



## **Středoškolská technika 2016**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

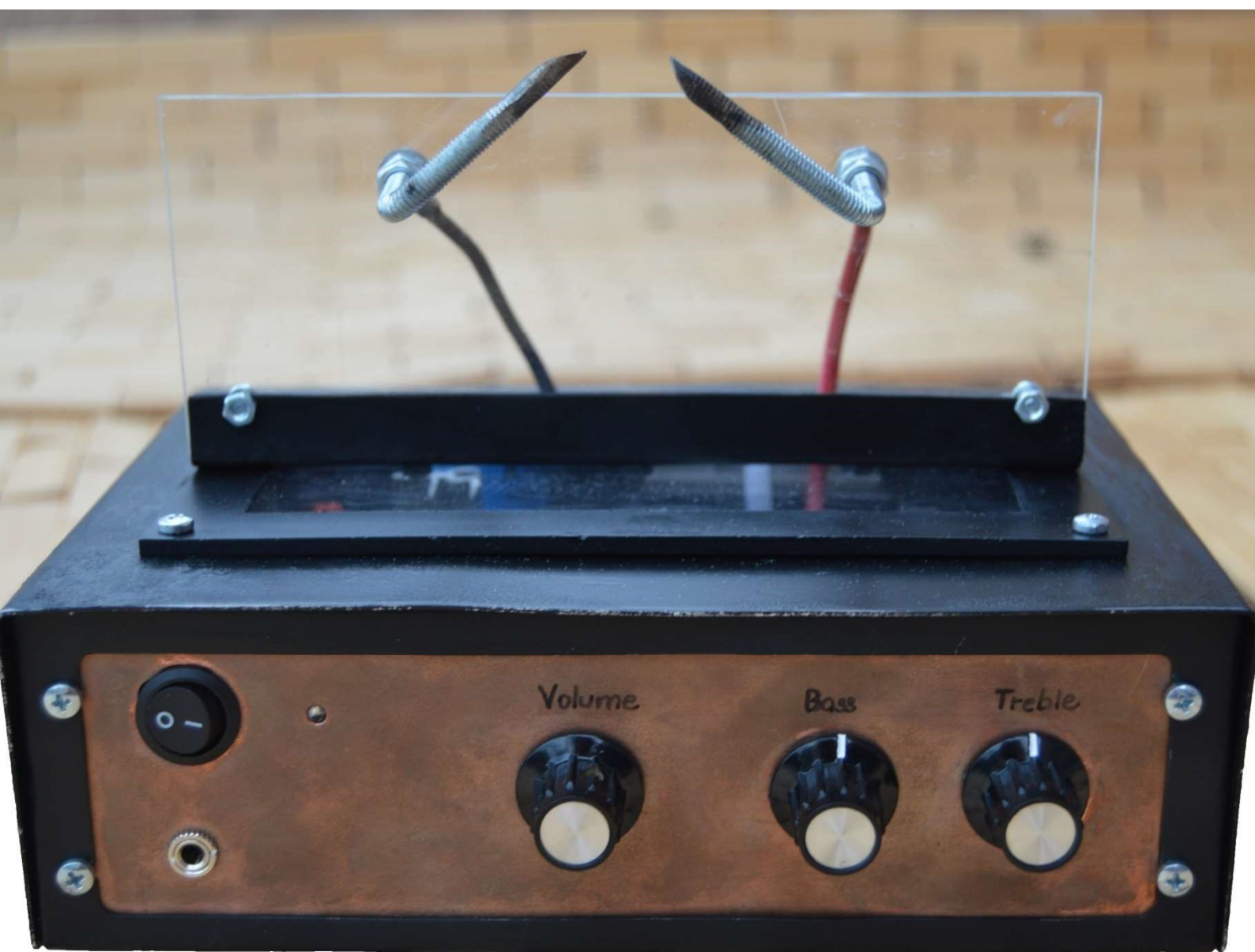
### **Plasma speaker**

**Brichta Ondřej, Trkovský Kryštof**

**Gymnázium, Plzeň, Mikulášské nám. 23**

# Plasma speaker

---



**Brichta Ondřej, Trkovský Kryštof**

## Obsah

Výboje v plynech, plazma a jak souvisí se zvukem .....	4
Budič transformátoru .....	4
Popis .....	5
Oscilátor .....	5
Seznam součástek .....	5
Schéma .....	5
DPS.....	6
Foto.....	6
Budič GDT .....	6
Seznam součástek .....	6
Schéma .....	6
DPS.....	6
Foto.....	7
Výkonová část.....	7
Seznam součástek .....	7
Schéma .....	7
DPS.....	8
Foto.....	8
Stejnoseměrný zvyšovač napětí .....	9
Popis .....	9
Seznam součástek .....	9
Schéma .....	9
DPS.....	10
Foto .....	10
Audio předzesilovač .....	10
Popis .....	10
Seznam součástek .....	10
Schéma .....	11
DPS.....	11
Foto .....	11
Měření .....	12
Konstrukční provedení .....	15
Závěr .....	15
Dodatek .....	15
Odvození rovnice stability.....	15

## Výboje v plynech, plazma a jak souvisí se zvukem

Obecně lze říci, že elektrický proud v elektrickém poli je tvořen volnými nosiči náboje, které se mohou relativně snadno pohybovat (podléhají srážkám a podobně) a jsou tímto polem urychlovány. Výsledný směr pohybu nosičů je však dán znaménkem jejich náboje (kladně nabitě nosiče náboje se pohybují směrem k zápornému pólu a naopak). Tato obecná definice nám umožňuje popsat vedení elektrického proudu v plynech (konkrétně ve vzduchu).

Vzduch je za normální (pokojové) teploty relativně dobrý izolant, tvořený neutrálními atomy a molekulami. Je však velmi slabě ionizován různými činidly (UV záření, přirozená radioaktivita, kosmické záření...). Takto vzniklé elektron-iontové páry však často hned rekombinují (pokud se setkají elektron a iont, ztratí elektron část své energie a stává se součástí atomárního obalu). Situace se změní, pokud budeme studovat plyn ve vnějším elektrickém poli dvou elektrod. Elektrony a ionty začnou být tímto polem urychlovány. Pokud překročí elektrické napětí takzvané zápalné napětí  $U_z$ , získají elektrony dostatečnou energii k tomu, aby při srážce s neutrálními atomy a molekulami uvolňovaly další elektrony. Urychlené ionty potom dopadají na katodu, ze které uvolňují sekundární elektrony. Tímto vznikne stálý elektrický proud mezi elektrodami. Vytvoří se proudové vlákno (elektrický výboj). Vodivost vlákna rychle roste a narůstá elektrický proud. Dochází k uvolňování Jouleova tepla. Toto teplo se podílí na termoemisi elektronů a také na další ionizaci plynu.

