

Výkonový zesilovač 1kW pro 144MHz s GS35b

Ing. Tomáš Kavalír, OK1GTH kavalir.t@seznam.cz, <http://ok1gth.nagano.cz>

Principiální schéma tohoto zesilovače bylo odvozeno z popisu od známého konstruktéra Dragoslava Dobříčče YU1AW [1], který jako jeden z prvních publikoval myšlenku jednoduché filozofie návrhu KV zesilovačů i v pásmech VKV. Autor sám nazval tyto konstrukce vtipně pro „Lazy builders“ neboli po česku pro líné stavitele. Samotný zesilovač je osazen keramickou triodou ruské proveniencí GS35b, která je ještě občas sehnatelná na radioamatérských burzách. Zde popsaná konstrukce byla již postavena ve čtyřech téměř identických exemplářích, které jsou používány především během radioamatérských soutěží. Výstupní výkon bez omezení doby provozu a nízkých úrovních IMD zkreslení je cca 1000W PEP na 50Ω a do limitace větší než 1500W. Zesilovač je navržen jako lineární, tj. je určen především pro CW a SSB provoz.

Než se pustíme do stavby výkonového zesilovače (a je jedno jestli KV nebo VKV), je vždy nutné si položit otázku, zda je výhodnější se pokusit zesilovač postavit svépomocí nebo si zesilovač koupit jako hotový celek. Rozhodujícím faktorem, tak jako v jakémkoliv jiném odvětví lidské činnosti, bývá finanční hledisko. V dalším rozboru budu uvažovat, že veškerý materiál na stavbu zesilovače se musí zakoupit a nepředpokládám tak, že jste „žába na prameni“ nebo že máte doma plný sklep vyřazené vojenské techniky a náhradních dílů pro výkonové zesilovače ☺ Pokud jsme se rozhodli si zesilovač skutečně postavit sami, tak můžeme reálně uvažovat, že se dostaneme přibližně někam na úroveň 1/3 – 1/4 ceny nového profesionálně vyrobeného zesilovače. Do této ceny neuvažujeme čas, který strávíme jak vlastní stavbou zesilovače, tak i sháněním potřebných informací, případně speciálních dílů nutných pro stavbu. Je nutné si tedy velmi dobře spočítat, zdali není výhodnější čas potřebný pro stavbu zesilovače využít třeba vyděláváním peněz a zakoupit si tak nový, případně bazarový zesilovač. Jiná situace samozřejmě je, pokud to děláme pro zábavu a že nás baví, si postavit něco vlastníma rukama. Pokud jsme se tedy rozhodli, že si zesilovač postavíme sami, tak by logicky mělo následovat shánění informací, případně i vhodné literatury. Žádný článek, ať je napsán sebelépe, či velmi podrobně, nikdy nevystihne všechny záludnosti, které se mohou vyskytnout a které musíme následně odstranit. Také to chce trochu vlastního rozumu a technické inteligence, protože nikdy nemůžeme vyloučit, že došlo k nějaké nechtěné chybě při tvorbě článku, elektrického schématu nebo technické dokumentace. V dnešní době je nejspíše dostupným zdrojem informací především internet. Ale pozor, tady platí obezřetnost dvojnásob, protože jak se říká, papír a internet snese všechno ☺ Velice vhodnou literaturou jsou například technické články od Honzy OK2BNG [2], které svojí podstatou popisují spíše problematiku zesilovačů pro KV, ale většina věcí platí obecně a je možné je uplatnit i na VKV...

Uvedený zesilovač vykazuje následující parametry:

- Dosažitelný výkon trvale pro jednodécibellovou kompresi bez omezení doby provozu 1000W PEP na 50Ω (typicky 1500W do limitace).
- Zesílení větší než 10dB (typicky 12dB).
- Účinnost větší než 50 procent (typicky 55%).
- Napájecí napětí jednofázové 230V/ 50Hz.
- Vstupní PSV menší než 1,5 pro celý rozsah buzení (útlum odrazu větší než 14dB).
- Omezení nárazového proudu soft startem.
- Nastavení klidového proudu (pracovní třídy).

- Maximální teplota chladícího vzduchu 80C°.
- Indikace anodového proudu a výstupního výkonu, indikace teploty výstupního chladícího vzduchu, indikace provozního stavu.
- Celkový vypínač a nezávislý vypínač anodového napětí.
- Spínání PTT zesilovače kladným i záporným nízkoproudovým rozhraním s možností Stand – By režimu.
- Podsvětlení měřících přístrojů pro práci ve stížených světelných podmínkách.
- Dvoustupňová regulace množství chladícího vzduchu s možností přepnutí na maximální chladící výkon.

Základní součástí každého elektronkového zesilovače je anodový obvod, jehož úkolem je transformovat relativně nízkou impedanci připojené zátěže (antény) k optimální zatěžovací dynamické impedanci elektronky. Mimo vlastní transformaci impedance anodovým výstupním obvodem nám také tento obvod zásadním způsobem ovlivňuje elektrickou účinnost vlastního zesilovače a filtrační schopnosti pro vyšší harmonické produkty. Existuje několik technických možností, jak anodový obvod řešit. Nejčastěji se používá těchto základních provedení:

- **Anodový obvod se Strip Line délkou $\lambda/4$** , jehož výhodou jsou poměrně malé rozměry a poměrně dobrá mechanická stabilita. Nevýhodou je značná mechanická náročnost, velmi vysoké nároky na izolační materiály a nemožnost galvanického oddělení vysokého anodového napětí na přizpůsobovacím vedení.
- **Anodový obvod s transformačním úsekem koaxiálního vedení.** Toto řešení vykazuje nejlepší vlastnosti z hlediska mechanické stability, dosažitelné účinnosti, zisku a maximálního výkonu. Nevýhodou jsou velké rozměry, které jsou dány délkou vedení $0,3\lambda$ a pro 144MHz vychází délka tohoto vedení okolo 65cm! Toto řešení je tak velmi výhodné pro vyšší kmitočty nebo pro opravdu výkonné PA, kde nezáleží příliš na vlastních rozměrech (EME).
- **Anodový obvod s cívkou v anodě.** Toto řešení je určitým kompromisem, umožňuje velmi malé konstrukční uspořádání, snadné naladění a poměrně dobrou účinnost. Nevýhodou je nízká mechanická stabilita a je tak nutno provádět za provozu doladování anodového obvodu díky změnám mechanických rozměrů cívky vlivem změn teploty.

Byl zvolen anodový obvod s cívkou v anodě. Obrovskou výhodou jsou především velmi malé rozměry anodového obvodu a poměrně jednoduchá konstrukce. Jak bylo řečeno výše, tak bohužel v reálném provozu, kdy se mění poměr mezi vysláním a příjmem se tak nevyhneme teplotním změnám a nutně tak dochází i k mechanickým dilatacím rozměrů cívky. Je proto nutné občasné doladování zesilovače ladícím kondenzátorem na maximální výstupní výkon. To je vhodné provést v počátku, kdy je zesilovač ještě podchlazen, a pak většinou stačí druhé doladění v provozním stavu, kdy se elektronka ohřála na provozní teplotu. Další nevýhodou je značně vysoké napětí na otevřeném konci rezonančního obvodu, které dosahuje až několika desítek kV, a je úměrné zvolenému provoznímu Q. Výstupní vazba do antény je řešena klasicky jako kapacitní, protože se na rozdíl od vazby induktivní jednoduše nastavuje na optimální funkci.

