku oheň změnila barvu z modré na oranžovou, což je indikátorem toho, že došlo k superionizaci. Po dosažení superionizace Cattaneo zapnul magnetofon a nastavil patřičné napětí na zdroji. Jelikož je trubice plná iontů, je vedení proudu z elektrody na elektrodu poměrně jednoduché a není potřeba tak vysoké průrazné napětí jako při použití vzduchu, protože rezistivita se značně sníží. Oheň sám o sobě už zajistí produkci iontů. Nicméně přidáním sodíku do ohně dojde až ke třicetidvounásobnému zesílení zvuku. Doktor Cattaneo tak dosáhl poměrně uspokojivých výsledků. Frekvenční maximum činilo asi 100 kHz, navíc se zvuk šířil prostředím všemi směry a nemusel být tedy směrově orientovaný. Problém nastal opět při přehrávání nižších frekvencí. Cattaneo tento problém vysvětlil nedostatečnou délkou plamene a výboje. Pokud by byl výboj dostatečně dlouhý, mohl by tento přístroj přehrávat i velmi nízké frekvence. Cattaneo dále využil tohoto výzkumu v raketovém inženýrství, kde se snažil najít analogii při

spalování paliva rakety a zvukem, podle kterého by indikoval stav letící rakety, vypovídal o jejím vnitřním stavu a případných závadách systému spalování. [1,8]

Dalším typ bezmembránového reproduktoru byl v roce 1978 představen firmou Plasmatronics. Jeho vynálezce Allan E. Hill použil k ionizaci vzduchu helium. Tento typ reproduktoru měl výhodu v tom, že neprodukoval jedovatý ozon a oxid dusný. Nevýhodou bylo to, že přístroj potřeboval neustálou zásobu helia, což je poměrně nepraktické. I přesto však firma pokročila k jeho komerčnímu prodeji pro speciální účely. [6]

V současnosti se výrobou podobných reproduktorů zabývá německá firma Accapella, která produkuje reproduktory různých typů pro nízké i vysoké frekvence. Některé reproduktory nabízejí frekvenční spektrum až po 50 kHz. O jejich principu je známo málo informací, nicméně vzhledem k jejich vzhledu a frekvenční charakteristice se dá předpokládat, že princip bude podobný jako u Allana E. Hilla. [7][8]



Obrázek 3: Accapella ION TW 1S (Ionic Tweeter)

Z historie je patrné, že princip plazmového reproduktoru byl mnohokrát zkoumán a vylepšován. Vzhledem k jejich dobré frekvenční charakteristice jsou plazmové reproduktory žádaným zbožím i v dnešní době.

1.2 Princip plazmového reproduktoru

Konvenční reproduktory jsou konstruované pomocí magnetu a cívky. Cívka pomocí magnetického pole pohybuje s membránou dopředu a dozadu a produkuje tak tlakové vlny, které vnímáme jako zvuk. Nicméně tento typ reproduktorů má problémy s přesným přenosem obdélníkových vln, protože má membrána přesně definovaný rozměr a hmotnost, nemůže bezprostředně měnit svůj směr pohybu.

Plazmové reproduktory pracují na principu zahřívání a ochlazování vzduchu kolem výboje. Oblast s vysokou teplotou plynu kolem výboje sousedí se studenější oblastí normálního prostředí a na pomezí těchto dvou prostředí vznikají rázy. Měnicí se tlak má za následek vyzáření tlakové vlny do okolí, kterou vnímáme jako zvuk. Velikost tlakových vln se mění pomocí modulace vysokého napětí mezi hroty. Vyšší napětí znamená větší teplotu a oblast zahřátého plynu. [9] Tento princip popisuje Boyleův – Mariottův zákon. [10]

$$PV = nRT, \quad (1.1)$$

kde P je tlak, V je objem, n je látkové množství plynu, R je molární plynová konstanta, T je absolutní teplota plynu

Pokud se zvýší teplota, objem nebo tlak se musejí zvýšit taktéž. Když je délka výboje fixována vzdáleností elektrod, objem plynu kolem výboje se zvýšit nemůže. Jediné co se tedy zvýšit může, je tlak plynu. Tato tlaková vlna generovaná výbojem je pak pozorovatelem zaznamenána jako zvuk. Při malých frekvencích předpoklad stálého počtu molekul vzduchu kolem výboje není splněn, což vede ke špatné odezvě. Proto má tento typ reproduktorů problémy s přehráváním malých frekvencí. Tento problém se často řeší přidáním basového reproduktoru k celé soustavě a pokrytí tak celého zvukového spektra pomocí frekvenční výhybky. Největší výhoda spočívá v tom, že plazmové reproduktory nemají žádnou membránu s definovanými rozměry a proto mají potenciál produkovat zvuk až do 150 kHz. Frekvenční limitace je způsobena tepelnou kapacitou plynu, který je ohříván v okolí výboje. Přesto tento typ reproduktorů stále nabízí mnohem lepší frekvenční spektrum než reproduktory normálního typu, které mají mechanické omezení dané jejich konstrukcí.

1.3 Typy plazmových reproduktorů a jejich využití

V následující kapitole jsou popsány dva typy plazmových reproduktorů, jejich využití v praxi, rozdíly mezi membránovými a bezmembránovými reproduktory a jejich limitace.

1.3.1 Reprodukční s vysokoteplotní plazmou

V současnosti existují dva typy plazmových reproduktorů. V první řadě to jsou obloukové reproduktory, pracující buď se střídavým nebo stejnosměrným napětím. Jejich princip je však velmi podobný a záleží jen na konstruktérovi zařízení, který typ si zvolí. Tomuto typu reproduktorů se někdy také říká „hot – plasma speaker“.[11] Tento typ reproduktoru je také tématem mé práce a jeho princip byl popsán v kapitole 1.2.

1.3.2 Reprodukční s nízkoteplotní plazmou

Dále jsou to takzvané iontové reproduktory. U tohoto reproduktoru nehoří mezi elektrodami stálý elektrický oblouk. Tomuto typu reproduktoru se říká také reproduktor s nízkoteplotní plazmou, neboli „cold – plasma speaker“.[11] Jejich princip je tedy odlišný od „hot – plasma speakerů“. Na elektrody je připojeno silné stejnosměrné napětí. Rozdíl jejich potenciálů způsobí to, že částice prostředí, které přijdou do styku s anodou, se nabijí kladným potenciálem a jsou přitáhnuty katodou, která má potenciál nižší. To má za následek ustálený proud iontů z jedné elektrody na druhou. Tomuto fenoménu se taky říká iontový vítr. Na své cestě pak ionty narážejí do molekul normálního plynného prostředí. Interakcí těchto molekul pak vzniká zvuk, který slyšíme. Změny amplitudy zvukového signálu je docíleno

pomocí modulace vysokého napětí na elektrodách. Ačkoliv bylo výzkumu „cold – plasma speakerů“ věnováno víc času než výzkumu „hot – plasma speakerů“, v praxi se tento typ reproduktoru moc nevyskytuje a většinou se vždy používá reproduktor se stálým elektrickým obloukem.

1.4 Využití plazmových reproduktorů

Hlavní výhodou plazmových reproduktorů je to, že nemají žádnou membránu a žádné mechanické prvky, které by vytvářely zvuk. Absence těchto pohyblivých prvků má za následek to, že takto zkonstruovaný reproduktor má perfektní odezvu a je schopen okamžitě reagovat i na velmi krátké pulzy. Frekvenční odezva navíc není zatížena žádnými nežádoucími rezonancemi. Tyto vlastnosti nám tedy umožňují vytvořit například zvukový generátor, který může vytvářet i velmi krátké zvukové pulzy v širokém zvukovém pásmu, které budou mít dobrou kvalitu. Normální reproduktor nebude schopný zahrát takto krátké pulzy kvůli parazitním vlastnostem, jako jsou indukčnost a kapacita. Takto vytvořený reproduktor bude mít velkou přesnost a bude mít možnost vytvářet zvuk o frekvencích mnohem vyšších, než je schopen normální reproduktor. Teoreticky je možné produkovat zvuk o frekvenci až 150 kHz a výše. [11] Navíc plazmové reproduktory mohou být konstrukčně velmi malé. Bohužel však má bezmembránový reproduktor i své nevýhody a určité limitace, které omezují jeho plné využití. Jednou z hlavních limitací je špatná odezva na signály o nízké frekvenci, přesněji frekvence kolem 100 Hz a nižší. Tyto frekvence není plazma speaker schopen skoro vůbec zahrát. Tento problém je ovlivněn hlavně délkou výboje mezi elektrodami a také volbou použité modulace audio signálu. Další nežádoucí vlastností je produkce ozónu, který je jedovatý a je vedlejším efektem výboje. Tento problém se v praxi podařilo některým firmám odstranit tím, že výboj hoří v prostředí, které je vyplněné plynem. Nejčastěji se používá helium. Bohužel tato zařízení jsou velmi drahá a pro jejich používání je nutné neustále doplňovat helium. Další problém je také špatná přeměna elektrické energie v kinetickou a s tím související velmi malá efektivita tohoto zařízení. Předmětem vývoje těchto zařízení v dnešní době je odstranění nebo alespoň částečné potlačení těchto problémů a limitací. Ovšem takovým způsobem, aby byl princip plazmového reproduktoru zachován.

1.5 Plazma

Plazma je čtvrté skupenství hmoty. Je to také nejrozšířenější forma hmoty ve vesmíru, kde tvoří až 99 % pozorované atomární hmoty. [12][13] Plazma je ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů, popřípadě neutrálních atomů a molekul. Tento ionizovaný plyn vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu, nebo ionizací. Ionizace je přesněji roztržení molekul atomů plynu. Směs těchto ionizovaných částic je pak rozprostřena v plynu z neutrálních částic. Jako celek je plazma elektricky neutrální a musí vykazovat kolektivní chování a tzv. kvazineutralitu. Kvazineutralita je přibližná rovnost koncentrací kladně nabitých iontů a záporně nabitých elektronů v oblasti plazmatu. Výsledná substance se poté jeví jako neutrální. Jako přírodní jev existuje plazma v několika formách, jako jsou například: oheň, blesk, vzniká i při průletu meteoritu skrz atmosféru, komety s plazmovým chvostem,

polární záře a v neposlední řadě také slunce, které je také plazmovitý útvar. Plazma jde také vytvořit uměle, například chemickými reakcemi nebo mechanicky, to jest rychle se pohybující plynná, kapalná nebo pevná hmota. Samozřejmě uměle plazma vzniká také při elektrických výbojích v plynech, jak je tomu i v našem případě. Elektrické výboje používají plazmu na to, aby si vytvořily dráhu přes nevodivý plyn. Ionizované částice poté vedou proud z jedné elektrody na druhou.

1.5.1 Stupeň ionizace plazmatu

Tato veličina je velmi důležitým parametrem plazmatu, protože v podstatě určuje následné chování plazmy. Je závislá především na teplotě. Plazma tedy můžeme dělit podle stupně ionizace na slabě ionizované plazma a silně ionizované plazma. V slabě ionizovaném plazmatu je koncentrace nabitých částic mnohem menší, než je koncentrace neutrálních molekul plynu. [12][13] V silně ionizovaném plazmatu je tomu přesně naopak a převažuje zde koncentrace nabitých částic nad molekulami a částicemi plynného prostředí. Stupeň ionizace lze přibližně odhadnout ze Sahovy rovnice pro jedenkrát ionizované plazma v termodynamické rovnováze. Sahova rovnice popisuje ionizační stupeň, který závisí především na rychlosti srážek částic plazmatu a tedy na teplotě, a má následující tvar:[14]

$$\frac{P_+^2}{1 - P_+} = CT^{3/2} \exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right), \quad (1. 2)$$

kde $C \sim 2,4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, P_+ je stupeň ionizace, U_i je ionizační potenciál, T je teplota plazmatu, K je Boltzmannova konstanta.