Stav látky, ve které se nachází plyn v kanálu výboje se, nazývá plazma, výboj je tedy jakési plazmatické vlákno. Plazma je ionizovaný plyn (třeba jen částečně ionizovaný). Vzhledem k tomu, že se v něm nacházejí volné nosiče náboje, kolektivně reaguje na elektrická a magnetická pole, která také vytváří. K definici plazmatu se ještě přidává takzvaná kvazineutralita, což znamená, že jsou koncentrace kladných a záporných nábojů stejné, náboje se stíní. Plazmatický útvar jako celek je elektricky neutrální. Na malých rozměrech však není stínění efektivní.

Jak již bylo řečeno, výboj je plazmatické vlákno. Vzhledem k tomu, že tímto vláknem protéká elektrický proud, generuje kolem sebe magnetické pole. Toto pole zpětně působí Lorentzovou silou na volné nosiče náboje uvnitř tohoto vlákna. Tato síla, mířící do středu průřezu vlákna, je kompenzována vnitřním tlakem samotného plazmatu (tlak je způsoben působením nabitých částic mezi sebou a také vysokou teplotou plazmatu). Tato podmínka stability se dá zapsat rovnicí

$$\nabla p = \mathbf{j} \times \mathbf{B},$$

kde  $p$  je tlak plazmatu,  $\mathbf{j}$  je vektor hustoty elektrického proudu protékajícího vláknem a  $\mathbf{B}$  je vektor magnetické indukce. Odvození této rovnice viz dodatek.

Nyní se podívejme na mechanismus vzniku zvuku v plasma speakeru. Jak již bylo řečeno, při výboji vzniká Jouleovo teplo. Platí stavová rovnice  $pV \sim T$ , kde  $p$  je tlak,  $V$  je objem a  $T$  je termodynamická teplota. Modulace plasma speakeru způsobuje změnu napětí na elektrodách, a tedy i kolísání termodynamické teploty plazmatu. Změny teploty jsou však rychlé, proto se vzduch v bezprostředním okolí vlákna nestačí rozpínat. To znamená, že objem  $V$  je konstantní a lze psát  $p \sim T$ . Vznikají tak tlakové fluktuace (podobně jako u klasického reproduktoru s membránou), které se šíří prostorem jako zvukové vlnění. Současně je možný i jiný mechanismus. Z rovnice stability se dá ukázat, že pro tlak plazmatu uvnitř vlákna platí  $p \sim I^2$ . Modulace způsobí změnu elektrického proudu protékajícího vláknem a tedy i změnu tlaku. Zbytek je stejný jako v předchozím případě.



# Budič transformátoru

## Popis

Celkové zapojení budiče bylo rozděleno na 3 logické části a to: oscilátor, budič GDT a výkonovou část.

Princip zapojení oscilátoru není složitý, přesto stěžejní pro funkci celého plazmového reproduktoru. Obvod je zapojen podle datasheetu SG3525. Na vstupu je NF signál z předzesilovače a na výstupu vysokofrekvenční napětí šířkově modulované podle vstupu. Právě díky tomu je výboj z IHVT schopný „hrát“. Trimrem P1 je možné regulovat střídu a trimrem P2 nosnou frekvenci oscilátoru. Frekvence s těmito součástkami je nastavitelná od 18 do 77kHz. Teoreticky je pro přenesení celého slyšitelného spektra (20Hz – 20kHz) minimální potřebná nosná frekvence cca 40kHz. Obvod je v SMD provedení, ovšem zbytek součástek je klasický.

Budič GDT využívá komplementární dvojice BD139, BD140 pro zesílení budícího signálu.

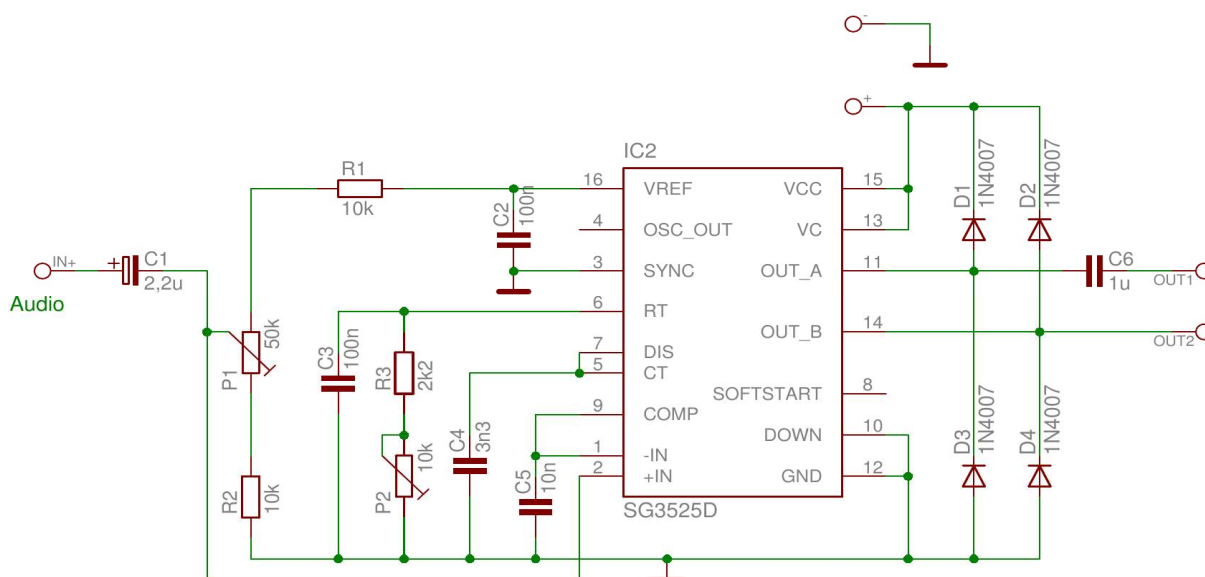
Výkonová část je klasický polomůstek často využívaný v podobných zapojeních. Gate tranzistoru je řízen přes Gate Driver Transformátor, který odděluje nízko výkonovou část od vysoko výkonové. Kvůli ochraně jsou před gate zařazeny 12V zenerovy diody a rezistor R2,5. Paralelně zapojený R1,4 rezistor s diodou zajišťují rychlejší vybíjení, než nabíjení kapacitní zátěže mosfetu a tak strmější zavření. Přes mosfety jsou zařazeny ochranné externí diody D2,4. Mosfety jsou značně proudově namáhány, takže je potřeba důkladného chlazení. Některé prvky byly napájeny kvůli úspoře místa ze strany plošných spojů. GDT je trifilárně navinut na železo prachovém toroidním jádře, které přestože není zcela vhodné, tak dostačuje.