Návrh anodového zdroje a výpočet filtrační kapacity:

Anodový zdroj je řešen jako klasický jednofázový s transformátorem. Vzhledem k požadovanému špičkovému výstupnímu výkonu okolo 1500W a účinnosti okolo 50% je nutný špičkový výkon transformátoru 3000W. Autorovi tohoto zesilovače se podařilo sehnat

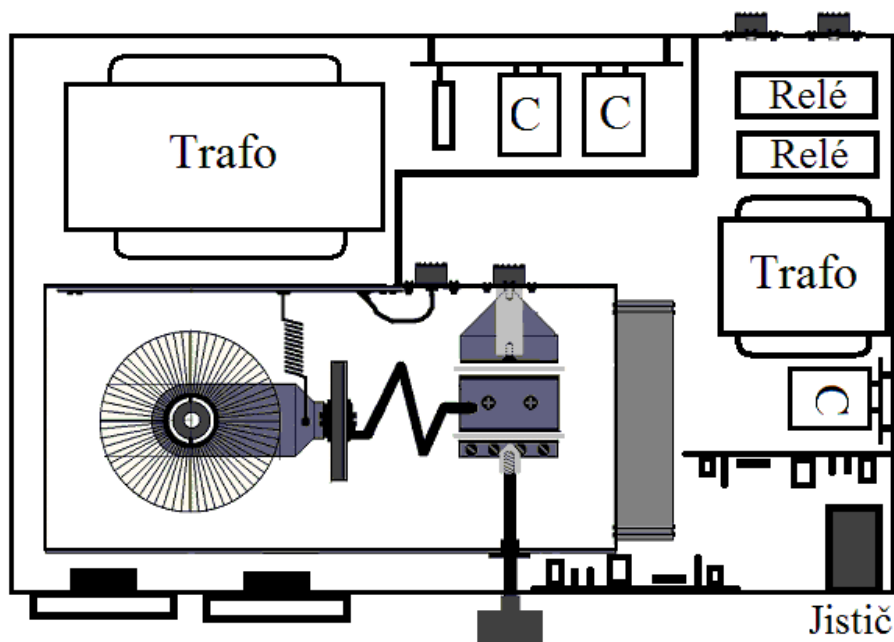
transformátor s orientovanými plechy se štítkovou hodnotou trvale 2000VA, který umožňuje krátkodobě 1,5 násobné přetížení. Tento transformátor, jak se později ukázalo, se pro tento účel hodí velmi dobře a ani po 24 hodinovém provozu při plném zatížení nedošlo u něj k výraznému oteplení. Primární vinutí je navinuto na 230V/50Hz a sekundární vinutí je rozděleno do 4 sekcí po 600V eff. Tato varianta je výhodnější z důvodu lepší filtrace a také umožňuje větší bezpečnost při ožiování, kdy je možno zesilovač napájet jen ze 2 nebo 3 sekcí anodového zdroje. Pro usměrnění byly použity klasické usměrňovací můstky na 1000V/10A, které jsou izolovaně umístěny a proudově i výkonově předdimenzovány, aby se nemusely umísťovat na chladič. Maximální napětí je přibližně $U_{max} = 1,41 \times 600 = 850V$. Proto je každá sekce filtrována dvěma sériově zapojenými elektrolytickými kondenzátory na 450V. Filtrační kapacita je vypočtena z následujícího odvozeného vzorce z náboje:

$$\begin{aligned} Q &= C \, dU_c \\ Q &= I_c \, dt \end{aligned} \implies C \, dU_c = I_c \, dt \implies C = \frac{I_c \, dt}{dU_c} \quad [F]$$

Po dosazení za $I_{cmax} = 1A$, $dt = 0,01s$ (pro dvojcestný usměrňovač je $f = 100Hz$), maximálního napětí 850V a při zanedbání úbytku napětí na transformátoru vyžadujeme, aby napětí nekleslo pod 750V (zvlnění 12%). Z předchozího vztahu tak vychází $dU_c = 100V$. Po dosazení do vzorce vyjde potřebná filtrační kapacita cca 100uF. Do této konstrukce se podařilo zakoupit nové elektrolytické kondenzátory 470uF/450V, které po sériovém zapojení mají výslednou kapacitu cca 235uF. Zdroj je velmi tvrdý a zvlnění je tak menší než 10%. Po sériovém propojení je výsledné napětí na prázdko $U_a = 3400V$ a i při plném zatížení neklesne pod cca 2900V.

Praktická realizace výkonového zesilovače s elektronikou GS35b

Jednou z podmínek realizace zesilovače byla nutnost použít kompaktní konstrukci pro možnost častého převážení zesilovače na různá stanoviště a zároveň dosažení vysoké provozní bezpečnosti, protože tak odpadne komplikované řešení propojky vysokého napětí z externího zdroje. Proto je v zesilovači umístěn i vlastní anodový zdroj s rozměrným transformátorem a filtračním obvodem ve zdroji VN. Vlastní konstrukce byla již dopředu omezena rozměry sériově vyráběného svařovaného nosného ocelového rámu, původně určeného pro výkonový oddělovací zdroj. Rozměr tohoto rámu je 480x350x240mm. Z tohoto důvodu bylo nutné velmi důmyslně dopředu rozvrhnout vlastní umístění jednotlivých celků a využít každého volného místa. Dalším požadavkem z důvodu bezpečnosti bylo i vnitřní oddělení anodového zdroje s nebezpečným stejnosměrným anodovým napětím téměř 3,5kV od slaboproudého rozvodu a ovládacích obvodů.



Obr.1 Vnitřní uspořádání výkonového zesilovače.

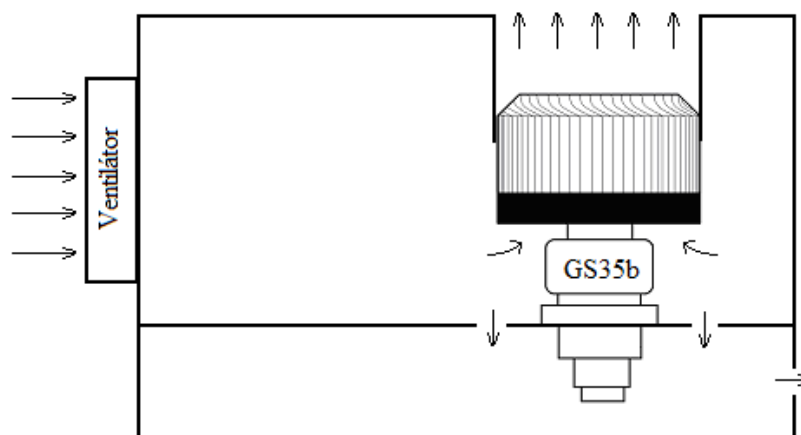
Bezpečnost především

Je nutno si uvědomit, že zesilovač vyžaduje ke své funkci tvrdý anodový zdroj s vysokým stejnosměrným napětím 3,5kV/1A, navíc podpořený vysokou kapacitou vyhlazovacích kondenzátorů, které jsou schopny dodat do zkratu proud až desítek A! Konstrukci tohoto zesilovače a vlastní oživování může provádět pouze pracovník s příslušným paragrafem vyhlášky 50/1978. Pro jednofázové napájení zesilovače ze sítě 230/50Hz je nutné použít třívodičové připojení a vše důkladně nulovat. Na zadní straně musí být navíc umístěna ochranná zemní svorka pro dodatečné uzemnění a je vhodné provést pospojování s dalšími připojenými zařízeními (především s radiostanicí). Celý zesilovač musí být dostatečným způsobem zakrytován a musí být zabráněno dotyku na vysoké napětí. Anodový zdroj musí mít vlastní síťový vypínač a vlastní jistící prvek (možno kombinovat jističem). Na viditelném místě na zesilovači musí být umístěna tabulka varující před vysokým napětím. Vzhledem k vysokému výstupnímu výkonu musí být zesilovač zároveň zakrytován s ohledem na ochranu před nebezpečným neionizujícím zářením. To se týká především vstupů a výstupů chladícího vzduchu, na kterých musí být umístěna ochranná stínící mřížka. Při oživování zesilovače je nutné si důsledně uvědomit rizika spojená s úrazem elektrickým proudem a každý krok důkladně rozmyslet. Neopatrnost se nevyplácí a při takto vysokém napětí končí zpravidla smrtí! Oživování je vhodné provádět za asistence (kontroly) druhé osoby, která má opět příslušný paragraf vyhlášky 50/1978, a která je seznámena s pravidly první pomoci. Při jakémkoliv zásahu do anodového obvodu je nutné vždy vypnout anodový zdroj, počkat až dojde k vybití kondenzátorů a poté vše ještě vybit a uzemnit pomocnou zemní svorkou.