K ionizaci plazmatu pak může docházet různými způsoby. V našem případě se většinou jedná o nárazovou ionizaci. Při nárazové ionizaci dochází k rozpadu neutrální částice po srážce s částicí s vysokou kinetickou energií. Tato částice pak musí mít určitou energii, aby byla schopná vyrazit elektron z neutrální částice. Tato energie se nazývá tzv. ionizační energie. Další způsob ionizace je fotoionizace. Tento způsob ionizace může přenášet energie na hodně velké vzdálenosti. Atomy a molekuly jsou ionizovány absorpcí fotonů. Jedná se například o ultrafialové, rentgenového nebo gamma záření. Další ze způsobů ionizace je ionizace tepelná. Tento jev se uplatňuje v plynném prostředí s velkou teplotou, kde díky vysoké teplotě je částicím přidělena vysoká energie. Následně pak částice reagují mezi sebou a vyráží ze sebe elektrony a vznikají kladné a záporné ionty. Za zmínku stojí také ionizace povrchová. Tento jev se uplatňuje na hrotech elektrod, ze kterých jsou uvolňovány elektrony do plazmatu. K tomuto jevu může dojít, pokud je elektrodám dodána určitá energie. Například ve formě tepla, protože elektrody jsou průchodem proudu hodně zahřívány. Samotné částice plazmatu s vysokou energií pak mohou také vyrážet elektrony z elektrod po dopadu na ně.

1.5.2 Teplota plazmatu

Podle teploty plazmatu rozlišujeme plazma vysokoteplotní a nízkoteplotní. Teplota plazmatu závisí hlavně na stupni ionizace částic. [13] Plazma může mít teplotu elektronů mnohonásobně vyšší, než je teplota kladných iontů a neutrálních molekul plynného prostředí. Zvláštním případem je vysokoteplotní plazma. Tento jev se vyskytuje hlavně ve hvězdách nebo při řízené termionizaci syntéze. V těchto případech je energie částic větší než 100 eV, což je teplota řádově 10^6 K. Nízkoteplotní plazma se vyskytuje například v zářivkách, výbojkách a elektrických obloucích. Teplota záleží také na tlaku prostředí, čím je tlak prostředí vyšší, tím rychleji dochází k ionizaci a teplota roste. Částečně ionizované a tedy nízkoteplotní plazma má energii nabitých částic zhruba 0,5 – 10 eV. Což odpovídá teplotě kolem 10^3 K. [12]

1.6 Elektrické výboje

Elektrický výboj využívá plazmatu k tomu, aby si vytvořil dráhu mezi elektrodami v nevodivém prostředí. Plazma obsahuje volné elektrony, kladné i záporné ionty, proto je elektricky vodivé a díky tomu vykazuje i určité magnetické pole. Z toho je patrné, že pohyb částic plazmatu lze ovlivnit pohybem magnetického pole kolem výboje. Například permanentním magnetem. Silové účinky pak vycházejí z Lorentzovy síly. Lorentzova síla je síla, která působí na náboj v elektromagnetickém poli. Vznik záporných iontů je způsoben přichycením elektronu na neutrální částici, při tomto ději je následně vyzářena určitá energie do okolí. Kladné ionty vznikají následkem srážek s jinými částicemi, z neutrální molekuly je vyražen elektron a částice má tedy kladnější potenciál vůči svému okolí. Kladné a záporné ionty se v plazmatu rekombinují. To znamená, že kladné a záporné ionty se opět slučují do neutrální molekuly. Popřípadě se může sloučit částice s kladným nábojem a volný elektron v plazmatu. Rekombinace je vlastně opačný děj ionizace. [12]

Existuje mnoho druhů elektrických výbojů, základní dělení je pak následovné:

- Nesamostatné výboje – pro ionizaci částic v prostoru elektrod potřebují cizí zdroj. Například RTG zářič, nebo je potřeba cizího zdroje elektronů u katody, které jsou následně urychlovány směrem k anodě.
- Samostatné výboje – pro vytvoření plazmy stačí jen napětí mezi elektrodami

1.6.1 Závislost elektrického výboje na napětí

Při normálním tlaku vzduchu je potřeba velké intenzity elektrického pole, řádově asi 10^6 V/m pro vznik nárazové ionizace. Z hlediska charakteristiky výboje v závislosti na pracovním napětí můžeme rozdělit elektrické výboje na několik stupňů. První stupeň je tzv. tichý výboj. Tichý výboj, někdy se nazývá též Townsendův, se projevuje většinou světélkováním plynu a slabým šuměním na elektrodách. V blízkosti hrotů je v důsledku jejich tvaru velká intenzita elektrického pole. Ta pak vede k vytvoření výboje důsledkem nárazové ionizace. Tento typ výboje není sám o sobě stabilní a jedná se tedy o nestabilní výboj. Zvláštním typem tichého výboje je koróna. Nazývá se tak výboj, který se vytvoří ve velmi

silném, ale zároveň nehomogenním elektrickém poli. Stejně jako Townsendův výboj se korona vytvoří v oblasti elektrod a projevuje se prskáním a syčením. Proud je veden ionty kolem elektrody. Napětí je o několik řádů větší, než při Townsendově výboji. [15]

Dalším typem výboje jsou tzv. jiskrové výboje. Při tomto typu výboje už intenzita elektrického pole dosáhne hodnot potřebných k lavinové ionizaci plynu, dojde k jeho elektrickému průrazu a přenesení proudu na druhou elektrodu. Pořád se však jedná o výboj nestálý, jelikož zdroj není schopen dodávat trvale elektrický proud. Výboj trvá krátkou dobu a jeho teplota je vysoká. Jak už je z názvu patrné jedná se tedy o jiskry přeskakující z jedné elektrody na druhou. Tento jev je doprovázen charakteristickým prasknutím pokaždé, když dojde k průrazu dielektrika. Pro názornost si můžeme představit například blesk. Blesk je také jiskrový výboj s obrovskou intenzitou elektrického pole, řádově až 10^9 V. Je při něm přeneseno obrovské množství energie, avšak pouze rázově, protože zdroj nedokáže udržet stabilní vysoké napětí. V praxi se používá jiskrových výbojů například v elektrojiskrovém nebo elektroerozivním obrábění. [15][16]

Následujícím typem výboje je výboj obloukový. V tomto případě se už jedná o výboj stálý. Mezi oběma elektrodami se vytvoří vrstva silně ionizovaného vzduchu. Částice vzduchu jsou ionizovány díky vysoké teplotě prostředí. Elektricky nabitě částice, které se vlivem vysoké teploty pohybují rychle, jsou dále urychlovány elektrickým polem a svou energii dále předávají ostatním částicím prostředí v důsledku nárazové ionizace. Uplatňuje se zde i povrchová ionizace. Rozžhavená anoda emituje do prostředí další elektrony a částice uhlíku. Proto se hroty elektrod opotřebovávají. Anoda kvůli odprašování vlastních částic a katoda kvůli vlivu dopadajících částic prostředí, fungujícím jako nosiče proudu. Zajímavá vlastnost obloukového výboje je jeho klesající voltampérová charakteristika. Při zvyšujícím se proudem roste teplota prostředí, to má za následek zvýšení stupně ionizace a dosažení lepšího plazmatu a tím pádem i elektrické vodivosti a menšího odporu prostředí. Proti doutnavému výboji se výboj obloukový liší tím, že má vyšší proudovou hustotu a rozžhavené elektrody.

Posledním typem výboje je výboj doutnavý. Jedná se také o výboj stálý. Doutnavý výboj vzniká v prostředích s nižším tlakem, kde lze dosáhnout výboje mnohem nižším napětím, než při normálním tlaku. Ionty prostředí mají větší volnou dráhu a získávají tak kinetickou energii potřebnou k ionizaci nárazem. V praxi se tento druh výboje využívá například ve výbojkách a jeho charakteristickým rysem je světlo vycházející z výboje. Jeho barva a charakter závisí na použitém plynu. [15][16]

2 Návrh plazmového reproduktoru

V následující kapitole je popsán návrh plazmového reproduktoru. Je zde uvedeno blokové schéma a popsány jeho jednotlivé části a jejich funkce.

2.1 Blokové schéma

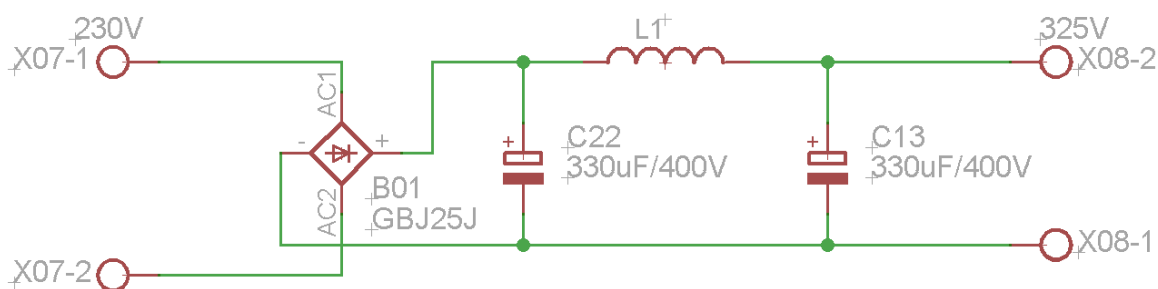
Na obrázku č.4 je zobrazeno jednoduché blokové schéma plazmového reproduktoru.



Obrázek 4: Blokové schéma plazmového reproduktoru

2.1.1 Zdroj napájecího napětí

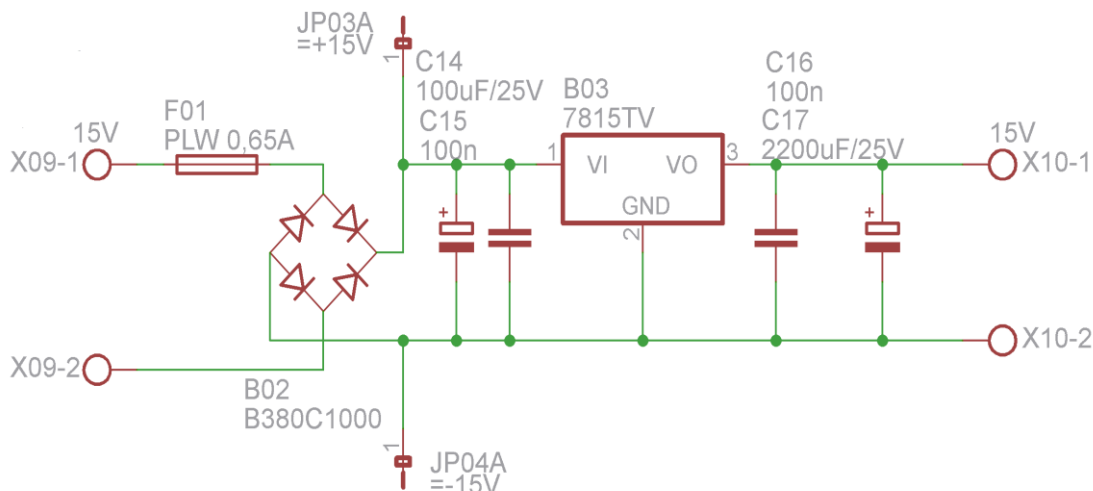
Pro napájení zařízení je použito síťové napětí. Pro výkonovou část je zapojení následovné. Na vstupu je zařazen odrušovací filtr pro odfiltrování vysokofrekvenčního rušení. Za ním je pak zařazen usměrňovací můstek, který zajišťuje dvojcestné usměrnění napájecího napětí. Za můstkem je zařazen CLC filtr pro odfiltrování zvlnění. Filtr je složen z kondenzátorů s hodnotou $330\ \mu\text{F}$ a je dimenzován na napětí 400 V. Za kondenzátorem je umístěna tlumivka, v návrhu je použita tlumivka z počítačového zdroje. Následuje zase paralelně řazený kondenzátor se stejným parametrem jako první kondenzátor. Zapojení bez transformátoru je znázorněno na schématu. Po usměrnění můstkem má výsledné stejnosměrné napětí velikost 325 V.