## Oscilátor

### Seznam součástek

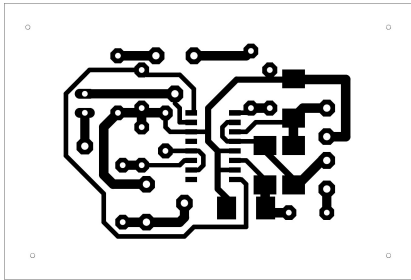
R1, R2 .....	10k	C1 .....	2u2	D1-D4 .....	1N4007	SMD
R3 .....	2k2	C2, C3 .....	100n	IC2 .....	SG3525A	SMD
P1 .....	50k	C4 .....	3n3			
P2 .....	10k	C5 .....	10n			
	lež. 6	C6 .....	1u			keram.
	lež. 6					

### Schéma

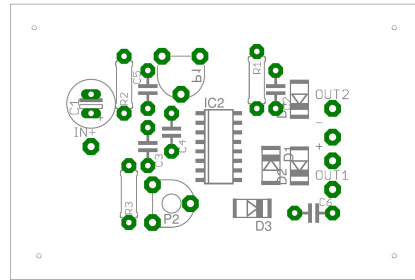


Obr. 1 – Schéma oscilátoru

## DPS

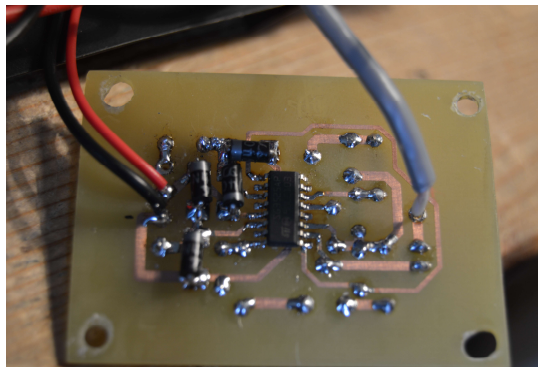


Obr. 2 – Deska plošných spojů oscilátoru



Obr. 3 – Osazení desky plošných spojů oscilátoru

## Foto



Obr. 4 – Foto DPS oscilátoru

## Budič GDT

### Seznam součástek

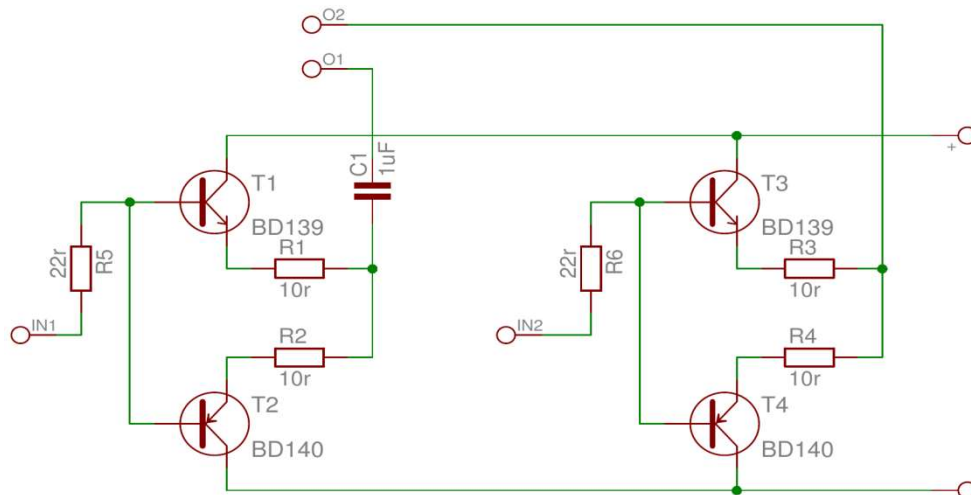
R1-R4 .....10r  
R5, R6 .....22r

C1 ..... 1u

T1, T3 ..... BD139

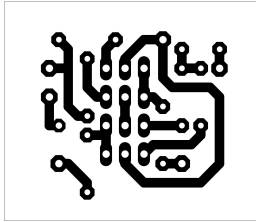
T2, T4 ..... BD140

### Schéma

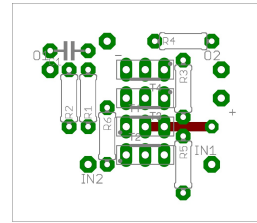


Obr. 5 – Schéma budiče GDT

## DPS

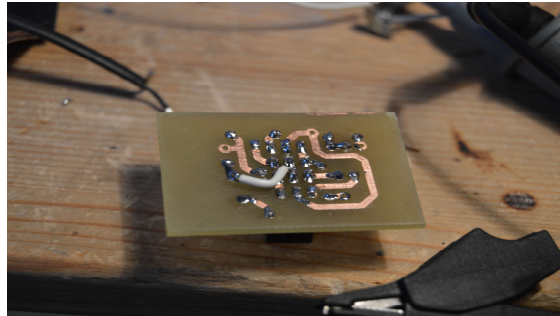


Obr. 6 – Deska plošných spojů budič GDT



Obr. 7 – Osazení desky plošných spojů budiče GDT

Foto



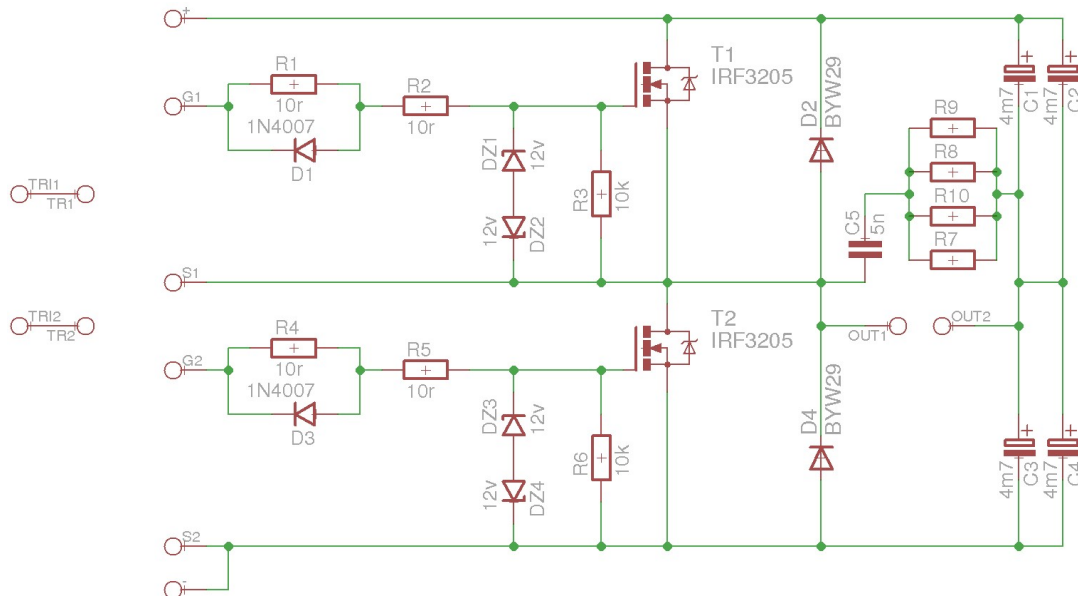
Obr. 8 – Foto DPS budiče GDT

## Výkonová část

### Seznam součástek

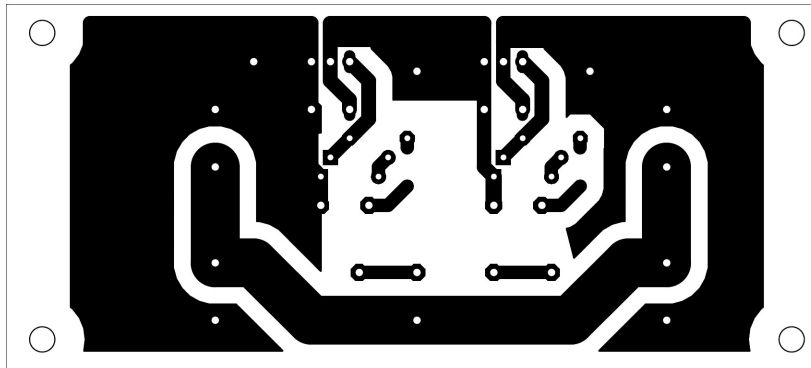
R1, R2, R4, R5 .....	10r	C1-C4 .....	4m7	35v	DZ1-DZ4 .....	12v