Chladicí systém

Vzhledem k výstupnímu výkonu zesilovače špičkově okolo 1500W PEP a účinnosti něco málo přes 55% musíme zajistit odvedení téměř 1200W tepla vyvinutého na anodě elektronky. Při použití modulace SSB a CW, pro které je zesilovač určen, je střední výkon výrazně nižší (na rozdíl od modulace FM, u které bychom museli uvažovat plný ztrátový výkon), takže můžeme počítat trvalý střední ztrátový výkon okolo 800 – 1000W podle nastavení klidového

proudu a poměru mezi vysíláním a příjmem. Jelikož se jedná o keramickou triodu GS35b, je potřeba realizovat speciální systém chlazení. Chladič elektronky (radiátor) tak musí být umístěn ve vzduchové trati, do které je buď vtačován vzduch pomocí turbíny, nebo je z ní odsáván vzduch pomocí ventilátoru. První řešení pro větší výkonové ztráty především u větších elektronek je účinnější, ale je nutno použít obtížně sehnatelnou a drahou turbínu. Druhý způsob umožňuje použít k odsávání běžně dostupný „mezaxiál“, kterým je možné vzduch s dostatečnou účinností odsávat. U této konstrukce bylo zvoleno kompromisní řešení, kdy byl použit výkonný stejnosměrný ventilátor s napájecím napětím 30V o rozměru 120x120x38mm, který byl určen pro chlazení měničů. Vydatnost vzduchu je okolo 250m³/h. Tato hodnota samozřejmě se zvyšujícím se odporem vzduchové trati výrazně klesá a je nutno použít pro přesnější stanovení graf závislosti množství vzduchu na tlaku dodávaný výrobcem ventilátoru. Praxe ukázala, že systém, kdy netradičně použijeme ventilátor způsobem, aby vzduch „tlačil“ do anodového boxu a následně skrz „komínek“ elektronky, je dostatečně efektivní až do ztrátového výkonu okolo 1100W. Záleží na teplotě okolního vzduchu. Ani při dlouhodobém provozu během radioamatérských závodů, které trvají 24h, kdy teplota uvnitř místnosti dosahovala okolo 30C°, nepřekročila teplota výstupního vzduchu 60C°. To platí pro nejčastěji používané druhy provozu SSB a CW, pro FM musíme počítat přibližně s polovičním výstupním výkonem. Pokud bychom chtěli využít u této elektronky plné výkonové ztráty, tj. 1500W, což by odpovídalo výstupnímu výkonu okolo 2kW PEP, tak by již tento systém chlazení byl málo efektivní a muselo by se přistoupit k použití výkonné turbíny. Pro plný výkon je doporučené množství vzduchu skrz chladič okolo 150m³/h, což je běžným axiálním ventilátorem nedosažitelná hodnota ani v režimu odsávání vzduchu z dutiny! Důležité je, aby teplota výstupního vzduchu nepřesahovala cca 90C°, což by naznačovalo špatné chlazení elektronky, které by mělo za následek její sníženou životnost a v extrémním případě až její zničení. Maximální dovolená teplota chladiče elektronky GS35b je okolo 200C°. K dlouhodobé životnosti nepřispívá ani podchlazování elektronky, kdy prudké změny teploty mezi režimy příjem a vysílání způsobují rozdílné dilatace materiálů a dochází tak k mechanickému namáhání zátavů kov – keramika. V kritickém okamžiku může dojít až k mechanické destrukci, případně k průniku vzduchu do elektronky se všemi důsledky! Velmi vhodná je tak alespoň základní stabilizace teploty realizovaná dvoustupňovým řízením otáček, kdy v režimu příjmu je zapnut ventilátor se sníženými otáčkami a při přechodu na vysílání vhodné relé překlenuje „srážecí“ odpor. Při intenzivním závodním provozu je navíc možné tento kontakt relé nahradit kolébkovým vypínačem umístěným na předním panelu a chladit tak elektronku maximálním proudem vzduchu. Složitějším způsobem je možné realizovat regulátor otáček v závislosti na teplotě vystupujícího vzduchu a udržovat tak přibližně konstantní teplotu při obou režimech. U elektronky GS35b navíc výrobce doporučuje chladit i spodek elektronky, kdy postačí vyvrtat několik chladících otvorů o průměru okolo 10mm poblíž spodku elektronky. Těmito otvory necháme proudit malou část chladícího vzduchu a vzniklá cirkulace ve spodní uzavřené části anodového boxu je již dostatečná pro chlazení katody elektronky.

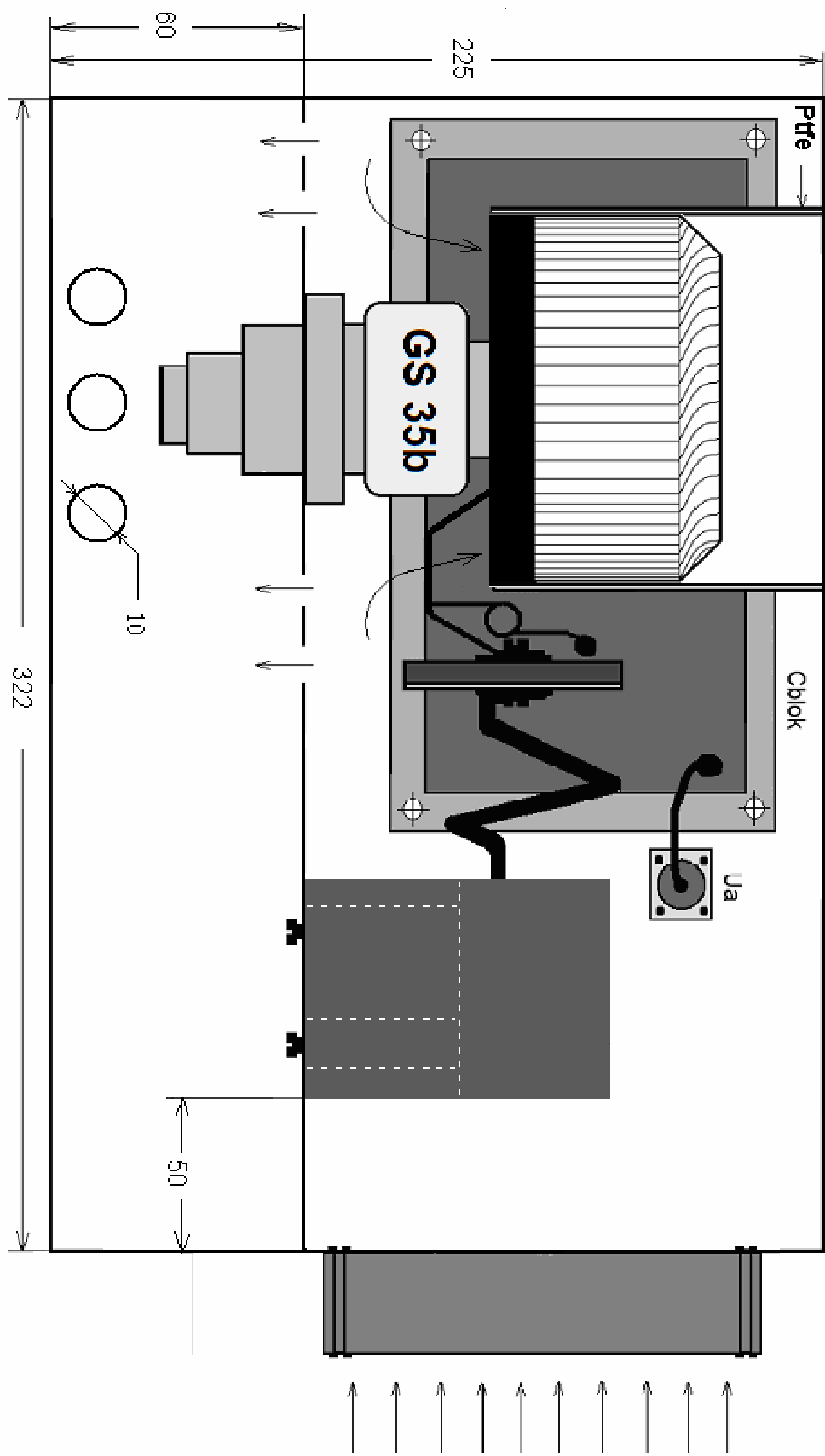


Obr.2 Ukázka použitého systému chlazení keramické triody GS35b.