Obrázek 5: Usměrňovač pro napájení výkonové části

Pro signálovou část je použito obdenného zapojení. Transformátor snižuje síťové napětí na 15 V. Po usměrnění to znamená stejnosměrné napětí přibližně 19 V. Za transformátorem je zařazen stabilizátor. Stabilizátor slouží ke stabilizaci napětí, které napájí integrovaný obvod TL 594 a budič IR 2110.[21] Tento stabilizátor stabilizuje napětí na 15 V. Paralelně k výstupu i vstupu jsou umístěny dva keramické kondenzátory na odfiltrování vysokofrekvenčního rušení a dva elektrolytické pro vyhlazení výstupního napětí. Toto napětí je dále přiváděno na budič, kterým je buzena výkonová část zařízení. Použití budiče je nutné,

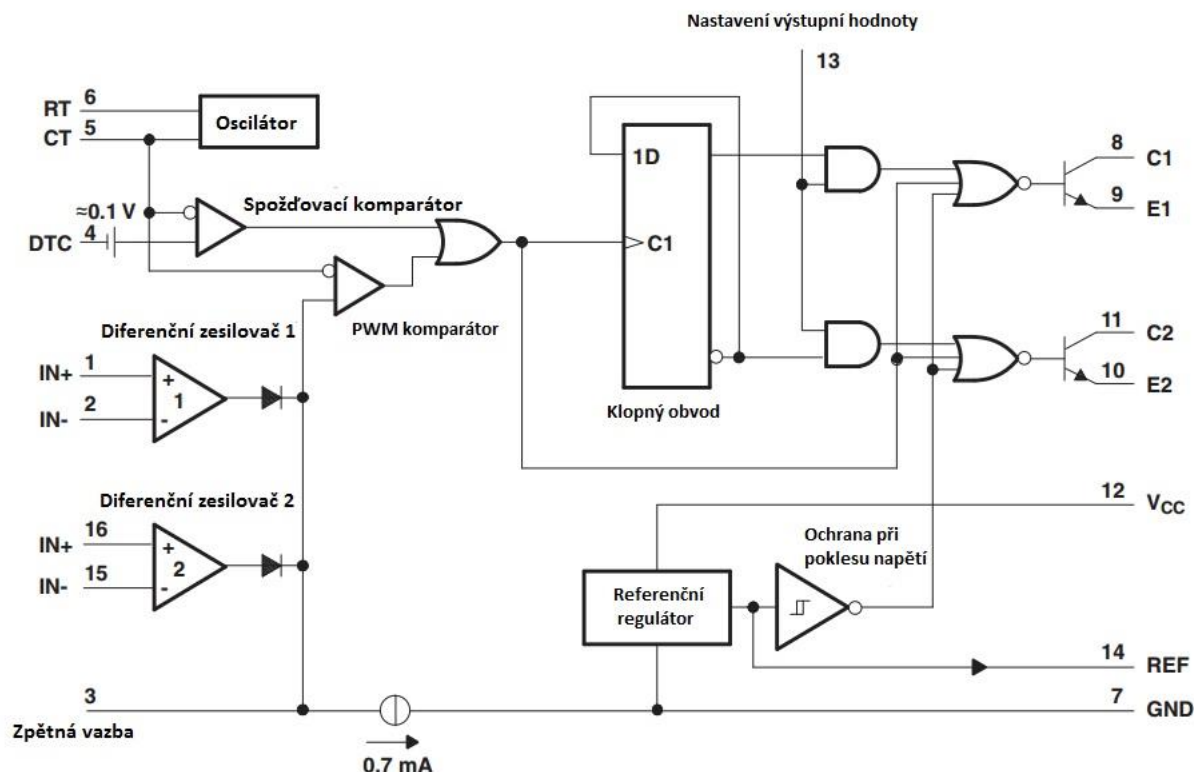
protože výstup z integrovaného obvodu TL 594 je pouze 5 V. Pro správné otevření hradla tranzistoru IRF 540 a zajištění jeho správné funkce, kompromisem mezi vodivostními a spínacími ztrátami, je potřeba alespoň 15 V. Z tohoto důvodu je do obvodu zařazen budič IR2110. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 6.



Obrázek 6: Napájení pro budič a signálovou část

2.1.2 Pulzní šířková modulace

Pro modulaci signálu je použit obvod TL 594 [18], vnitřní zapojení je znázorněno na obr. 8. Jeho funkce je následovná. Potenciometr P_1 znázorněný ve schématu slouží k nastavování střídy samotné pulzní šířkové modulace. Vstupní audio signál je připojen přes kondenzátor a odporový dělič do vstupu IN-. Vstup IN- je následně přiveden na komparátor. Vstup komparátoru IN+ je připojen na referenční kondenzátor, který je nabitý na hodnotu, která je regulována potenciometrem P_1 . Pokud je vstupní napětí větší, než napětí na referenčním kondenzátoru je výstupem logická 1. Modulace výstupních pulzů je provedena komparací pilového signálu, který je vytvářen interním oscilátorem, se signálem ze vstupního komparátoru. Výstupní stupeň je uvolněn, když napětí pily na svorce 5 je menší, než napětí řídicího signálu. Frekvence signálu je řízena pomocí RC oscilátoru v obvodu. Frekvence obvodu je nastavitelná jednoduchým způsobem. Ke vstupu CT je připojen kondenzátor C_4 . Vstup RT je uzemněn přes potenciometr P_2 a odpor R_3 . Odpor R_3 je umístěn za potenciometrem, z důvodu znemožnění nastavení nulové hodnoty odporu. Signál z TL 594 je přiveden na budící obvod IR2110. Konkrétněji je signál připojen na vstup LIN budiče. Tento signál je v následujícím kroku zpracován a přiveden přes vnitřní zapojení budiče na kombinaci dvou tranzistorů MOSFET. Po příchodu kladného signálu z TL 594 je následně otevřen horní tranzistor a na výstup LO je přivedeno napájecí napětí, které činí 15 V. Opačný případ nastane po skončení impulzu. V tomto případě je otevřen spodní tranzistor a na výstup je přiveden potenciál země.



Obrázek 7: Vnitřní zapojení integrovaného obvodu TL 594[19]

Změnou hodnoty odporu potenciometru dojde i ke změně frekvence oscilací podle rovnice:

$$\tau = RC \quad (2.1)$$

V návrhu jsou použity součástky: $R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$, $C_4 = 2,2 \text{ nF}$, $P_1 = 10 \text{ k}\Omega$

Po provedení výpočtů podle výše uvedeného vzorce je tedy patrné, že zapojení s těmito součástkami poskytuje frekvenční rozsah signálu od frekvence f_{min} po f_{max} .

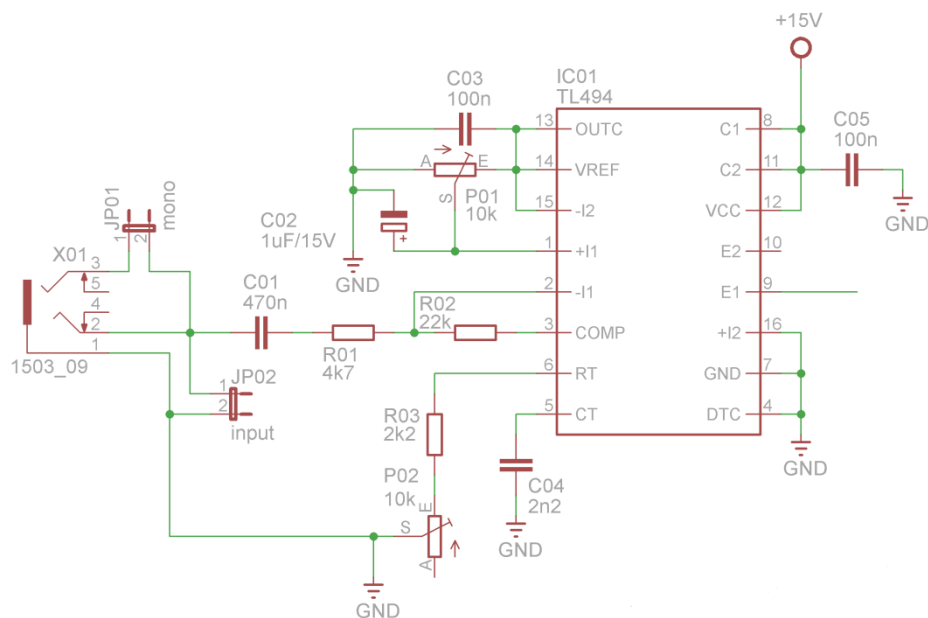
$$f_{max} = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC} = \frac{1}{2,2 * 10^{-9} * 2200} = 206,6 \text{ kHz} \quad (2.2)$$

$$f_{min} = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC} = \frac{1}{2,2 * 10^{-9} * (2200 + 10000)} = 37,3 \text{ kHz} \quad (2.3)$$

Výstupem je tedy modulovaný signál, jehož frekvence je nastavována potenciometrem P_2 a jeho střída potenciometrem P_1 . Tímto signálem je následně řízen budič IR 2110, který budí tranzistor IRF540. [22] Ten je ovládán v impulzy, které přicházejí z budiče a následně budí toroidní transformátor pro řízení hradel výkonových tranzistorů

SiHG33N60E-E3. Tento transformátor má tři vinutí, každé má 14 závitů. Je třeba dát pozor na začátky a konce jednotlivých vinutí, aby byla zajištěna správná polarita řídicích signálů. Po příchodu signálu z budiče jsou skrze transformátor otevírány a zavírány výkonové tranzistory, kterými je řízeno primární vinutí vysokonapěťového transformátoru. [18]

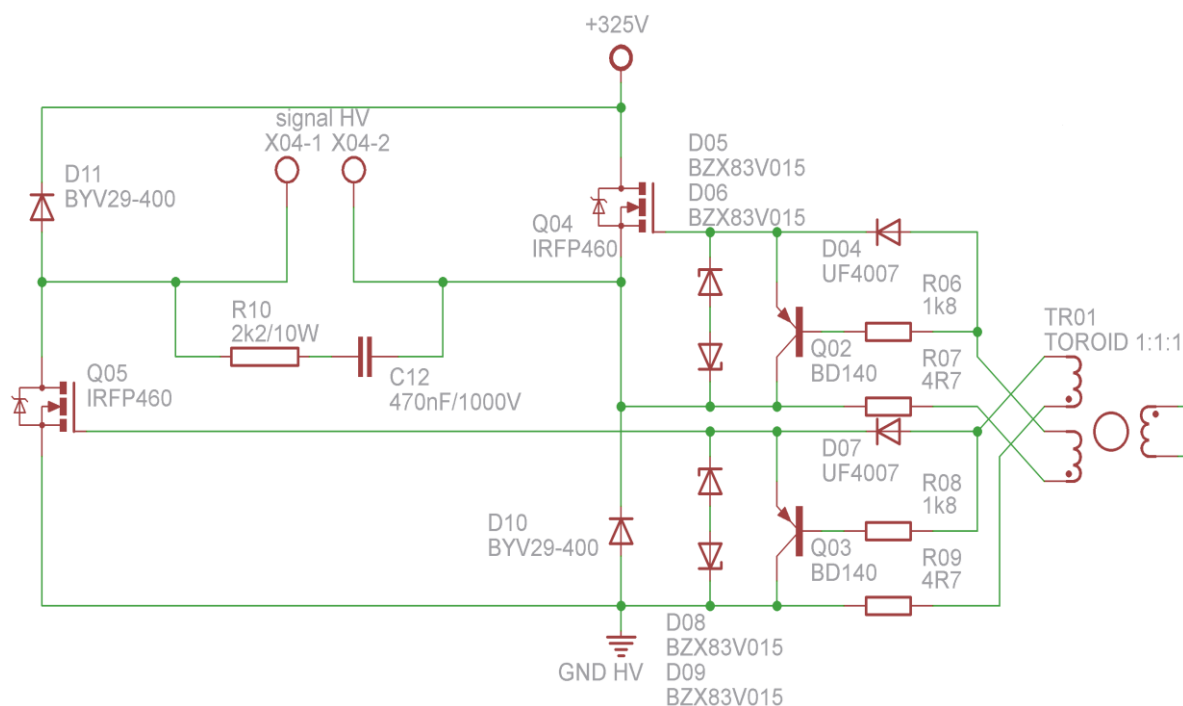
Další variantou návrhu je možnost použití integrovaného obvodu SG 3525 [20]. Tento obvod na rozdíl od TL 594 neimplementuje pulzní šířkovou modulaci, ale pulzní frekvenční modulaci. Výhodou tohoto zapojení je absence budiče, který není potřeba, protože výstupem SG 3525 je dostatečně velké napětí potřebné k otevření budícího tranzistoru IRF540. Nevýhodou je však to, že na rozdíl od pulzní šířkové modulace, nelze nastavovat střídu signálu, lze měnit pouze kmitočet, přičemž zůstává zachována střída signálu 50%. To znamená, že nelze regulovat výkon obvodu. Střída je zbytečně velká a přetěžuje vysokonapěťový transformátor. Zapojení s SG 3525 má však ještě jednu výhodu proti TL 594. Obvod TL 594 se může dostat do problémů v případě, že audio signál má příliš velkou amplitudu. V takovém případě má vygenerovaný pulz příliš velkou délku a transformátor se před příchodem následujícího pulzu nestihne demagnetizovat. To má za následek přesycení jádra, tranzistory se budou spínat do zkratu a tím může dojít k jejich zničení. Naopak, pokud je pulz příliš krátký, transformátor nestihne zareagovat a tón není vůbec přehrán. Tento jev způsobuje značnou degeneraci zvuku ve výsledném obvodu. Obvod SG 3525 tímto problémem netrpí, protože jeho střída je nastavena konstantně na 50 % a moduluje se pouze frekvence signálu, takže transformátor se stihne demagnetizovat při jakémkoliv signálu. Při návrhu plazmového reproduktoru byl použit integrovaný obvod TL 594 z důvodu možnosti nastavení střídy, a s tím související regulace výkonu obvodu. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku č.8.