R3, R6 .....	10k	C5 .....	5n	T1, T2 .....	IRF3205	
R7-R10 .....	27r					
		D1, D3 .....	1N4007			
		D2, D4 .....	BYW29			

### Schéma

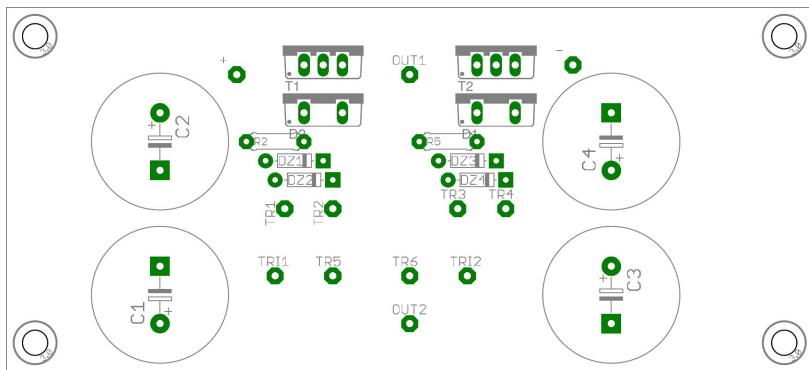


Obr. 9 – Schéma výkonové části

DPS

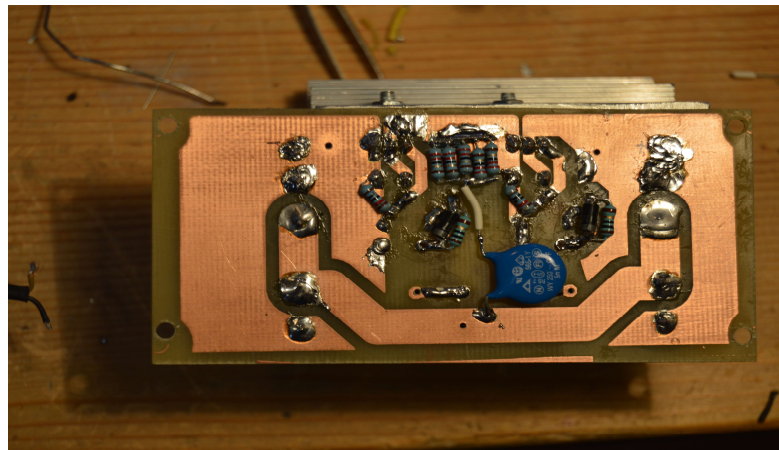


Obr. 10 – Deska plošných spojů výkonové části



Obr. 11 – Osazení desky plošných spojů výkonové části

Foto



Obr. 12 – Foto DPS výkonové části



Obr. 13 – Foto výkonové části

## Stejnoseměrný zvyšovač napětí

### Popis

K tomu, aby bylo možné napájet plasma speaker kdekoli z 12V je potřeba měnič z 8,5 – 16V na 33V. O veškerou funkcionalitu se stará integrovaný obvod UC3843, ten začíná pracovat, až od 8,5V.

Rezistor R3 je zpětná vazba a nastavuje výstupní napětí, je možné jej zhruba spočítat podle vzorce:

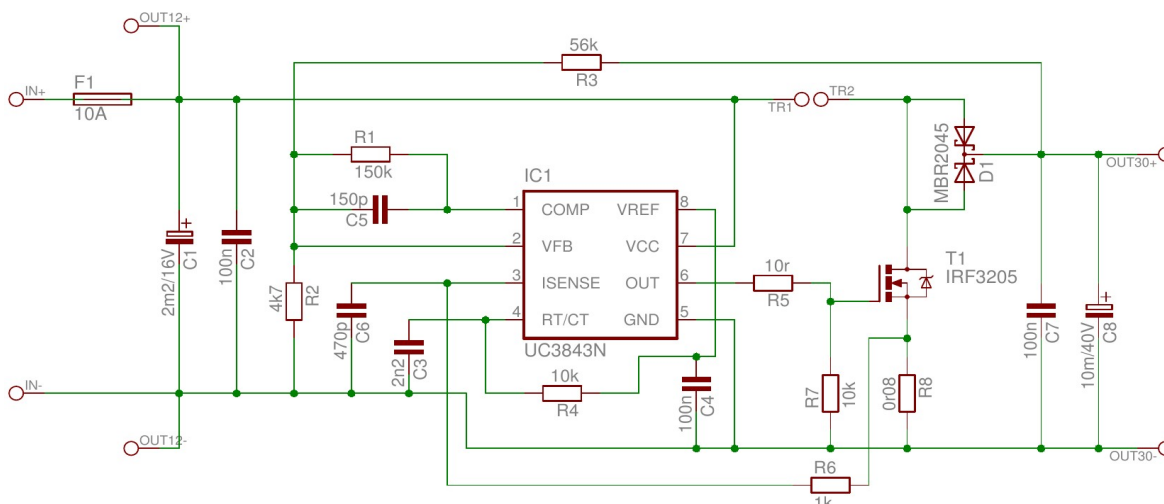
$R_3 = 1880(U_{výst} - 2,5)$ . Jako spínací prvek je důležité použít mosfet s co nejnižším sepnutým odporem. Jako usměrňující prvek slouží shottky dioda z PC zdroje s nízkým úbytkem napětí. Účinnost měniče je vcelku dobrá a tepelně se začíná projevovat, až po delším provozu. TR1,2 je žlutobílé toroidní jádro z PC zdroje se spočítanou indukčností cca 75mH. Autor zapojení je:

<http://danyk.cz/noteb.html>

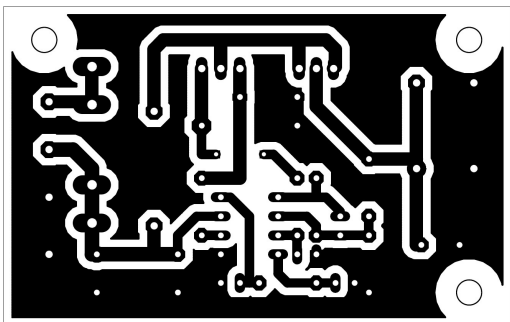
### Seznam součástek

R1 .....	150k	C1 .....	2m2	16v	D1 .....	MBR2045	shottky
R2 .....	4k7	C2, C4, C7 .....	100n		T1 .....	IRF3205	
R3 .....	56k	C3 .....	2n2		F1 .....	10A	
R4, R7 .....	10k	C5 .....	150p				
R5 .....	10r	C6 .....	470p				
R6 .....	1k	C8 .....	10m	40v			
R8 .....	0r08						

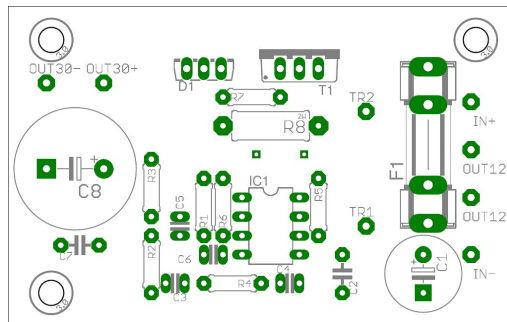
### Schéma



DPS

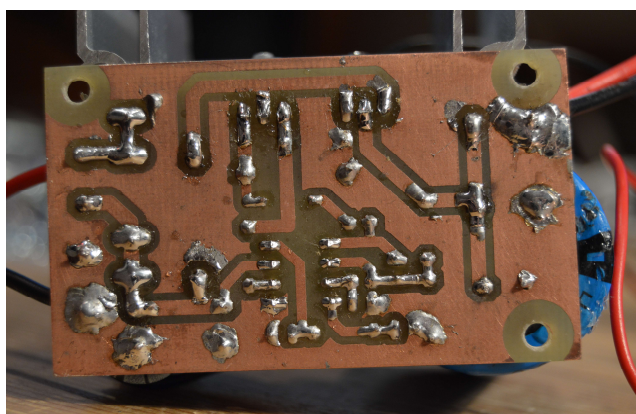


Obr. 15 – Deska plošných spojů PSU



Obr. 16 – Osazení desky plošných spojů PSU

Foto



Obr. 17 – Foto DPS PSU

## Audio předzesilovač

Popis

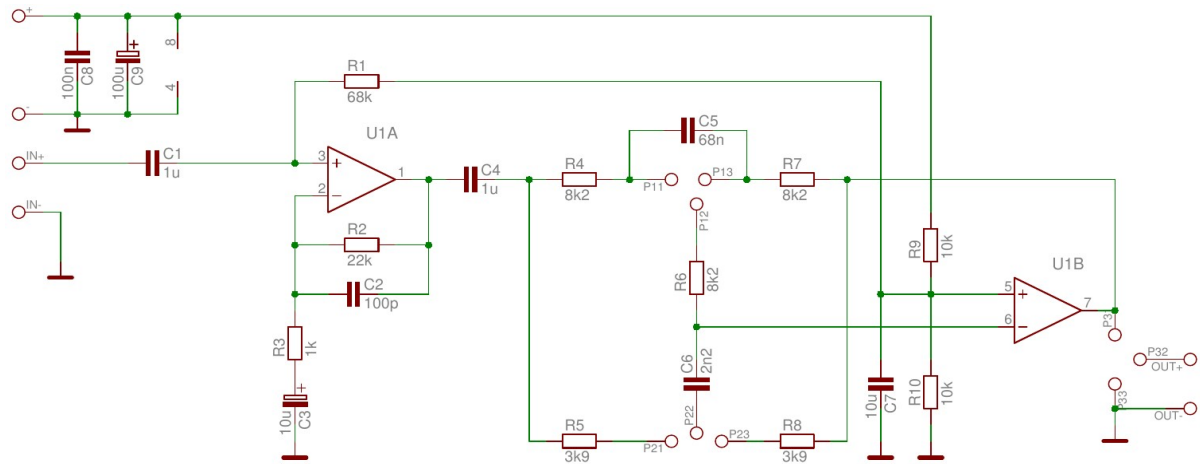
Srdcem zapojení je integrovaný nízko šumový operační zesilovač NE5532 s častým využitím právě v předzesilovačích. Přes vstupní oddělovací kondenzátor jde NF signál do neinvertujícího vstupu zesilovače se zesílením  $1 + (R_2/R_3)$ , tedy 23×. Následují obyčejné korekce baxandall a potenciometr k regulaci hlasitosti. Výstupní kondenzátor je obsažen v následujícím stupni – oscilátoru. Korekce jako takové dosahují docela dobrých parametrů a k tomuto účelu jsou více než dostačující, ovšem v high end zvukové sestavě by se pravděpodobně neuplatnily. DPS byla jako jediná z celého zařízení nakreslena klasickou metodou lihovým fixem.

Seznam součástek

R1 .....	68k	P1 – P3.....	25k	C8 .....	100n
R2 .....	22k	C1, C4 .....	1u	C9 .....	100u
R3 .....	1k	C2 .....	100p	U1.....	NE5532
R4 .....	8k2	C3, C7 .....	10u		
R5, R8 .....	3k9	C5 .....	68n		
R6, R7 .....	8k2	C6 .....	2n2		
R9, R10 .....	10K				