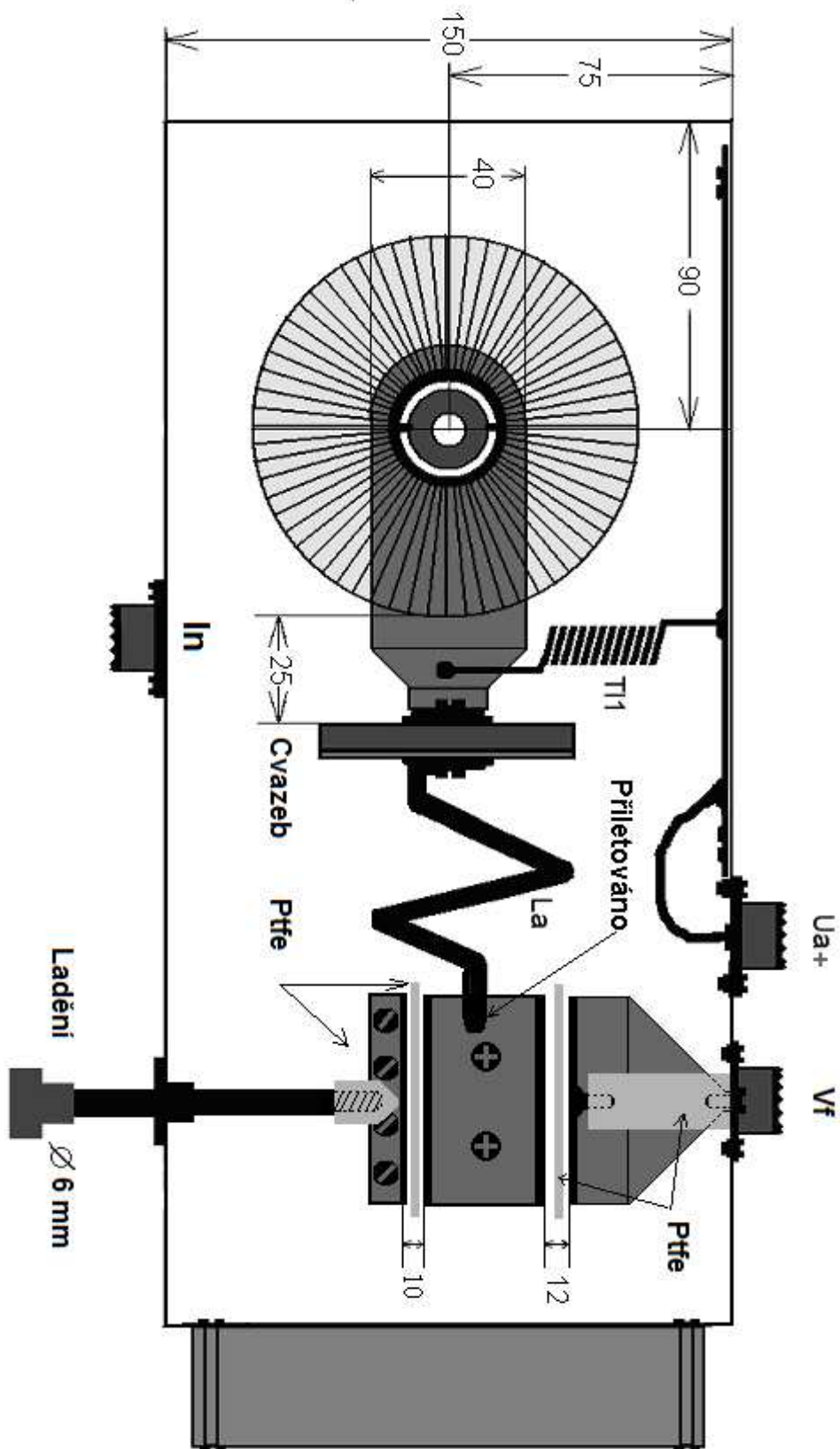
Mechanická konstrukce anodového boxu

Nejdůležitější součástí celého zesilovače je anodový box, ve kterém je umístěna elektronka a celý anodový obvod. Při konstrukci je nutno se vyhnout materiálům jako je mosaz, železný plech atd., které mají velmi malou vodivost. Nejvhodnějším materiálem pro konstrukci tak zůstává měď a hliník. Dobrých výsledků se dosáhlo i při konstrukci anodového boxu z tlustého kuprextitu, ale je nutno ho velmi dobře všude proletovat. Elegantnější je použít na výrobu 2 - 3mm tlustý hliníkový plech, který nastříháme na vhodné rozměry a v rozích spojíme úhelníky. Zajímavé je technické řešení kondenzátorů Czem a Cv, které lze bez problémů použít pro přenášený výkon. Vzhledem k vysokým cirkulačním proudům nelze použít klasické ladící kondenzátory se sběračem rotoru. Zároveň je nutno zajistit dostatečnou elektrickou pevnost mezi deskami. Těmto podmínkám bez problémů vyhoví ladící systém s proměnnou mezerou, u kterého není žádný pohyblivý kontakt a desky jsou dobře elektricky spojeny. Mezi deskami je vložena navíc izolační teflonová folie tloušťky 2mm pro zajištění elektrické pevnosti okolo 40kV. Hrany desek kondenzátorů musíme dobře zaoblit, aby nedocházelo k sršení koróny na hranách desek, kde je největší gradient elektrického pole. Anténí kondenzátor Cv je nastaven napevno na maximum výkonu a optimální provozní Q_p . Důležité je vyvedení ladění kondenzátoru Czem na předním panelu, protože tímto kondenzátorem se ladí anodový obvod. Jeho realizace spolu s ostatními díly je patrná z technických výkresů. Jako nosný prvek prostředního sloupku je nutné použít teflon, který jako jeden z mála plastů vyhoví z hlediska vř. ztrát. Pro připevnění měděného plechu ve tvaru U jsou použity samořezné šroubky, stejně tak i na uchycení tohoto sloupku ke dnu boxu. Tyč ovládající ladící kondenzátor je o průměru 6 mm, stejně tak jako standardně vyráběné kleštinové přístrojové knoflíky.