Obrázek 8: Schéma zapojení obvodu s TL 594

2.1.3 Měnič

Schéma měniče s toroidním transformátorem pro otevření výkonových tranzistorů je znázorněno na obrázku č.9. Jedná se o jednočinný propustný měnič o jednom směru proudu a dvou polaritách napětí. Pokud je přiveden z budiče kladný pulz, výkonové tranzistory Q_5 a Q_4 se otevřou a obvodem začne protékat proud. Po skončení impulsu se otevřou tranzistory Q_2 a Q_3 , které uzavřou tranzistory Q_5 a Q_4 . Cívka se přepóluje, následkem toho začne dodávat svou energii zpět do zdroje. Na primárním vinutí je umístěn RC člen, který je dimenzován tak, aby zachytil napěťové špičky obvodu při demagnetizaci transformátoru. Rezistor RC členu omezuje strmost proudu a kondenzátor pohlcuje napěťové špičky vzniklé komutací proudu mezi tranzistorem a diodou. Poté se otevřou diody D_{10} a D_{11} a proud teče zpět do zdrojové části, kde nabíjí kondenzátory CLC filtru. Pro spínání výkonové části obvodu jsou použity výkonové tranzistory SiHG33N60E-E3. Maximální napětí $U_{DS}= 600\text{ V}$, $U_{GS}= \pm 20\text{ V}$. [18] Použité výkonové diody jsou extra rychlé diody C3D04060F [23] s nízkou dobou zotavení, závěrným napětím až 600 V a maximálním proudem diodou 6 A . Paralelně k tranzistorům Q_2 a Q_3 jsou připojeny dvě Zenerovy diody v sériovém zapojení. Diody v tomto zapojení fungují tak, aby pokryly napěťové špičky budícího obvodu, které by mohly vzniknout při chybových stavech. Chrání tak výkonové tranzistory vůči průrazu a limitují jejich ovládací napětí na 15 V . Pro řízení výkonových tranzistorů je nutné použití dvou vinutí toroidního transformátoru. Tranzistor Q_4 je totiž na jiném potenciálu než tranzistor Q_5 a tudíž by docházelo k chybovým stavům při zavírání tranzistoru. Z tohoto důvodu jsou v zapojení použita dvě vinutí a tranzistor Q_4 je zavírán pomocí plovoucího uzemnění. [17]



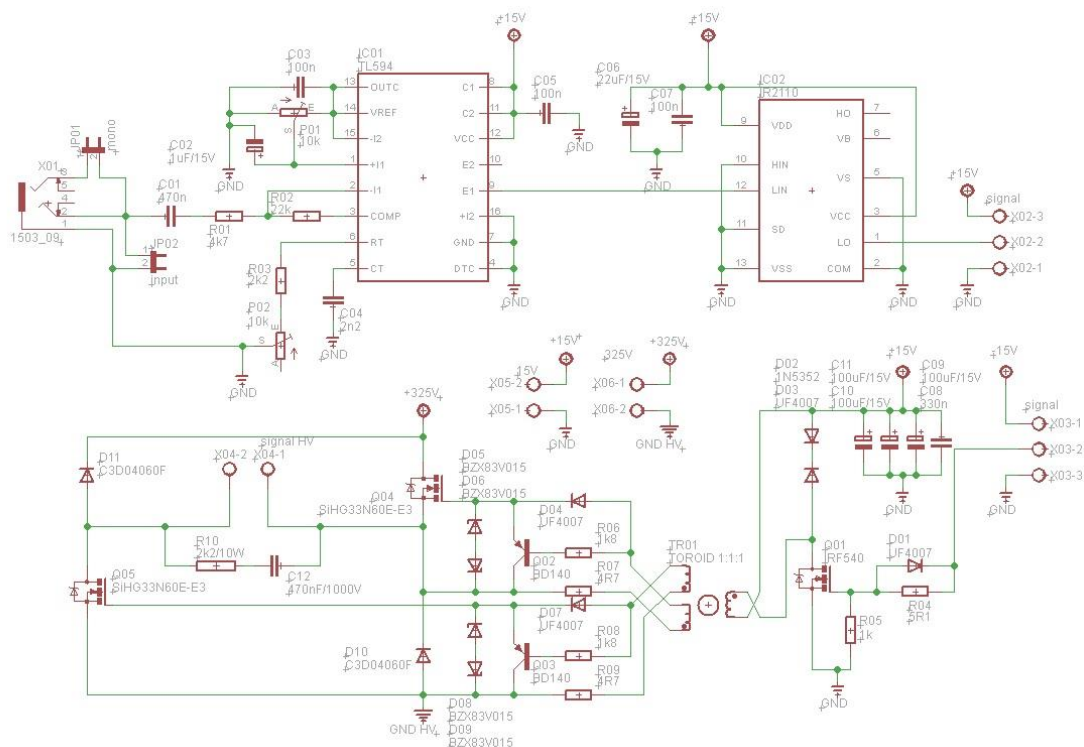
Obrázek 9: Schéma výkonového měniče s toroidním transformátorem[17]

2.1.4 Vysokonapětový transformátor

Použitý transformátor je určen k použití v barevných televizorech. Z transformátoru byl odstraněn externí násobič napětí s usměrňovací diodou a vyhlazovacím kondenzátorem, které zanáší do výsledného signálu značné rušení, tudíž je patrné, že výboj na sekundárním vinutí je střídavý a poskytuje tak lepší kvalitu zvuku, než výboj stejnosměrný. Primární vinutí transformátoru je navinuté vodičem na externím jádru, protože je složité najít původní primární vinutí. Na primárním vinutí je navinuto 40 závitů. Elektrodotový systém je zhotoven z kovových elektrod, které však podléhají elektroerozi. Anoda je odprašována z důvodu ionizace kovu, katoda je naopak bombardována ionizovanými částicemi. Výsledkem je znehodnocení těchto elektrod. Anoda se s postupem času tvaruje do špičky a na katodě naopak vzniká kráter. Tudíž je žádoucí použití, hrotů vytvořených z takových materiálů, které budou těmto procesům odolávat, nebo je alespoň zmírní na minimum. Při konstrukci reproduktoru byly použity wolframové elektrody, které mají vysokou teplotní odolnost a zanáší do výsledného zvukového signálu minimální rušení.

2.1.5 Shrnutí

Výše popsané bloky tvoří dohromady celé zapojení plazmového reproduktoru. Jeho kompletní schéma je uvedeno na obr. 11. V tomto schématu není zahrnuta zdrojová napájecí část, která je popsána v kapitole 2.1.1. Zařízení je doplněno o kondenzátorovou banku, která je vidět na obrázku č.10. Kondenzátorová banka umístěná před toroidním transformátorem řídícím hradlo tranzistoru MOS, slouží k proudovému posílení při otevření řídicího tranzistoru IRF 540.



Obrázek 10: Schéma celého obvodu

3 Dimenzování součástek

Jedná se o jednočinný propustný měnič o jednom směru proudu a dvou polaritách napětí. Měnič je schopný přenášet velké i malé výkony. V tomto zapojení slouží tento měnič pro ovládání primárního vinutí transformátoru, na jehož sekundárním vinutí je výboj, který produkuje zvuk. Měnič pracuje s usměrněným síťovým napětím, tedy 325 V. Jedná se o vysoké napětí, tudíž je zapotřebí správné dimenzování součástek. Z tohoto důvodu jsou zvoleny tranzistory i diody schopné pracovat s napětím až 600 V, aby nemohlo dojít k jejich přetížení. Měnič je složen ze dvou výkonových tranzistorů SiHG33N60E-E3 a dvou rychlých Schottkyho diod C3D04060F. Pro omezení ztrát při spínání je důležitá parazitní kapacita hradla, kterou je potřeba nabíjet a vybíjet při každém sepnutí tranzistoru. Tato kapacita je nejvíce ovlivněna velikostí oxidové vrstvy pod hradlem. Cílem je tedy výběr tranzistoru s co nejmenší parazitní kapacitou. Svou roli hrají také ostatní parazitní kapacity. Zvolený tranzistor od firmy Vishay má kapacitu hradla 136 pF. S tím souvisí také rychlá doba sepnutí a vypnutí tranzistoru. Další velmi důležitou hodnotou při výběru tranzistoru je jeho odpor při sepnutém stavu. Cílem je, aby ztrátový výkon tranzistoru byl co nejmenší, tudíž je žádoucí co nejnižší hodnota odporu. Maximální hodnota tohoto odporu je pouhých 99 mΩ, což zajišťuje velmi malý výkon ztracený v pouzdru tranzistoru a tak i potřeba menších chladičů. Všechny údaje jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka č.1: Hodnoty výkonového tranzistoru SiHG33N60E-E3 z katalogového listu

$R_{DS(on)MAX}$	0,099 Ω
$t_{d(on)MAX}$	56 ns
$t_{d(off)MAX}$	150 ns
V_{DS}	600V
$I_{D(25^{\circ}C)}$	33 A
C_o	136 pF

3.1 Výpočet ztrátového výkonu

Maximální hodnota střídy nastavitelná integrovaným obvodem TL 594 je 0,45. Maximální proud, který při sepnutém stavu protéká obvodem je $I_D = 0,5$ A. Je možno tedy vypočítat maximální efektivní hodnotu proudu protékajícího obvodem.

$$I_{ef} = I_D \cdot s = 0,5 \cdot 0,45 = 0,225 \text{ mA} \quad (3.1)$$

Hodnota ztrátového výkonu na tranzistoru při sepnutém stavu je závislá na vnitřním odporu.

$$P_{ztr} = R_{DS(on)} \cdot I_{ef}^2 = 0,099 \cdot 0,225^2 = 6,437 \text{ mW} \quad (3.2)$$

3.2 Ztráty přepínáním

Přepínací ztráty při spínání a vypínání tranzistorů jsou závislé na parazitních kapacitách, které je potřeba nabít či vybit, pro vytvoření vodivého kanálu mezi Drainem a Sourcem. V katalogovém listu od výrobce jsou uvedeny typické hodnoty času při zapínání a vypínání tranzistoru.

Ztráty při vypínání:

$$W_{off} = \frac{1}{4} \cdot U_D \cdot I_Z \cdot t_{off} = \frac{1}{4} \cdot 325 \cdot 0,5 \cdot 150 \cdot 10^{-9} = 6,094 \mu W \quad (3.3)$$

Ztráty při zapínání:

$$W_{on} = \frac{1}{4} \cdot U_D \cdot I_Z \cdot t_{on} = \frac{1}{4} \cdot 325 \cdot 0,5 \cdot 56 \cdot 10^{-9} = 2,275 \mu W \quad (3.4)$$

Celkové ztráty přepínáním jsou závislé na frekvenci signálu, kterým je měnič spínán. Spínací frekvence je nastavena na 50 kHz.

$$P_{př} = (W_{on} + W_{off}) \cdot f = (6,094 \cdot 10^{-6} + 2,275 \cdot 10^{-6}) \cdot 50 \cdot 10^3 = 0,305 W \quad (3.5)$$

Celkové ztráty:

$$P_C = P_{ztr} + P_{př} = 0,006437 + 0,305 = 0,311 W \quad (3.6)$$

Požadavky na diody jsou velmi podobné jako u tranzistoru. Především je potřeba dbát na jejich rychlost, aby byly schopné rychle reagovat na změny polarity cívky při demagnetizačním ději a při opětovném příchodu kladného impulsu z budiče. Použité diody jsou C3D04060F od firmy Cree. Jsou dimenzovány taktéž na napětí až 600 V. Další charakteristické vlastnosti diod jsou uvedeny v tabulce č.2.