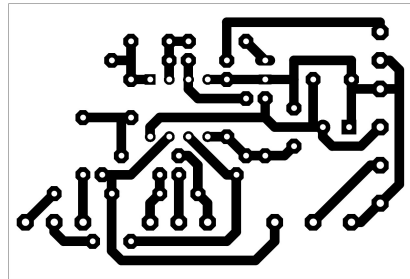


## Schéma

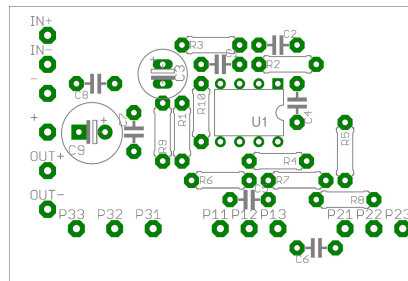


Obr. 18 – Schéma předzesilovače

## DPS

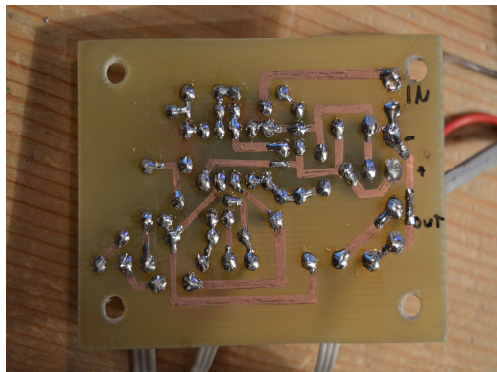


Obr. 19 – Deska plošných spojů předzesilovače

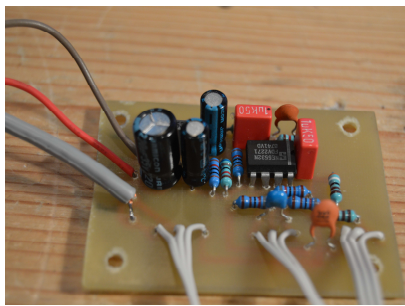


Obr. 20 – Osazení desky plošných spojů předzesilovače

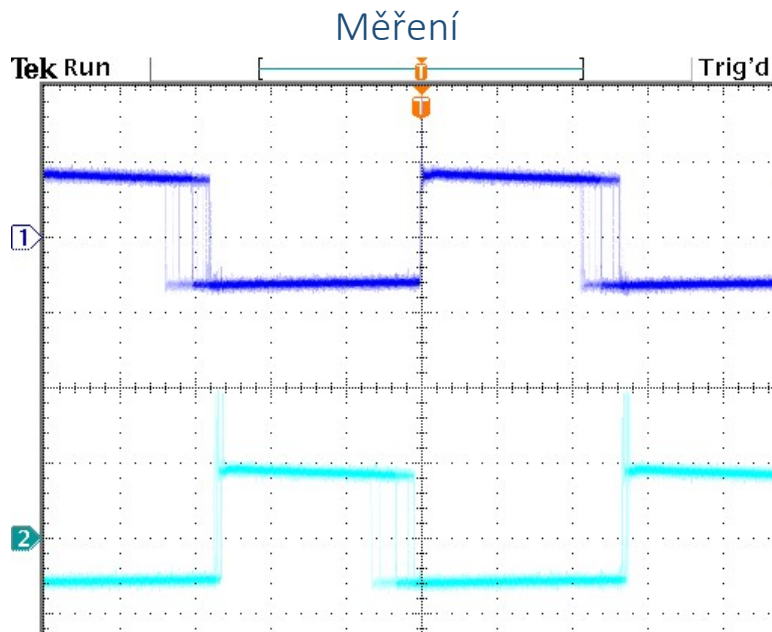
## Foto



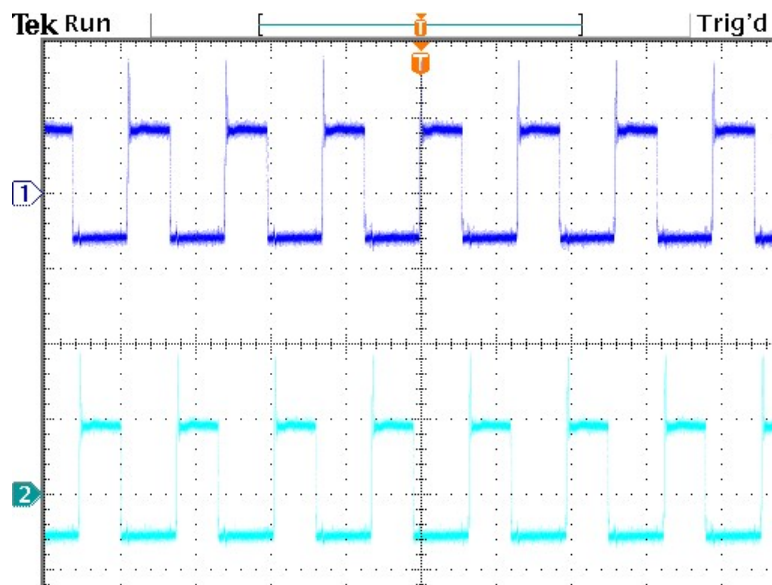
Obr. 21 – Foto DPS předzesilovače



Obr. 22 – Foto předzesilovače

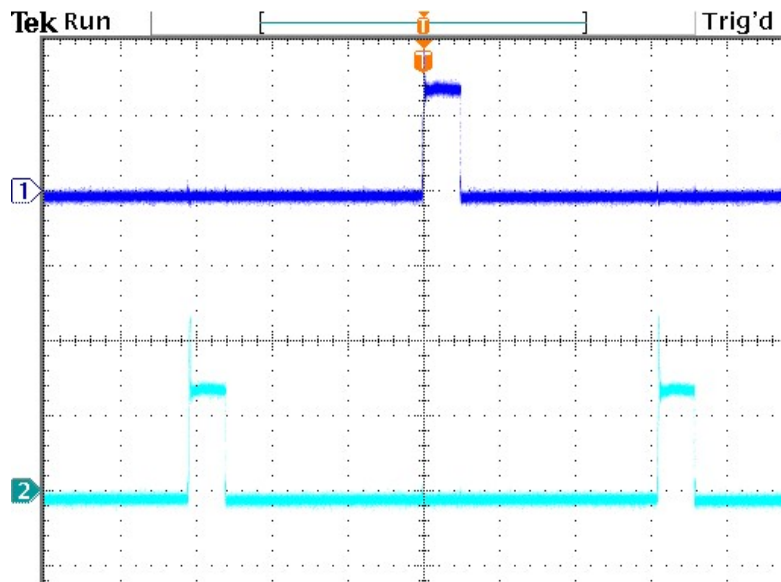


Obr. 23 – Buzený, nezatížený výstup z oscilátoru při minimální frekvenci

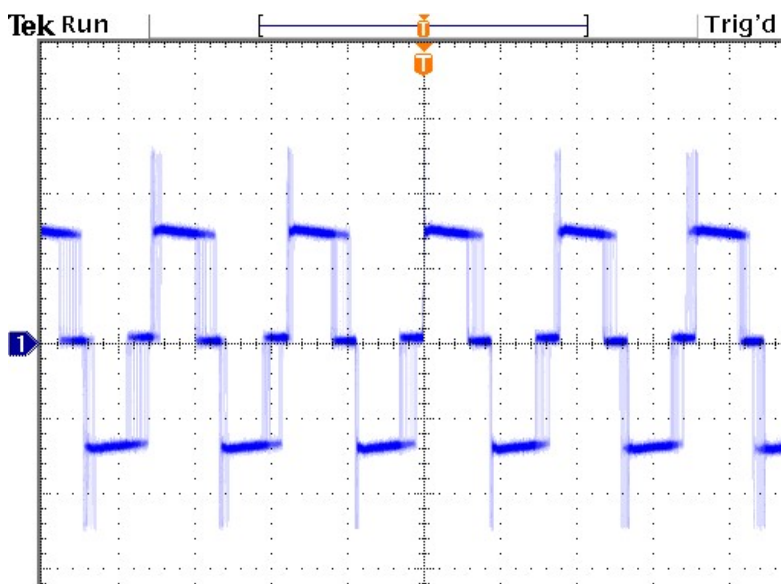


Obr. 24 – Nezatížený výstup oscilátoru při maximální frekvenci