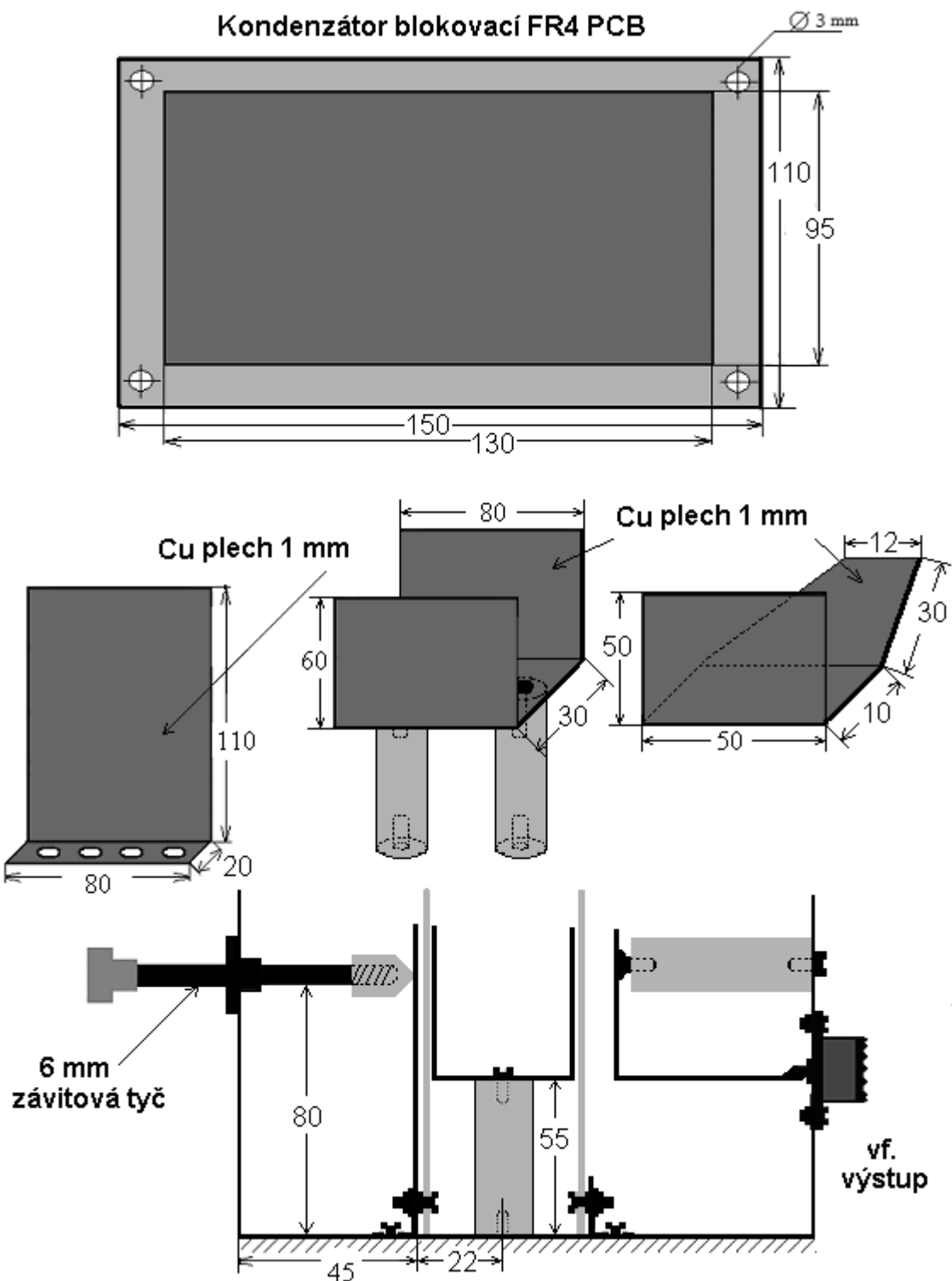
Na komínek, ve kterém je umístěna elektronka, musíme použít materiál, který dobře snáší vyšší teploty. Opět se osvědčil teflon, případně silikonová guma, která se dá velmi dobře nařezat a slepit. Kolem chladiče elektronky je umístěn stahovací pásek z mědi, který má stejnou roztažnost jako měděný chladič elektronky. K tomuto pásku je naletován měděný úchyt, ke kterému je následně přišroubován oddělovací keramický diskový kondenzátor pro napětí 4kV a kapacitě 1nF. Tento kondenzátor musí zároveň bez problému přenášet vysoký vř. výkon. Ruské diskové kondenzátory z armádních výprodejů jsou k tomuto účelu konstruovány. Za oddělovacím kondenzátorem je ze stejného plechu vyroben i úchyt cívky, kterým je cívka spojena na druhé straně s prostředním sloupkem. U takto realizovaného obvodu a boxu můžeme počítat s účinností cca 55%.



Obr.3 Anodový box z boku - rozměry a umístění.



Obr.4 Anodový box z vrchu - rozměry a umístění.



Obr.5 Ladící systém anodového obvodu a blokovací kondenzátor.

Popis elektrické části zesilovače

Napájení do zesilovače přivádíme vhodně dimenzovaným kabelem. Jako zásuvka na zadní straně zesilovače je použit běžně dostupný síťový konektor z počítačových zdrojů na 10A. Za ním použijeme vhodný síťový filtr, který zabrání rušení přicházející ze sítě a naopak. V nouzi postačí kondenzátory 2500pF typu Y zapojené proti zemi na napětí alespoň 500V. Dále následuje síťový vypínač, nejlépe se hodí robustnější kolébkový typ i s podsvícením. Pro

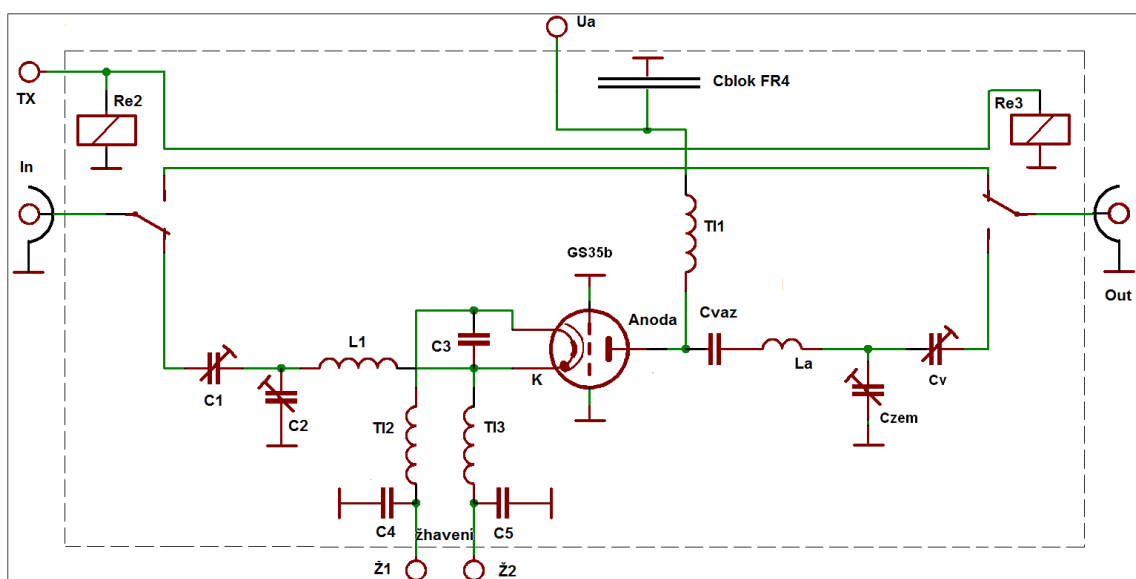
žhavení, elektroniku a předpětí vyhovuje transformátor cca 150VA. Tento transformátor má vlastní jištění 1A tavnou pojistkou. Anodový transformátor již byl popsán výše. Je použit transformátor 4x600Veff / 2000VA trvale. Tento transformátor je zapínán a jištěn 10A jističem. Pro takto výkonný zdroj je již nutno pro zapnutí použít tzv. soft start pro omezení nárazového proudu. Zároveň zvýšíme životnost elektrolytických kondenzátorů ve filtraci anodového napětí. Soft startér je tvořen samostatným modulem, který byl pro větší spolehlivost upraven (úprava hodnot setovacího obvodu). Tento modul je možné zakoupit v plzeňské firmě Metronix [3]. Místo původních termistorů byl v přívodu napájecího napětí použit externí odpor 16Ω/50W, který je po stanovené době překlenut dvojicí kontaktů výkonového relátka. Vlastní výstup soft startéru byl použit pouze pro zapnutí výkonového relátka na 230V.