Tabulka č.2: Hodnoty ultrarychlé C3D04060F diody z katalogového listu

V_{RRM}	600 V
I_{FRM}	21 A
Q_C	8,5 nC
C	22 pF
I_F	4 A

Dimenzování součástek je dostatečné, protože provozní hodnoty součástek jsou mnohem vyšší, než pracovní parametry reálného obvodu. Vzhledem k tomu, že výstupní transformátor pracuje na síťové napětí, bude reálná hodnota proudu obvodem menší, než na kterou jsou součástky dimenzovány. Přesněji, změřená hodnota odebíraného proudu při zatížení byla pouhých 250 mA. Hodnota proudu protékajícího obvodem je závislá na nastavení velikosti střídavy integrovaným obvodem TL 594. Nejlepší řešení a výslednou

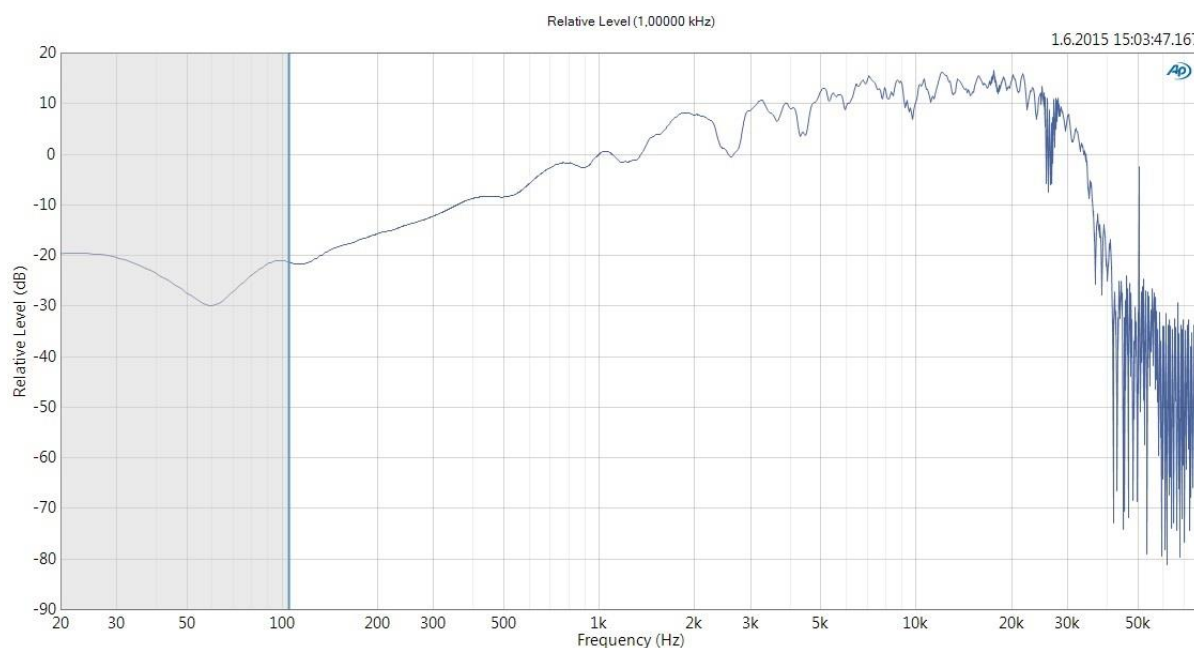
kvalitu zvuku poskytuje nastavení střídy na 0,25. Toto nastavení zajišťuje správnou činnost obvodu, kdy při příchodu velkého impulzu nemůže hodnota střídy dosáhnout maxima. Naopak při příchodu slabého impulzu je střída dostatečně velká na to, aby byly otevřeny výkonové tranzistory a vysokonapěťový transformátor stihl zareagovat i na takto malý impulz.

4 Měření plazmového reproduktoru

Pro ověření správnosti návrhu a charakteristiky plazmového reproduktoru je potřeba provést měření jeho parametrů. Toto měření bylo prováděno na ústavu telekomunikací v bezodrazové komoře. Plazmový reproduktor nemá žádné mechanické části, tudíž jimi není limitován. Z tohoto důvodu je toto zařízení schopno přehrávat vyšší frekvence než obyčejné reproduktory.

4.1 Měření frekvenční charakteristiky

Vzhledem k širokému frekvenčnímu spektru plazmového reproduktoru je nejvíce žádoucí charakteristika frekvenční. Charakteristika je zobrazena na obrázku č.11.



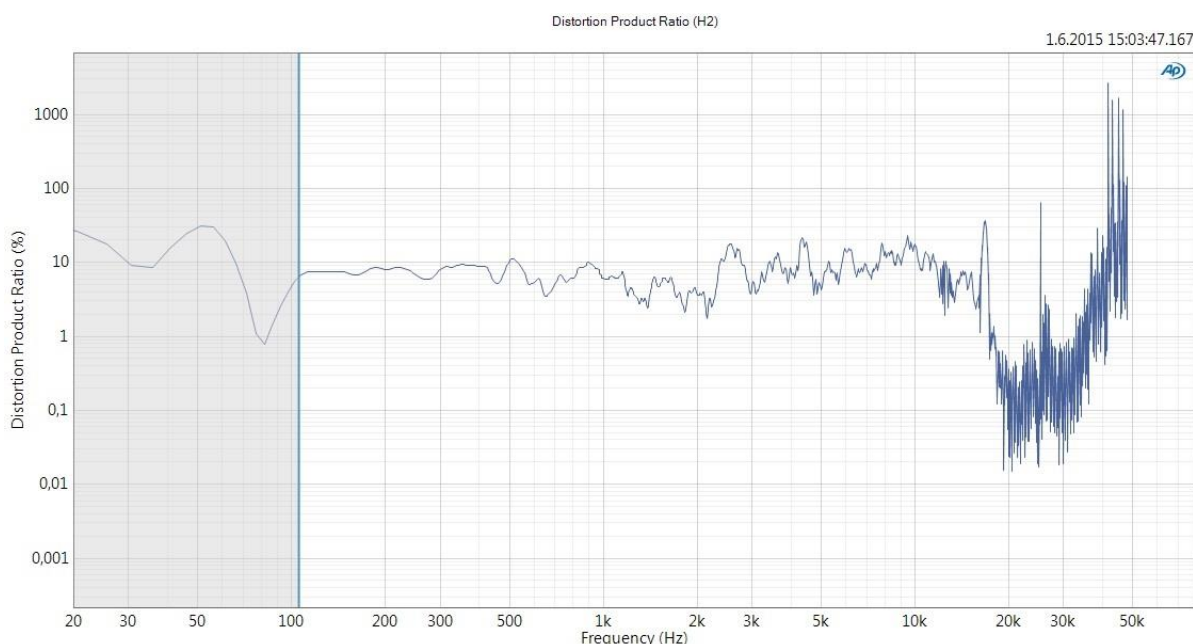
Obrázek 11: Frekvenční charakteristika plazmového reproduktoru

Frekvenční charakteristika byla měřena od frekvence 100 Hz. Tóny pod 100 Hz není schopen plazmový reproduktor přehrát z důvodu tepelné kapacity vzduchu kolem výboje. Jinými slovy výboj se nestihne v daném časovém úseku ochladit takovou rychlostí, aby zahrál požadovanou frekvenci. Navíc tóny pod 100 Hz jsou pohlceny stěnami komory, proto bylo měření realizováno až od frekvence 100 Hz. Plazmové reproduktory se používají jako výškové reproduktory. Tomuto očekávání odpovídá také změřená charakteristika. Nejlepších charakteristik dosahuje tento reproduktor v pásmu 2 – 30 kHz. Teoreticky je schopný tento reproduktor produkovat frekvence i vyšší. Avšak limitace a strmý spád charakteristiky, který

je vidět od frekvence 32 kHz a dále je způsobem návrhem přístroje. Vzorkovací frekvence PWM signálu je nastavena na 50 kHz. Od frekvence 25 kHz a výše už tedy není splněna vzorkovací podmínka, že vzorkovací signál musí mít alespoň dvakrát vyšší frekvenci než přehrávaný audio signál. Z tohoto důvodu dochází při vyšších frekvencích k degeneraci signálu, jelikož integrovaný obvod TL 594 přestává zvládat vzorkování audio signálu. Na frekvenci 50 kHz je vidět strmý nárůst v charakteristice právě při této vzorkovací frekvenci.

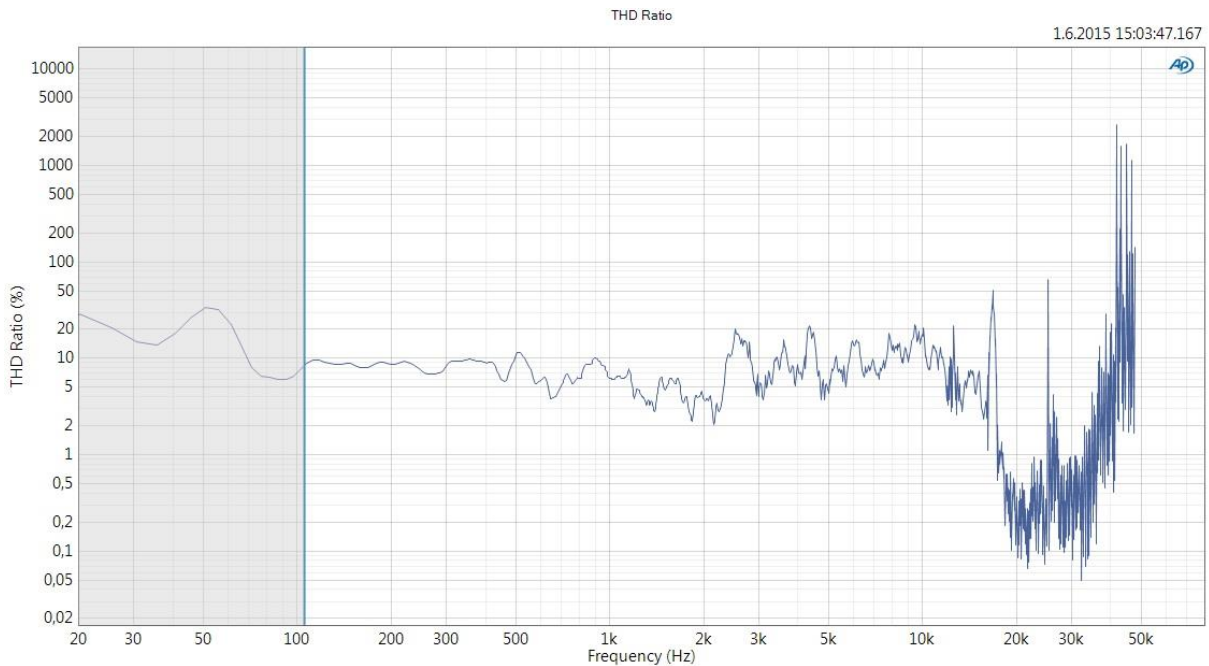
4.2 Měření harmonického zkreslení THD

V tomto měření byl ověřován vliv harmonického zkreslení na přehrávaný signál. Jedná se o poměr součtu výkonů všech harmonických složek oproti základní harmonické.[24] Největší vliv na toto zkreslení měla druhá harmonická složka. Její průběh je doložen na obrázku č. 12.



Obrázek 12: Zkreslení druhé harmonické složky signálu

Jak je z charakteristiky patrné, zkreslení při přehrávání frekvencí nad 20 kHz je značné. Zde se také projevuje limitace obvodu vzorkovací frekvencí jako v předešlé charakteristice. Nicméně na vyšších frekvencích není už lidské ucho schopno toto zkreslení zaznamenat. Při analýze zkreslení je žádoucí spíše zkreslení nižšími harmonickými složkami než složkami vyššími. Při splnění tohoto předpokladu je přehrávaný zvuk věrohodnější.[24] Charakteristika na obrázku č.13 zobrazuje celkové harmonické zkreslení, na kterém se podílí všechny harmonické složky signálu.