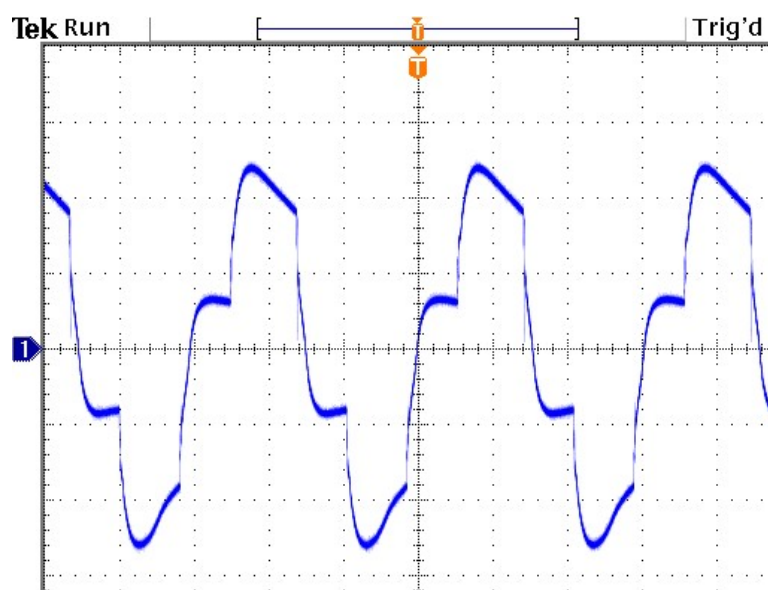




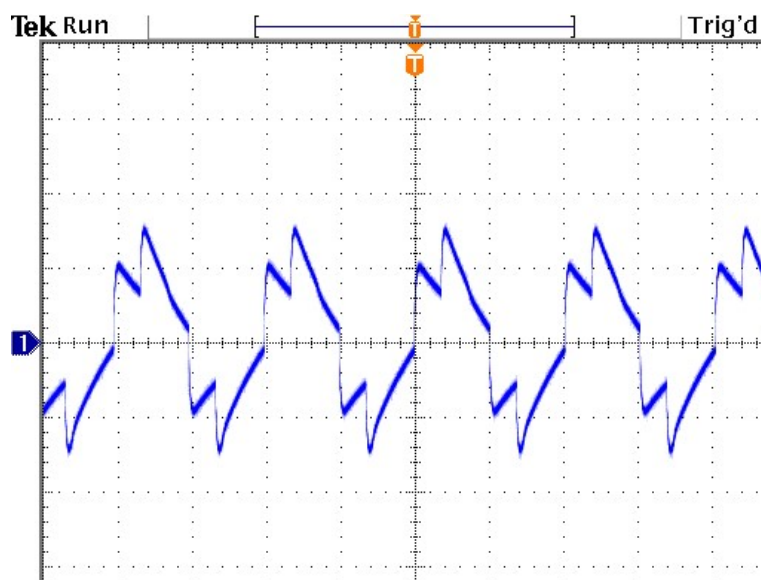
Obr. 25 – Regulace střídání nezatíženého oscilátoru



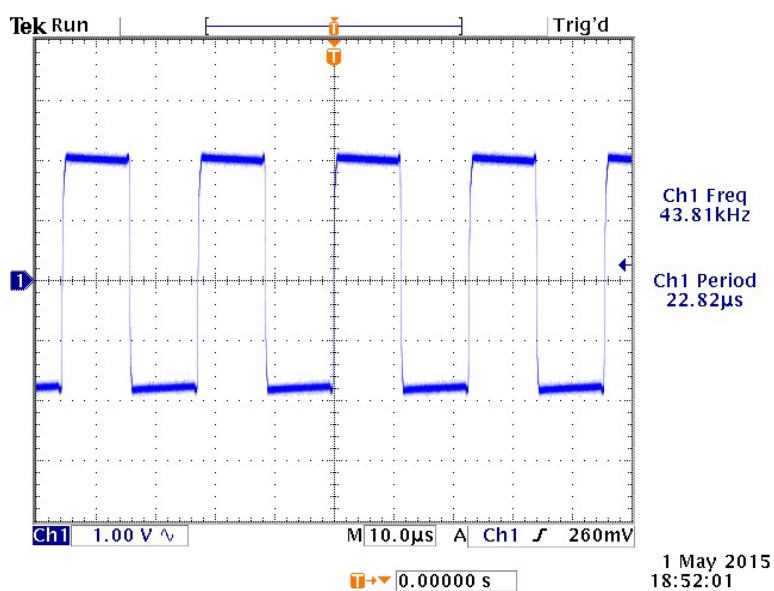
Obr. 26 – Buzený nezatížený výstup z oscilátoru



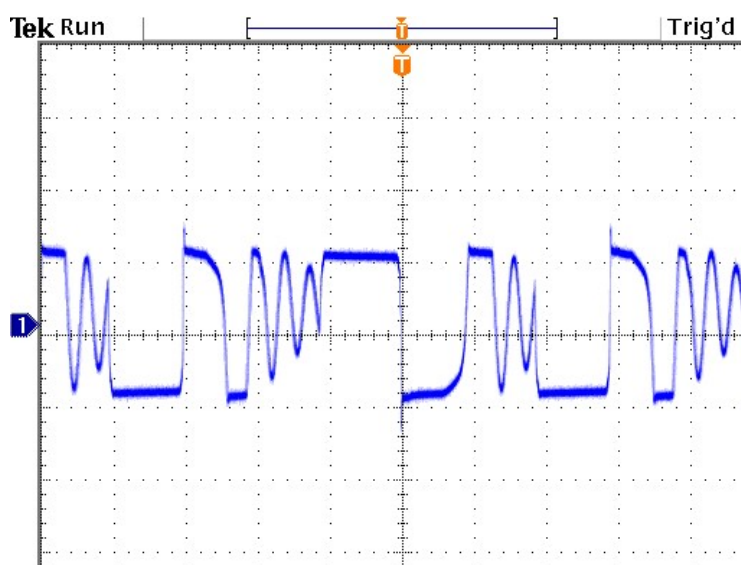
Obr. 27 – Průběh na zatíženém GDT



Obr. 28 – Průběh na zatíženém GDT



Obr. 29 – Průběh na nezatíženém výstupu z výkonové části



Obr. 30 – Průběh při zatížení na primáru IHVT

## Konstrukční provedení

Celé zařízení je vmontováno do černé železné krabičky s upevněním elektrod v plexiskle a předkem z měděného plechu. Největší problém nastal při řešení vedení vysokého napětí, které je náročné dostatečně odizolovat.