Zesilovač zapínáme hlavním kolébkovým vypínačem, přičemž dojde k zapnutí žhavicího transformátoru a ovládací elektroniky včetně ventilátoru se sníženými otáčkami. Tento stav je indikován LED diodou modré barvy Ld1. Vysoké napětí 3,5kV je blokováno kondenzátorem C20, který by měl být alespoň na 5kV. Velmi nutné je do obvodu vysokého napětí zařadit do série tzv. „vybuchovací“ odpor složený z odporů R10 a R11 a tavné pojistky, který při případném průrazu v elektronce omezí zkratový proud. Použití dvou odporů v sérii je z důvodu snazšího zhasnutí oblouku. Do záporné větve umístíme měřicí přístroj s rozsahem 1,5A pro měření anodového proudu. Anodový zdroj zapínáme po dobrém nažhavení elektronky po době asi 3 minut jističem. Zapnutí signalizují LED diody Ld3 a Ld4, kdy LED dioda Ld4 červené barvy indikuje rozběh transformátoru přes odpor pro omezení nárazového proudu a překlenutí tohoto odporu relátkem je signalizováno zelenou LED diodou Ld3. Je nutné dodržet žhavicí napětí 12,6V při připojené elektronce v toleranci +-5%. Pomocná napětí jsou usměrněna a filtrována filtračními kondenzátory. Napětí pro ovládání a signalizaci 15V je dále stabilizováno třibodovým stabilizátorem IO1 78S12 na hodnotu 12V a proud 2A. Vzhledem k výkonové ztrátě je nutné tento stabilizátor umístit na vhodně dimenzovaný chladič. Napětí 35V DC je určeno pro napájení stejnosměrného ventilátoru, výkonového koaxiálního relé 18V a pro napájení stabilizátoru mřížkového předpětí. Napětí 18V pro koaxiální relé je vytvořeno stabilizátorem IO2 7818. Napětí potřebné pro úplné uzavření elektronky cca 60V je získáno sečtením napětí pro ovládací elektroniku a dalšího pomocného napětí 35V DC. Vlastní stabilizátor předpětí elektronky [4] je zapojen v principu jako paralelní regulovatelný stabilizátor napětí s nízkým vnitřním odporem, který je při vysílání připojen relátkem Re5. Tím dojde ke snížení předpětí ze 60V na otevírací napětí pro danou pracovní třídu zesilovače cca 26V. Toto napětí se nastavuje precizním víceotáčkovým trimrem Tp1. Zdroj předpětí je napájen ze stabilizátoru 28V vytvořeného ze 7824 podepřeného o Zenerovu diodu Zd1. Je možné případně použít i stabilizátor tvořený například regulovatelným zdrojem s LM317. Třibodový stabilizátor 7824 umístíme izolovaně na chladič. Přepnutí zesilovače do režimu vysílání je signalizováno LED diodou Ld2 červené barvy. Na předním panelu je zároveň umístěn vypínač, který umožňuje přepnout zesilovač do tzv. STAND-BY režimu, kdy nedojde po zaklíčování k přepnutí zesilovače do stavu vysílání, ale zesilovač se chová jako průchozí. Relé Re4 při vysílání překlenuje odpor R18, a tím zvýší otáčky chladicího ventilátoru. To samé můžeme provést i vypínačem Ventilátor On, který umístíme na přední panel a můžeme tak v případě potřeby zvýšit účinek chlazení. Vlastní ovládací logika tvořena tranzistory Tr1 a Tr2 je řešena poměrně jednoduše a umožňuje zesilovač spolehlivě ovládat jak kladným napětím 7 - 12V (rdst. Nekom BMT 226), tak i běžnějším klíčováním proti zemi (FT 847 atd).

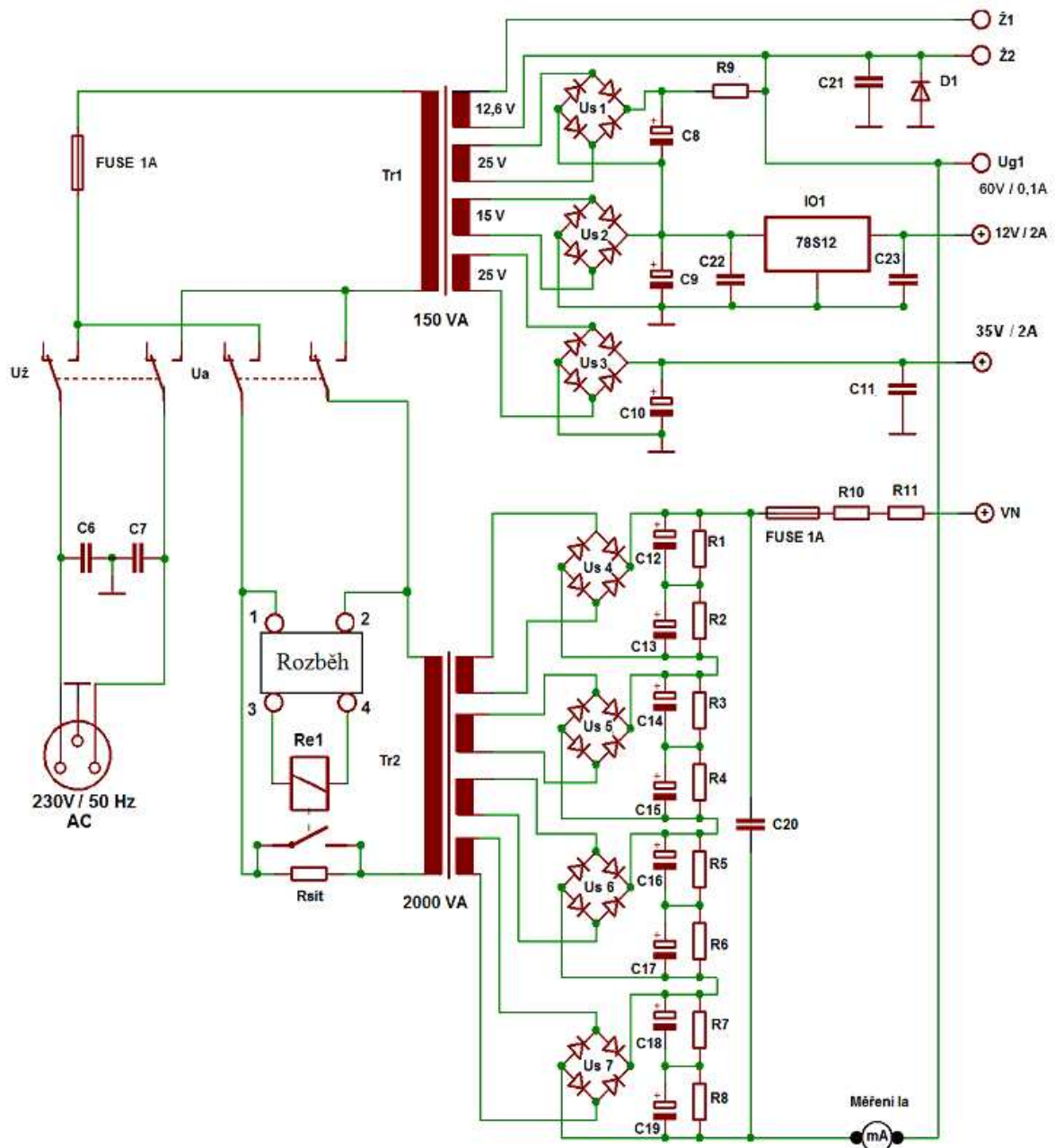
Pro indikaci výstupního výkonu je uvnitř anodového boxu umístěna malá měřicí anténka délky 5cm. Signál z této anténky je usměrněn vhodnou diodou a filtrován RC článkem R40, C53. Pro měření použijeme ručkový měřicí přístroj 100uA a kalibraci provedeme trimrem Tp4. Pro zvýšení komfortu ovládání a snazšího vyladění zesilovače na maximální výkon je

součástí zesilovače měření výkonu na bázi bargrafu složeného z 50 LED diod. Toto zapojení je odvozeno z katalogového zapojení známého obvodu pro buzení sloupce LED diod LM3914. Spojením pěti těchto obvodů bylo dosaženo poměrně velmi přesného indikátoru vybuzení, který se ukázal jako výborná pomůcka při ladění zesilovače. Nastavení se provádí trimrem Tp3. Další užitečnou pomůckou je i vestavěný teploměr, který umožňuje okamžité sledování teploty vycházejícího vzduchu z komínku. Jako čidlo teploty je použit obvod LM35 v pouzdru TO92, jehož výstupem je již přímo napětí úměrné teplotě, konkrétně 10mV/C°. Toto napětí je děličem 1:10 převedeno na úroveň, kterou již můžeme snadno indikovat přímo digitálním panelovým V-metrem 200mV, který nám bude již ukazovat konkrétní teplotu ve stupních C°. Výhodou tohoto zapojení je, že se u něho nic nenastavuje a přesnost měření je pro náš účel dostatečná. V době konstrukce tohoto zesilovače byl k dispozici digitální panelový měřicí přístroj, který ke své funkci vyžadoval zvláštní napájecí zdroj, a nebylo u něj možné propojení měřicí a napájecí země. Proto byl použit galvanicky oddělený DC / DC měnič ze staré síťové karty.