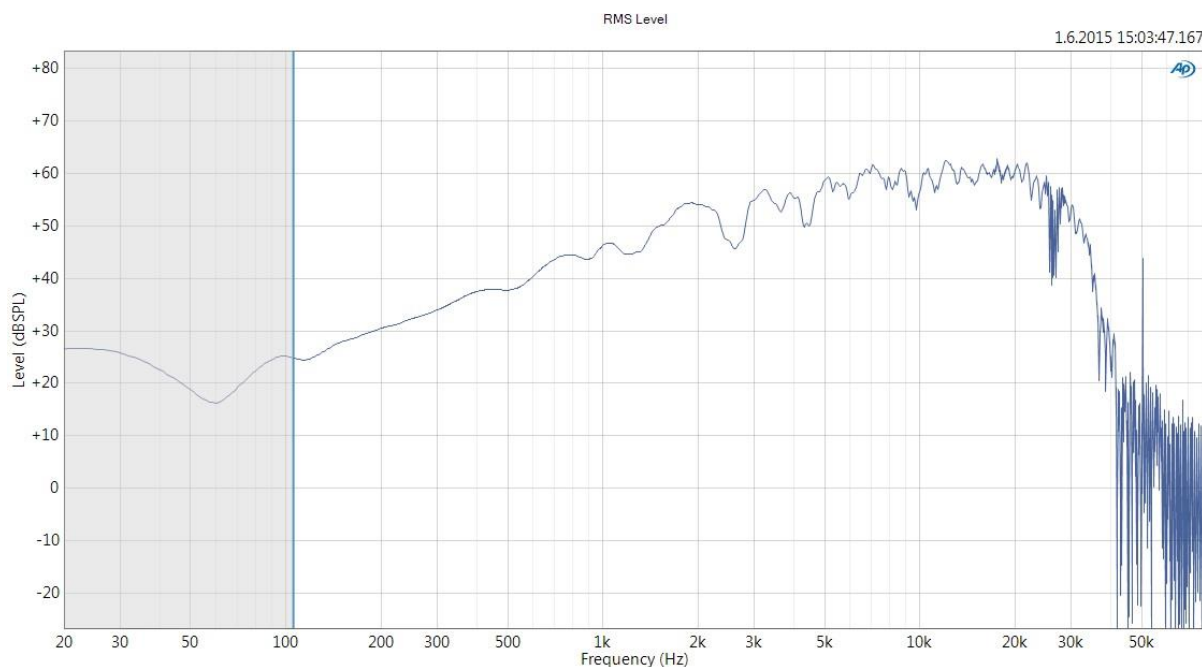


Obrázek 13: Celkové harmonické zkreslení

Z tohoto měření vyplývá, že celkové harmonické zkreslení ve slyšitelném spektru signálu je kolem 10%. Vliv tohoto zkreslení byl částečně potlačen umístěním síťového odrušovacího filtru před obvod zdrojové části. V případě plazmového reproduktoru je zkreslení signálu způsobeno převážně činností samotného výboje a tedy i činností demagnetizace transformátoru. Pro potlačení tohoto rušení byl paralelně k primárnímu vinutí transformátoru umístěn RC člen pro potlačení napěťových a proudových špiček při demagnetizaci cívky zpět do části CLC filtru. Nicméně činnost tohoto RC členu není dokonalá a ten nedokáže pokrýt veškeré zákmity, které zde vznikají. To se poté projeví jako zkreslení výsledného signálu. Dalším důvodem zkreslení signálu je také samotný výboj, který reaguje na přehrávané frekvence a vlní se. Tato činnost zanáší taktéž do výsledného zvuku rušení.

4.3 Měření charakteristické citlivosti plazmového reproduktoru

Tento parametr je jeden z nejdůležitějších při návrhu reproduktoru. Jedná se o závislost akustického tlaku generovaného výbojem na přehrávané frekvenci. Naměřená charakteristika je zobrazena na obrázku č.14. Z této charakteristiky můžeme odečíst průměrnou hodnotu charakteristické citlivosti reproduktoru, která je tímto stanovena na 50 dB, ve slyšitelném spektru signálu. Signály na vyšších frekvencích jsou opět značně zkresleny.



Obrázek 14: Charakteristická citlivost plazmového reproduktoru

Měření probíhalo v uzavřené bezodrazové komoře. Mikrofon byl vzdálen od výboje 1 metr. Jako vstup do zařízení byl použit klasický konektor jack 3,5 mm a hodnota buzení audio signálu byla 10 mV. Měření bylo provedeno na přístrojích, které jsou uvedeny v tabulce č.3.

Tabulka č.3 Přístroje použité při měření

Analyzátor	Audio precision APX 525
Mikrofon	Brüel&Kjaer type 4189-B-001
Předzesilovač	Brüel&Kjaer Nexus type 2691
Kalibrátor	Brüel&Kjaer type 4231

Závěr

Bakalářská práce se zabývá návrhem a následnou konstrukcí bezmembránového reproduktoru, který bývá označován také jako reproduktor plazmový. Byla zde rozebrána problematika výbojové činnosti, princip zařízení a způsoby optimalizace ionizace plynného prostředí obklopujícího výboj, které se používají.

Samotný návrh práce se zabýval výběrem komponent a součástí zařízení tak, aby byla dosažena co nejlepší kvalita zvuku. Jako modulace zvuku byla vybrána PWM modulace, kterou v tomto obvodu zajišťuje integrovaný obvod TL 594. Výstupem z tohoto obvodu je následně řízen budič, který otevírá výkonové tranzistory měniče, které spínají síťové napětí na primární vinutí transformátoru a řídí tak činnost samotného výboje na vinutí sekundárním. Jako měnič byl zvolen jednočinný propustný měnič o jednom směru proudu a dvou polaritách napětí. Tento měnič byl následně doplněn o RC člen, který je paralelně připojen k vysokonapětovému střídavému transformátoru a slouží pro pokrytí vysokonapětových špiček obvodu při demagnetizaci.

Cílem této práce bylo zkonstruovat výškový reproduktor, který je schopný přehrávat frekvence vyšší než konvenční reproduktory. Jak je patrné z příložených výstupů měření. Tohoto cíle bylo dosaženo. Reproduktor je schopný přehrávat kvalitně frekvence až do 30 kHz, přičemž si zachovává charakteristickou citlivost 50 dB. Při přehrávání vyšších frekvencí se projevuje určitá limitace. Ta je dána nastavením frekvence PWM signálu na 50 kHz a při vyšších frekvencích už není splněna podmínka správného vzorkování signálu. Tato frekvence však byla citlivě vyladěna tak, aby s ní dokázal výstupní vysokonapětový transformátor správně pracovat a nedocházelo k chybovým stavům. Celkové harmonické zkreslení při této činnosti je 10%. Toto zkreslení je způsobeno demagnetizací samotného transformátoru, které se nedá úplně pokrýt RC členem a zanáší zpětně do obvodu rušení. Tato topologie zapojení je však pro činnost reproduktoru nejideálnější, protože se zde neprojevuje vliv změny směru proudu, jako je tomu u jiných topologií. Vliv zkreslení byl částečně také potlačen umístěním síťového odrušovacího filtru před napájení zdrojové části. Na zkreslení se podílí také samotný výboj, který se hýbe v rytmu přehrávaného signálu. Tento efekt byl částečně snížen vhodnou volbou elektrod z wolframu, které mají ze všech kovových prvků nejvyšší bod tavení. Tudíž je schopný odolat náročným podmínkám výbojové činnosti, bez výraznějšího zkreslení signálu či odprašování elektrod.

Celkově je tedy možno konstatovat, že tento typ reproduktoru opravdu splňuje nároky, které jsou od něj požadovány. Dokáže kvalitně fungovat jako výškový reproduktor a přehrávat audiosignál o frekvenci vyšší než konvenční typ reproduktorů.

Bibliografie

- [1] Joseph, James. Flame amplification. *FLAME AMPLIFICATION AND A BETTER HI-FI LOUDSPEAKER?* [online]. POPULAR ELECTRONICS, May 1968, č. 1 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.swtpc.com/mholley/PopularElectronics/May1968/Flame_Amplification.htm
- [2] The 'Singing Arc' William Duddell, UK, 1899. *Singing arc* [online]. 2008, č. 2 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://120years.net/the-singing-arcwilliam-duddelluk1899/>
- [3] Edison tech centre. History and Types of Loudspeakers. *Speakers* [online]. 2011, č. 3 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.edisontechcenter.org/speakers.html>
- [4] RUSSEL, Roger. General history and how it works. *Ionophone loudspeaker* [online]. 2004, č. 4 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.roger-russell.com/ionovac/ionovac.htm>
- [5] Das Ionofon - ein neuartiger Lautsprecher. In: *Radiomuseum* [online]. 2009 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.radiomuseum.org/forum/telefonen_sehr_fruhe_wurzeln.html
- [6] Plasma speaker: Practical consideration. *Wikipedia* [online]. 2014, č. 6 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_speaker
- [7] MARESCH, Tony. Acapella Audio Arts Violin Loudspeakers. *Enjoy the music* [online]. 2002, [cit.2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.enjoythemusic.com/magazine/equipment/1002/acapellavoilin.htm>
- [8] SUTTON, Yvonne. *Electro-acoustic coupling in plasma gas* [online]. United Kingdom, 2011 [cit.2014-12-16]. Dostupné z: [http://acoustics.open.ac.uk/802574C70048F266/\(httpAssets\)/CA8282F72336DABF80257ADB0055D578/\\$file/yvonne_sutton_thesis.pdf](http://acoustics.open.ac.uk/802574C70048F266/(httpAssets)/CA8282F72336DABF80257ADB0055D578/$file/yvonne_sutton_thesis.pdf). Master thesis. the open university milton keynes.
- [9] SEVERINSEN, Daniel a Gourab Sen GUPTA. *Design and Evaluation of Electronic Circuit for Plasma Speaker* [online]. London, U.K, 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.iaeng.org/publication/WCE2013/WCE2013_pp1111-1116.pdf. Thesis. Proceedings of the World Congress on Engineering.
- [10] Boyleův-Mariottův zákon. *Wikipedia* [online]. 2013, č. 10 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Boyle%C5%AFv-Mariott%C5%AFv_z%C3%A1kon
- [11] KRICHTAFOVITCH, Igor A., Sergey V. KARPOV, Nels E. JEWELL-LARSEN, Jacob O. OHARAH a Vladislav A. KOROLEV. *EFA Loudspeakers* [online]. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2008, 2008 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://electrostatics.org/images/ESA_2008_A2.pdf. Thesis. Kronos Air Technologies.
- [12] PLAZMA – 4. SKUPENSTVÍ LÁTKY. *Katedry fyziky Západočeské univerzity v Plzni* [online]. č. 12 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/AFY/AFY_v2.pdf

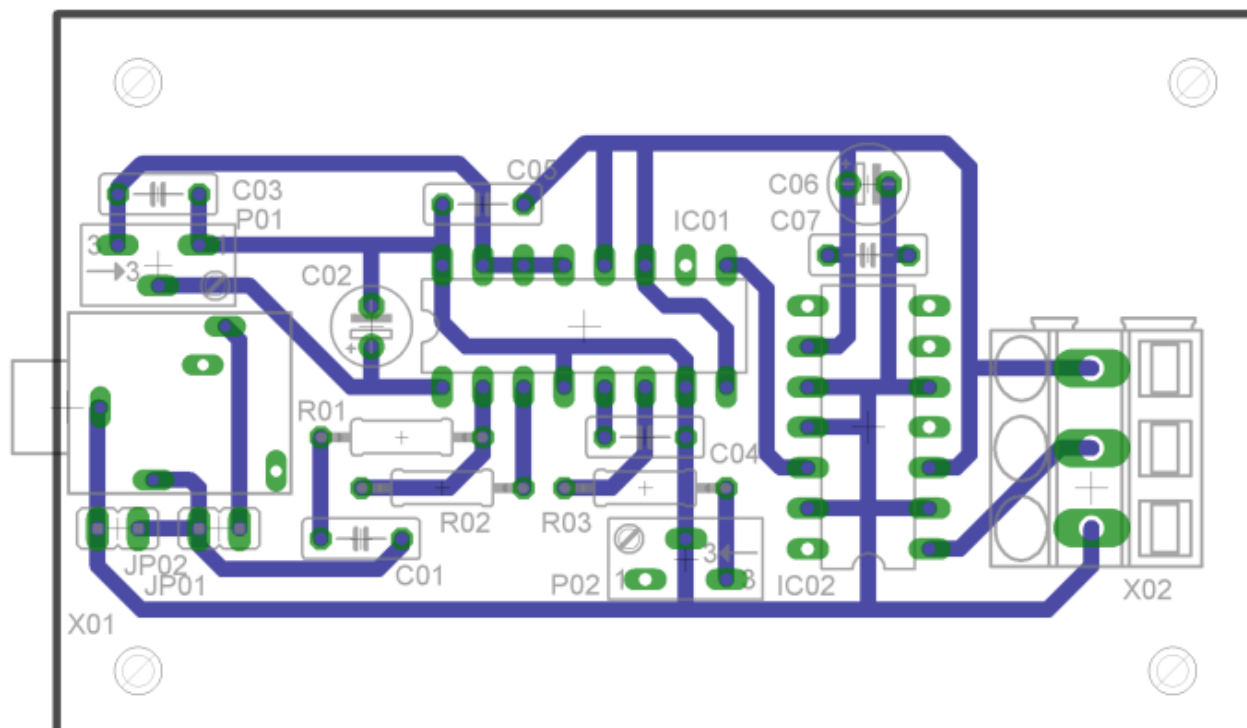
- [13] Plazma. *Wikipedia* [online]. 2014, č. 13 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Plazma#kolektivn.C3.AD_chov.C3.A1n.C3.AD
- [14] Sahova rovnice. *Wikipedia* [online]. 2014, č. 14 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sahova_rovnice
- [15] KUBEŠ, Pavel. Impulzní silnoproudé výboje a jejich diagnostika. *Aldebaran* [online]. 2004, č. 15 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/studium/vyboje.pdf>
- [16] Vedení elektrického proudu v plynech a ve vakuu. *Gymnázium F. X. Šaldy* [online]. 2006, č. 16 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://jan.gfxs.cz/studium/files/elektro/plyny.pdf>
- [17] MARTIŠ, Jan a Pavel VLČEK. Plazmový reproduktor - hrající výboj ("singing arc") s TV trafem. *High voltage labs* [online]. 2009, č. 17 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://hv-labs.xf.cz/singarc.html>
- [18] E Series Power MOSFET SiHG33N60E-E3 datasheet. *Vishay* [online]. 2015, č. 18 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/91522/sihg33n60e.pdf>
- [19] TL594 Pulse-Width-Modulation Control Circuit. *Texas instruments* [online]. 2014, č. 19 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl594.pdf>
- [20] Pulse Width Modulator Control Circuit. *Farnell* [online]. 2012, č. 19 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/19849.pdf>
- [21] HIGH AND LOW SIDE DRIVER IR 2110. *International rectifier* [online]. 2012, č. 21 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>
- [22] Power MOSFET IRF540N. *International rectifier* [online]. 2012, č. 22 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf540n.pdf>
- [23] Silicon Carbide Schottky Diode C3D04060F datasheet. *CREE* [online]. 2013, č. 18 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/Data%20Sheets/C3D04060F.pdf>
- [24] Total harmonic distortion. *Total harmonic distortion* [online]. 2015, č.24 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Total_harmonic_distortion