Napájení je přivedeno přes souosý konektor do vypínače s kontrolkou a následně do celého zařízení.

Všechny desky plošných spojů kromě předzesilovače byly vyrobeny fotocestou. Osvit byl proveden UV led diodami a trval 3 minuty.

## Závěr

Zvuk plazmového reproduktoru je opravdu překvapující, určitě srovnatelný se zvukem například z notebookových reprodukturů. Tento návrh se párkrát vyskytl i v profesionálních audiosystémech jako výšková sekce. Dle našeho názoru zařízení slouží jako skvělá demonstrace, ovšem vzhledem k jeho spotřebě elektrické energie – neúspornosti nemůže sloužit jako náhrada klasických reprodukturů. Spíše jde o estetické zpestření.

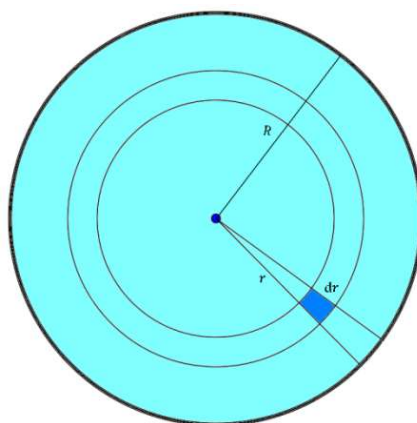
Bezespornou výhodou plasma speakeru je schopnost reprodukovat vysoké tóny. U klasických membránových reprodukturů činí problém samotná membrána. Membrána má určitou hmotnost, tedy i setrvačnost. Změna pohybového stavu membrány trvá delší dobu. Tyto limity plazmatické vlákno nemá.

Autorem všech DPS a zapojení, pokud není uvedeno jinak, je Kryštof Trkovský a Ondřej Brichta. Schémata a DPS jsou nakresleny ve free verzi programu Eagle.

## Dodatek

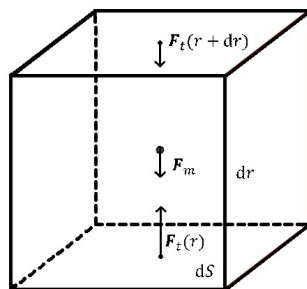
### Odvození rovnice stability

Vyjmeme z plazmatického vlákna malý objemový element o náboji  $dQ$  (rozměry objemového elementu jsou menší, než tzv. Debyova stínící vzdálenost, element je na venek elektricky nabitý, náboj není odstíněný, viz kvazineutralita) a o objemu  $dV = dSdr$ .



Řez plazmatickým vláknem

Na tento element působí dominantně tři síly, síla Lorentzova ( $\mathbf{F}_m = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , kde  $Q$  je náboj,  $\mathbf{v}$  je vektor rychlosti a  $\mathbf{B}$  je vektor magnetické indukce) s dostředným směrem, síla tlaková působící na horní stěnu objemového elementu a síla tlaková působící na spodní stěnu objemového elementu (viz obrázek).



Tlaková síla působící na spodní stěnu bude větší, výsledná síla tedy působí v opačném směru, než síla Lorentzova. Vzhledem k tomu, že je vlákno v klidu (nerozpadá se, nezaškrucuje se atd.), dostaneme z rovnosti tlakové a Lorentzovy síly rovnici

$$[p(r) - p(r + dr)]dS = vBdQ,$$

kde  $p(r)$  je tlak (vzhledem k symetrii vlákna závisí tlak pouze na  $r$ ) a  $v$  je rychlost pohybu nosičů náboje. Vydělíme-li tuto rovnici výrazem  $dSdr$ , můžeme psát

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{dQ}{drdS}vB.$$

Dále si uvědomme, že  $drdS = dV$

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{dQ}{dV}vB$$

Pokud zavedeme objemovou hustotu náboje vztahem  $\rho = dQ/dV$  a hustotu elektrického proudu jako  $j = \rho v$ , získá rovnice stability výsledný tvar

$$-\frac{dp}{dr} = jB$$

Výraz na levé straně má význam gradientu tlaku (jde o první složku gradientu v cylindrické souřadnicové soustavě, vzhledem k symetrii jsou ostatní složky nulové), proto obecný tvar je

$$\nabla p = \mathbf{j} \times \mathbf{B}.$$

Pro magnetickou indukci uvnitř vlákna platí vztah

$$B = \frac{I\mu_0}{2\pi R^2}r,$$

Kde  $r \leq R$  (užíváme stejné značení, jako v předchozím odvození). Pokud dosadíme tento vztah za magnetickou indukci v rovnici stability, dostaneme

$$-\frac{dp}{dr} = j \frac{I\mu_0}{2\pi R^2}r$$

Pro hustotu elektrického proudu platí také vztah

$$j = \frac{I}{\pi R^2}.$$

Po dosazení získá rovnice stability tvar

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{I^2\mu_0}{2\pi^2 R^4}r.$$

Po separaci proměnných můžeme integrovat (tlak na povrchu by měl být nulový)

$$\int_0^p dp = -\frac{I^2 \mu_0}{4\pi^2 R^4} \int_R^r r dr \Rightarrow$$
$$p(r) = -\frac{I^2 \mu_0}{4\pi^2 R^4} (r^2 - R^2)$$

Toto je hledaný vztah pro tlak.

## Zdroje

STMicroelectronics. *SG3525 Datasheet* [online]. Dostupný na WWW:

<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000958.pdf>

TEXAS INSTRUMENTS. *Datasheet NE5532* [online]. Dostupný na WWW:

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf>

FAIRCHILD. *Datasheet UC3843* [online]. Dostupný na WWW:

<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/UC/UC3843.pdf>

DANYK. *danyk.cz* [online]. Dostupný na WWW: <http://danyk.cz/noteb.html>

KULHÁNEK, Petr; ČERVENKA, Milan. *Astrofyzika* [online]. Dostupný na WWW:

<http://www.aldebaran.cz/studium/astrofyzika.pdf>

D. MAYER. *Aplikovaný elektromagnetismus*. České Budějovice: Kopp, 2012