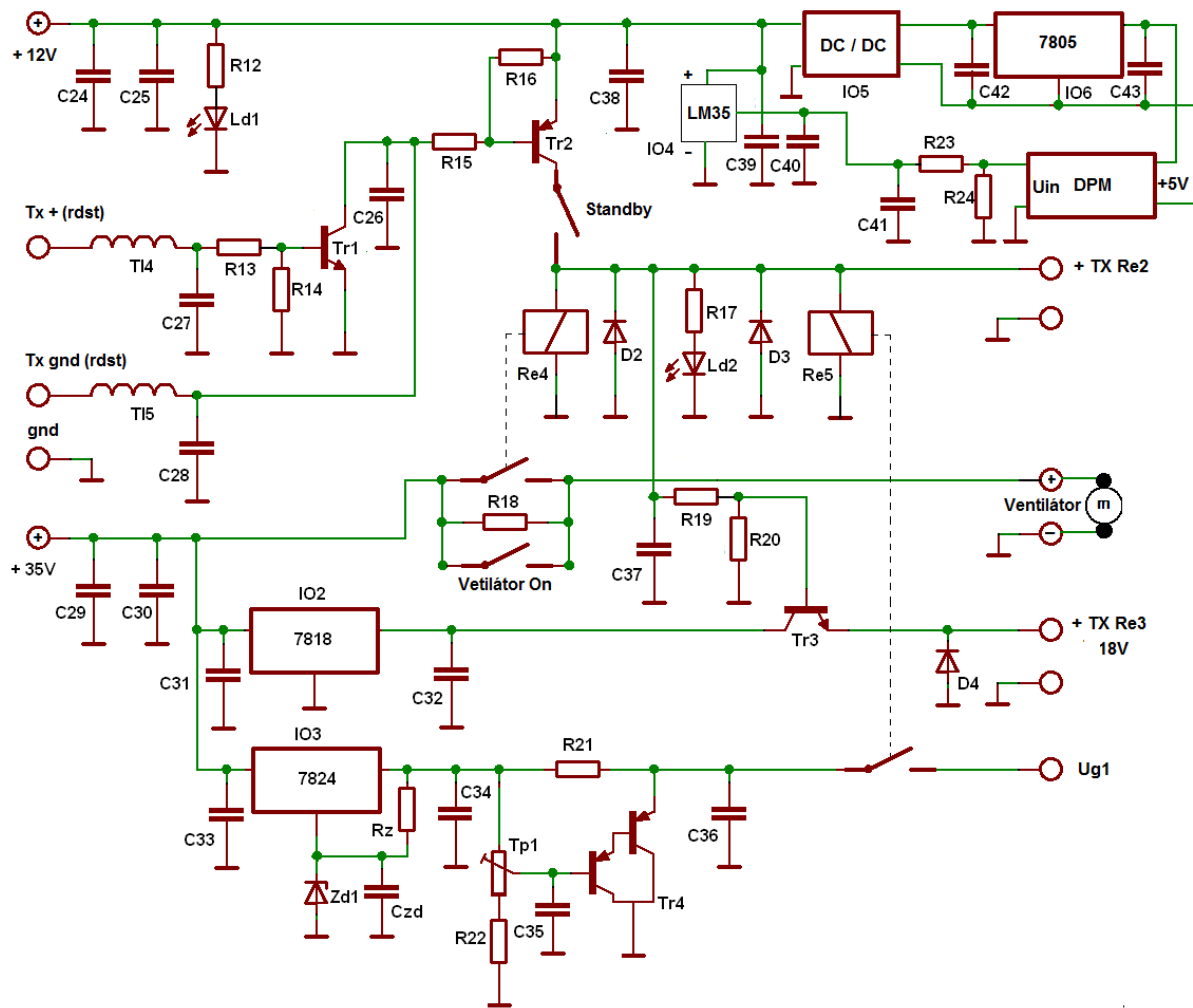
Elektrické zapojení vlastního zesilovače je na samostatném schématu. Vstupní signál je připojen koaxiálním kabelem z Re2 na vstupní přizpůsobovací obvod tvořený C1, C2, L1, kterým přizpůsobujeme odlišnou vstupní impedanci elektronky k výstupu radiostanice. Jako relé Re2 lze použít například běžné QN 599 26 z radiostanic VR, které je praxí odzkoušeno a umožňuje spínat až výkony okolo 100W na 144 MHz. Toto relé je vhodné umístit přímo do spodní části anodového boxu k přizpůsobovacímu obvodu. Jako relé Re3 musíme bezpodmínečně použít robustní koaxiální relé nejlépe s N-konektory, které přenesou alespoň 1500W na 144MHz. Kondenzátor C3 je běžný keramický na 500V a kondenzátory C4 a C5 jsou průchodkového typu, kterými se přivádí žhavicí napětí. Kondenzátory Czem a Cv jsou konstrukčního typu a jejich výroba již byla popsána. Velmi důležitý je blokovací kondenzátor Cblok, který pro co nejmenší parazitní indukčnost je realizován z jednostranného plošného materiálu FR4, který má dostatečnou elektrickou pevnost. Jeho rozměr je alespoň 130 x 95 mm a je přímo přišroubován k bokům anodového boxu. Je nutno se vyhnout paralelním spojováním diskových kondenzátorů, což bývá velmi častá chyba, protože uvnitř vznikne závit na krátko, který odsává pracně získanou vf. energii a mění ji v teplo. V tomto zapojení není použit pro přivedení VN napětí konektor, protože ten bývá také častým zdrojem problémů. Vysoké napětí je přímo do boxu zavedeno kvalitním VN kabelem, který je přímo přiletován na blokovací kondenzátor Cblok.



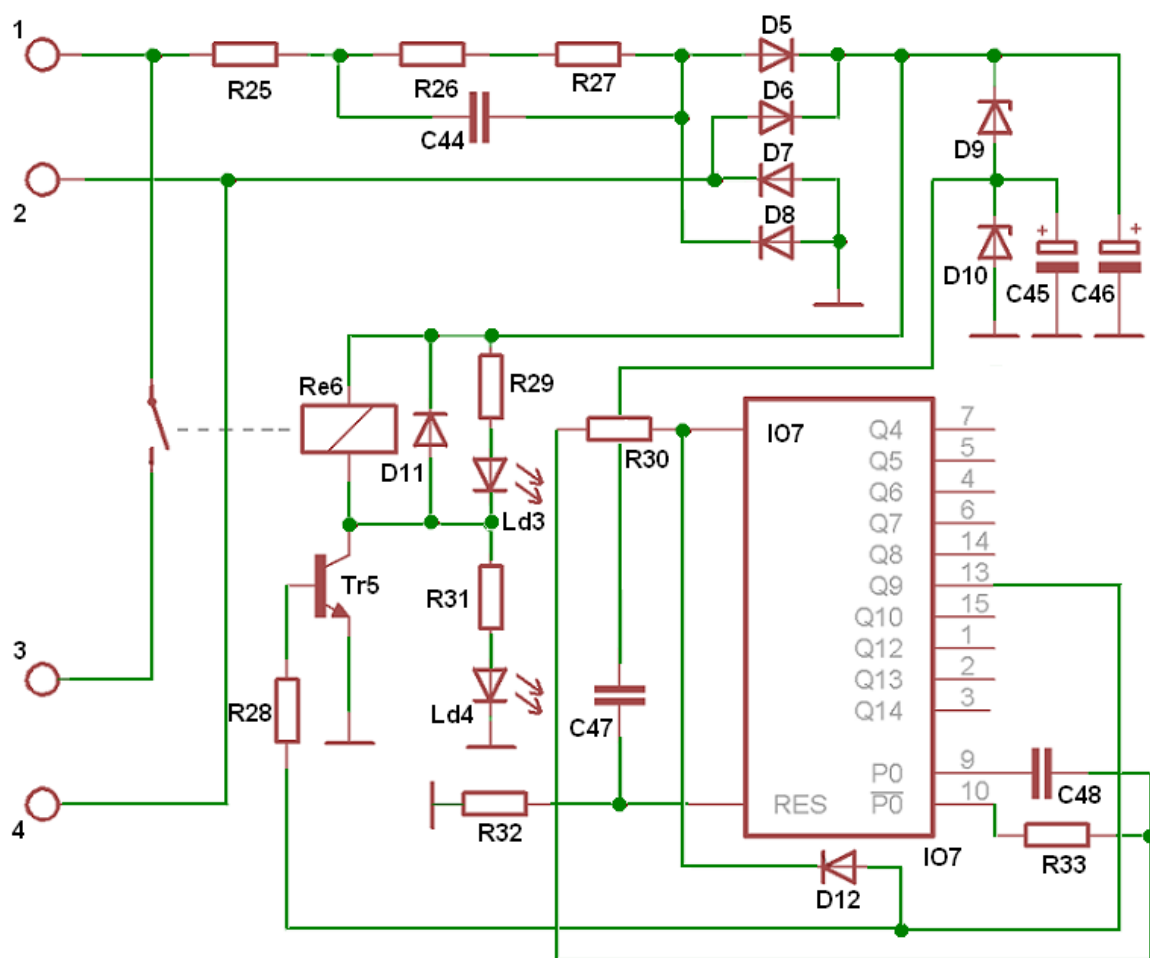
Obr.6 Schéma zapojení zesilovače uvnitř anodového boxu.