SEZNAM PŘÍLOH

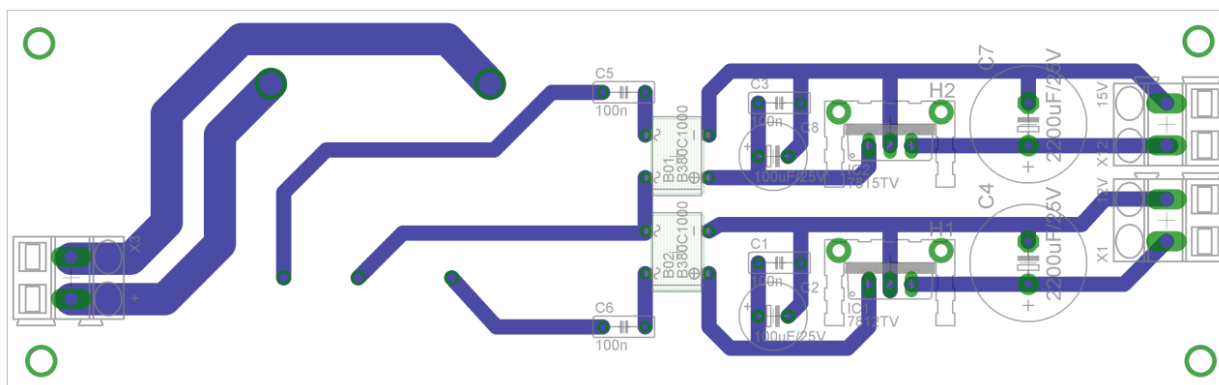
A	Osazovací výkresy desek plošných spojů	35
A.1	Osazovací výkres pro řídicí desku plazmového reproduktoru	35
A.2	Osazovací výkres pro zdrojovou desku plazmového reproduktoru.....	35
A.3	Osazovací výkres pro výkonovou desku plazmového reproduktoru.....	36
A.4	Osazovací výkres pro desku CLC filtru.....	36
B	Fotografie desek plošných spojů.....	37
B.1	Fotografie osazené řídicí desky	37
B.2	Fotografie osazené zdrojové desky	37
B.3	Fotografie osazené výkonové desky	38
B.4	Fotografie osazené desky CLC filtru	38
C	Soupiska součástek	39
C.1	Soupiska součástek pro řídicí desku	39
C.2	Soupiska součástek pro zdrojovou desku	39
C.3	Soupiska součástek pro výkonovou desku.....	40
C.4	Soupiska součástek pro desku CLC filtru.....	41
C.5	Soupiska ostatních použitých součástek	41

A Osazovací výkresy desek plošných spojů

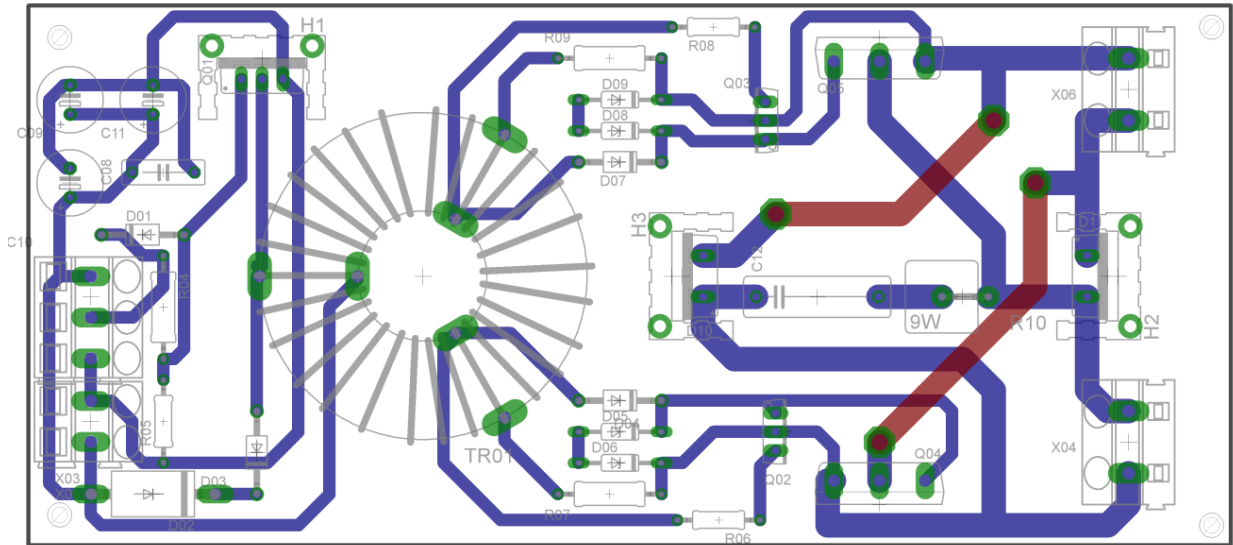
A.1 Osazovací výkres pro řídicí desku plazmového reproduktoru



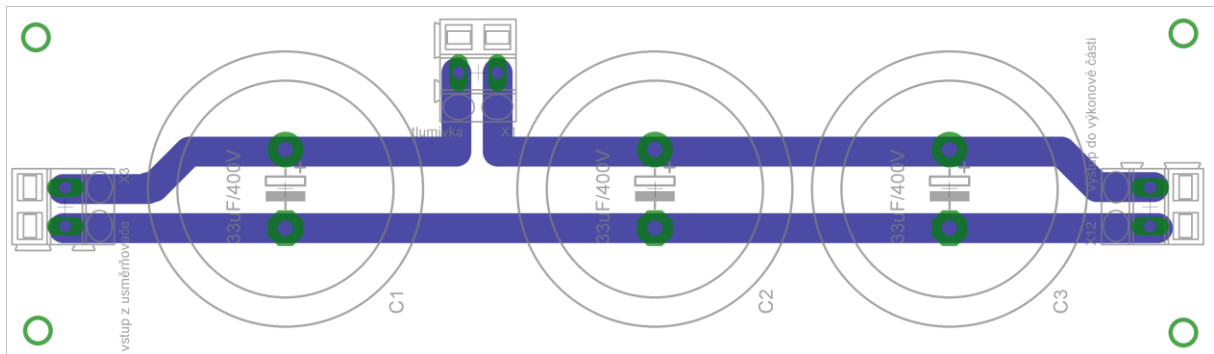
A.2 Osazovací výkres pro zdrojovou desku plazmového reproduktoru



A.3 Osazovací výkres pro výkonovou desku plazmového reproduktoru

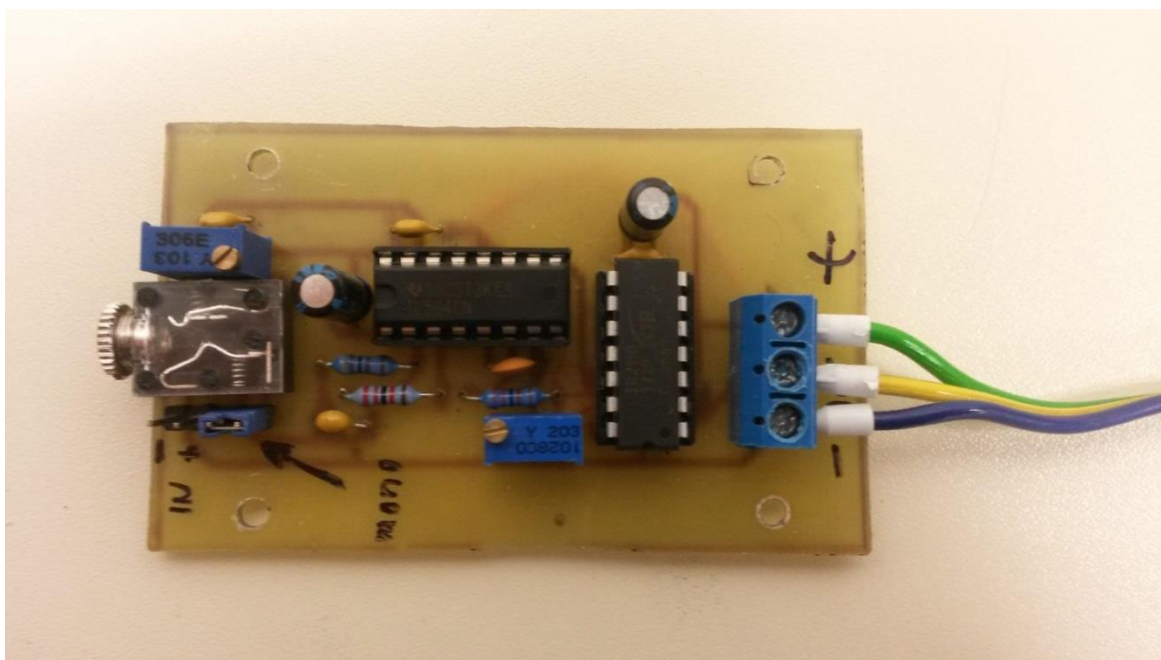


A.4 Osazovací výkres pro desku CLC filtru

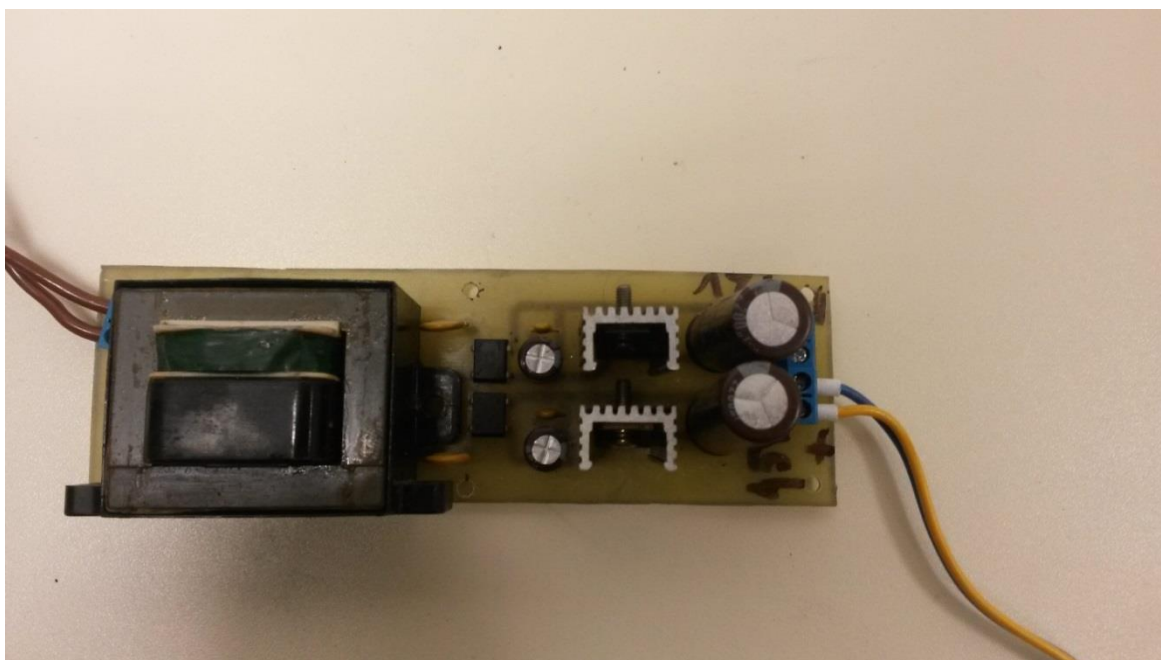


B Fotografie desek plošných spojů

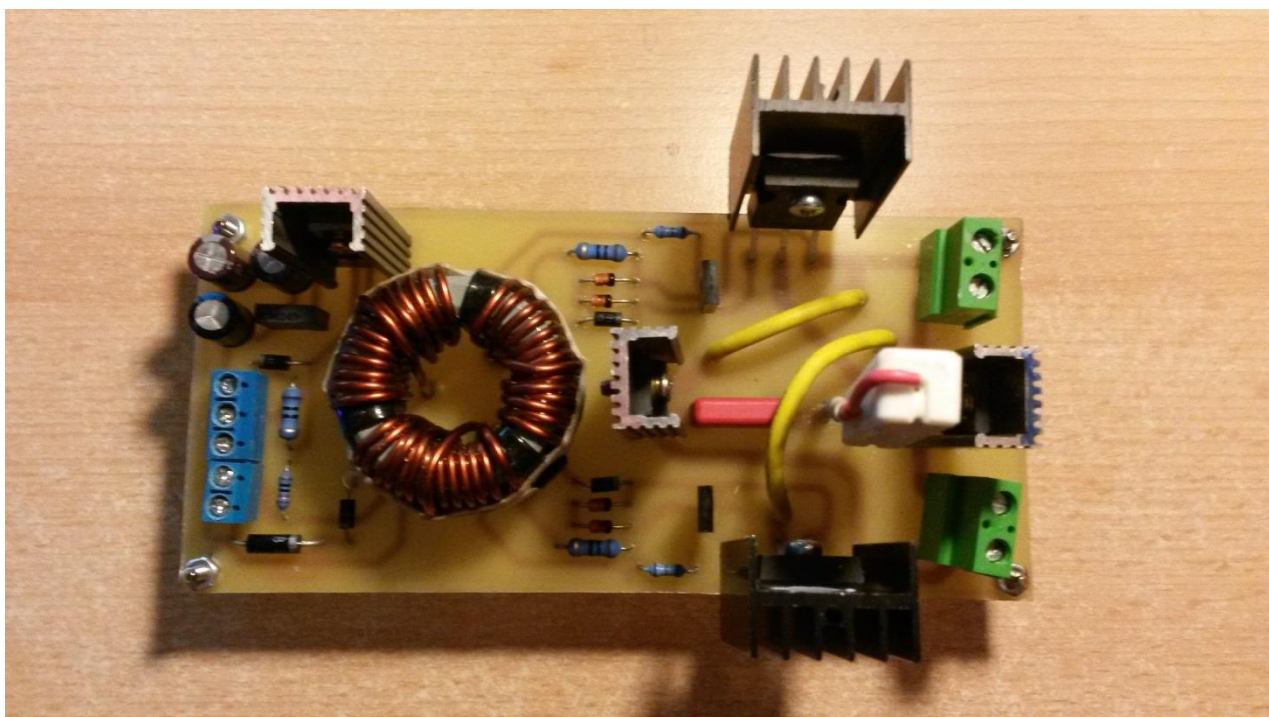
B.1 Fotografie osazené řídicí desky



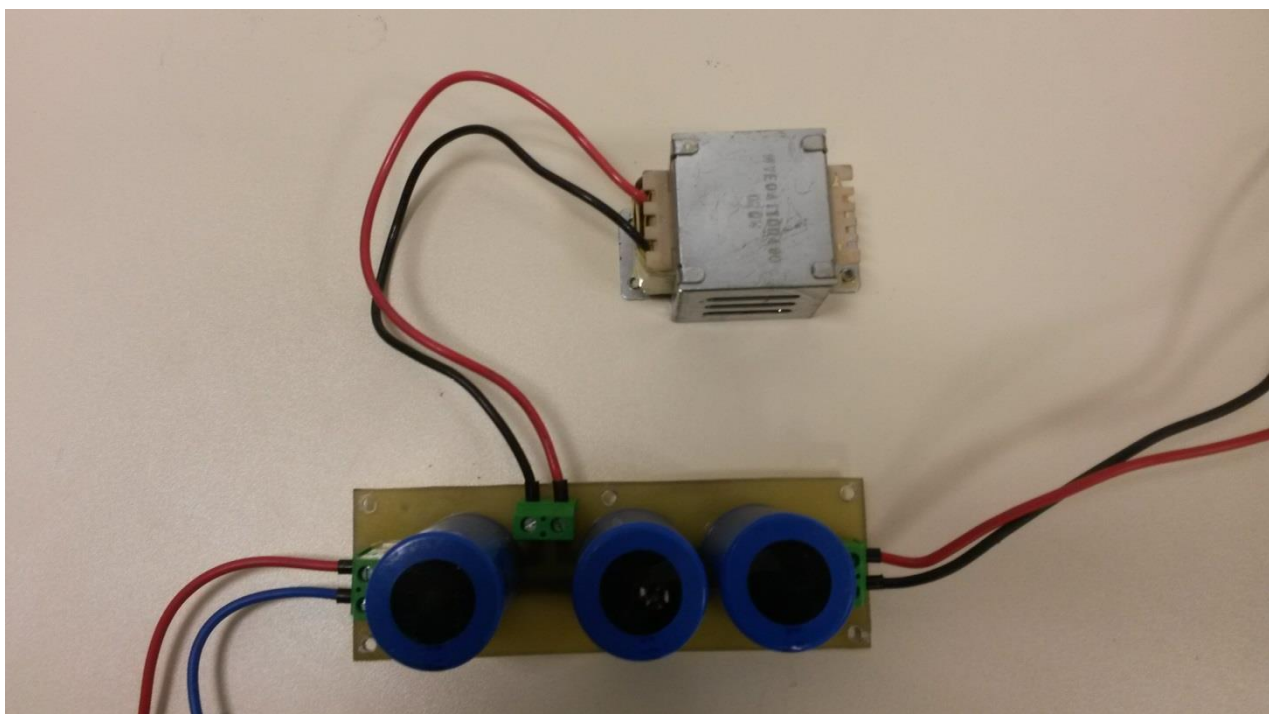
B.2 Fotografie osazené zdrojové desky



B.3 Fotografie osazené výkonové desky



B.4 Fotografie osazené desky CLC filtru



C Soupiska součástek

C.1 Soupiska součástek pro řídicí desku

Součástka	Označení ve schématu	Hodnota	Pouzdro
Rezistor	R01	4k7	0207/10
Rezistor	R02	22k	0207/10
Rezistor	R03	2k2	0207/10
Potenciometr	P01	10k	S64Y
Potenciometr	P02	10k	S64Y
Kondenzátor	C01	470n	C050-025x075
Kondenzátor	C02	1uF/15V	E2,5-5
Kondenzátor	C03	100n	C050-025x075
Kondenzátor	C04	2n2	C050-025x075
Kondenzátor	C05	100n	C050-025x075
Kondenzátor	C06	22uF/15V	E2,5-5
Kondenzátor	C07	100n	C050-025x075
Integrovaný obvod	IC01	TL594	DIL16
Integrovaný obvod	IC02	IR2110	DIL14
Spojka	JP01	jumper	JP1
Spojka	JP02	jumper	JP1
Konektor na jack 3mm	X01	-	1503_09
Konektor	X02	-	SMKDPS_1,5/3

C.2 Soupiska součástek pro zdrojovou desku

Součástka	Označení ve schématu	Hodnota	Pouzdro
Kondenzátor	C01	100n	C050-025x075
Kondenzátor	C02	100uF/25V	E3,5-8
Kondenzátor	C03	100n	C050-025x075
Kondenzátor	C04	2200uF/25V	E5-13
Kondenzátor	C05	100n	C050-025x075
Kondenzátor	C06	100n	C050-025x075
Kondenzátor	C07	2200uF/25V	E5-13
Kondenzátor	C08	100uF/25V	E3,5-8
Stabilizátor	IC1	7812TV	TO220V
Stabilizátor	IC2	7815TV	TO220V
Usměrňovač	B01	B380C1000	B-DIL
Usměrňovač	B02	B380C1000	B-DIL
Konektor	X1	-	SMKDPS_1,5/2
Konektor	X2	-	SMKDPS_1,5/2
Konektor	X3	-	SMKDPS_1,5/2
Chladič	H1	-	TO220-1PAD
Chladič	H2	-	TO220-1PAD
Transformátor	-	230/15V	-

C.3 Soupiska součástek pro výkonovou desku

Součástka	Označení ve schématu	Hodnota	Pouzdro
Rezistor	R04	5R1	0309/12
Rezistor	R05	1k	0207/10
Rezistor	R06	1k8	0207/10
Rezistor	R07	4R7	0309/12
Rezistor	R08	1k8	0207/10
Rezistor	R09	4R7	0309/12
Rezistor	R10	2k2/10W	KH214R-8
Kondenzátor	C08	330n	C075032x103
Kondenzátor	C09	100uF/15V	E3,5-8
Kondenzátor	C10	100uF/15V	E3,5-8
Kondenzátor	C11	100uF/15V	E3,5-8
Kondenzátor	C12	0,47uF/630V	C150-054x183
Dioda	D01	UF4007	DO41-10
Dioda	D02	1N5352	DO201-15
Dioda	D03	UF4007	DO41-10
Dioda	D04	UF4007	DO41-10
Dioda	D05	BZX83V015	DO35Z10
Dioda	D06	BZX83V015	DO35Z10
Dioda	D07	UF4007	DO41-10
Dioda	D08	BZX83V015	DO35Z10
Dioda	D09	BZX83V015	DO35Z10
Dioda	D10	C3D04060F	DO220S
Dioda	D11	C3D04060F	DO220S
Tranzistor	Q01	IRF540	TO220BV
Tranzistor	Q02	BD140	TO126AV
Tranzistor	Q03	BD140	TO126AV
Tranzistor	Q04	SiHG33N60E-E3	TO247BV
Tranzistor	Q05	SiHG33N60E-E3	TO247BV
Konektor	X03	-	SMKDPS_1,5/3
Konektor	X04	-	SMKDPS_7,5/2
Konektor	X05	-	SMKDPS_1,5/2
Konektor	X06	-	SMKDPS_7,5/2
Transformátor	TR01	TOROID 1:1:1	TOR_15V
Chladič	H1	-	TO220-1PAD
Chladič	H2	-	TO220-1PAD
Chladič	H3	-	TO220-1PAD

C.4 Soupiska součástek pro desku CLC filtru

Součástka	Označení ve schématu	Hodnota	Pouzdro
Kondenzátor	C1	330uF/400V	EB35D
Kondenzátor	C2	330uF/400V	EB35D
Kondenzátor	C3	330uF/400V	EB35D
Konektor	X1	-	SMKDPS_7,5/2
Konektor	X2	-	SMKDPS_7,5/2
Konektor	X3	-	SMKDPS_7,5/2

C.5 Soupiska ostatních použitých součástek

Součástka	Označení	Hodnota	Pouzdro
VN Transformátor	Samsung	-	-
Pojistka	P1	3A	-
Kolébkový Spínač	Spínač	10A/250V	-
EURO konektor	Napájecí konektor	2x1,5mH,10nF,2x3,3nF	-
Krabice IP6	GEWISS GW44209	300x220x120mm	-
Tlumící cívka	tlumivka	WEYEE04T00490	-
Usměrňovač	KBPC1006	600V/10A	-
Síťový odrušovací filtr	-	230V/10A	