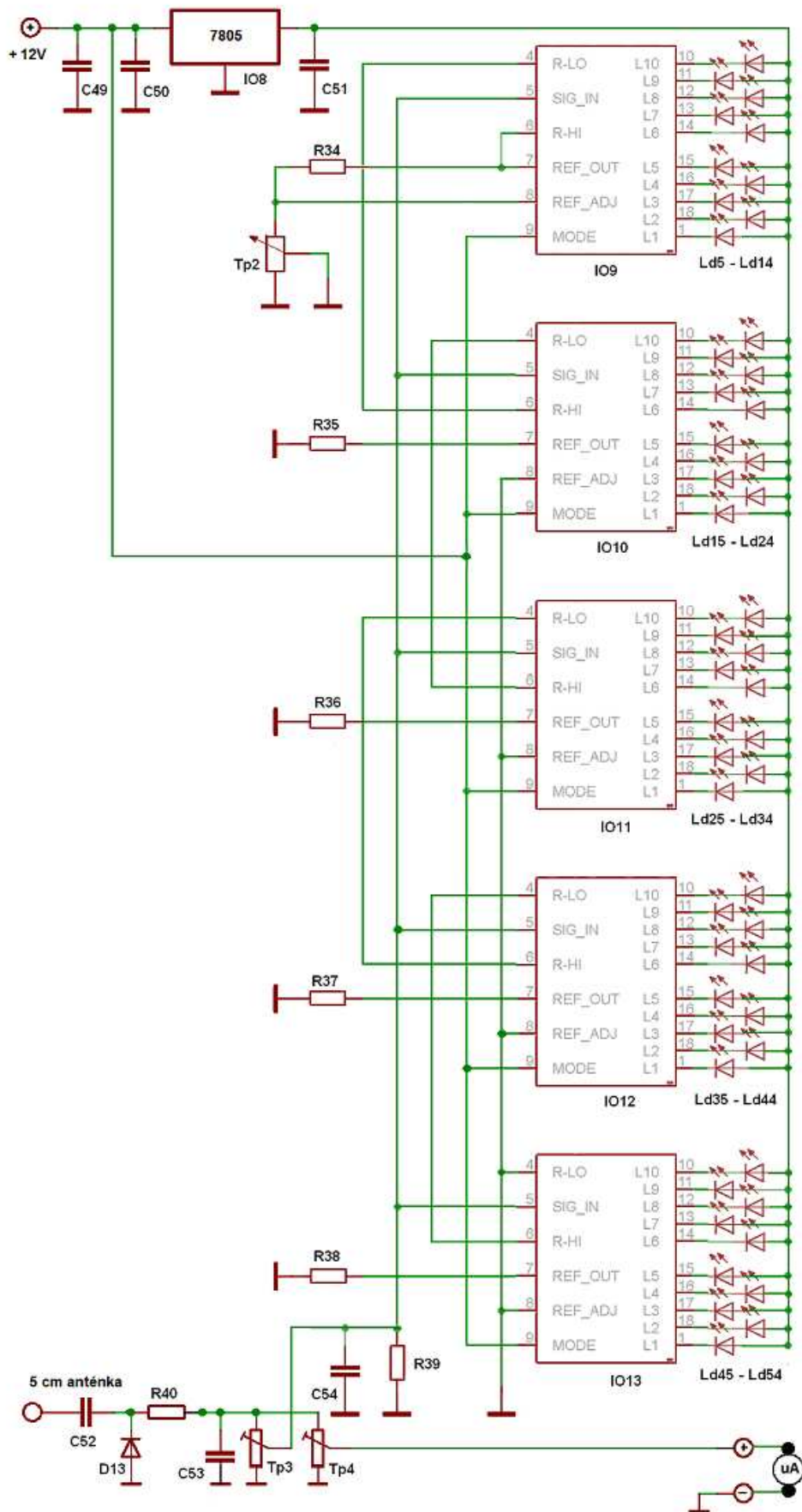
Obr. 7 Schéma zapojení zdroje pomocných napětí a anodového zdroje.



Obr.8 Schéma zapojení ovládací elektroniky a zdroje předpětí zesilovače.



Obr.9 Schéma omezení rozběhového proudu anodového transformátoru.



Obr.10 Schéma indikátoru vybuzení a měření výstupního výkonu.

Navíjecí předpis cívek

Cívka L1 ve vstupním přizpůsobovacím obvodu je tvořena třemi závity z měděného drátu o průměru 2mm, její vnitřní průměr je 13mm a délka je cca 45mm. Tlumivky T11, T12 a T13 jsou řešeny jako půlvlnné, navinuté smaltovaným vodičem o průměru 1 mm a vnitřní průměr cívky je 8mm. Počet závitů je cca 45. Vlastní anodová cívka je tvořena dobře vyleštěnou měděnou trubičkou o průměru 6 - 8mm.. Její vnitřní průměr je 60mm a je roztažena do délky 30mm. Cívka je tvořena jen jedním závitem. V praxi nedocházelo k větším rozdílům mezi postříbřenou a nepostříbřenou trubičkou. Veškeré spoje související s anodovým obvodem, především napojení anodové cívky na prostřední sloupek, je vhodné zajistit provrtáním a sešroubováním šroubkem M3 a poté vše důkladně proletovat. Je nutno myslet na to, že zde tečou poměrně veliké cirkulační vf. proudy.

Seznam součástek

Rsít.....16R/ 50W	Cvaz.....1 nF / 4KV
Rz.....1K8 / 0,5W	C1, C2.....5–15pF trimr
R1 – R8.....66k / 4W	C3.....1 nF / 500V
R9.....3k3 / 2W	C4, C5.....Průchodka 1nF
R10, R11.....2R7 / 2W	C6, C7.....2,5 nF / 500V Y
R12, R14, R17..1k / 0,5W	C8.....2,2 mF/50V Rad
R20, R40.....1k / 0,5W	C9, C10.....3,3 mF/35V Rad
R13, R19.....3k3 / 0,5W	C11, C24, C26-C29.....1 nF
R15, R16.....5k6 / 0,5W	C37-C41, C49, C53.....1 nF
R18.....39R / 2W	C54.....1 nF
R21.....470R / 2W	C12-C19.....470uF / 450V
R22.....1k5 / 0,5W	C20.....1 nF/ 5KV
R23.....2x18k / 1%	C21.....100 pF / 500V
R24.....1k / 1%	C22, C23, C25..100 nF / 63V
R25.....270 / 2W	C30-C36, C42...100 nF / 63V
R26, R27.....M33 / 0,5W	C43, C48, C50.100 nF / 63V
R28.....4k7 / 0,5W	C51.....100 nF / 63V
R29, R31.....3k6 / 0,5W	C44.....0,33 uF / 500V
R30, R32, R33..82k / 0,5W	C45, C46....47 uF / 25V
R34 - R38.....1k2 / 0,5W	C47.....220 nF / 63V
R39.....180k / 0,5W	C52.....47 pF / 63V
Cblok.....FR4 130x9mm	Czd.....100nF / 63V

Us1 - Us3.....1000V / 6A	IO1.....78S12
Us4 - Us7.....1000V / 10A D1 - D8,	IO2.....7818
D11.....1N4008	IO3.....7824
D12.....1N4008	IO4.....LM35
D9, D10.....ZD 12V/1,3W	IO5.....DC/DC měnič (CDDSW1 - 1205S)
D13.....GA206 Germ.	IO6, IO8.....7805
Zd1.....Zenerova dioda 4,3V	IO7.....4060
Tr1.....BC 141 NPN	IO9-IO13...LM3914
Tr2.....TIP 137 PNP	

Tr3.....TIP 112 NPN	Tp1.....5k víceotáčkový
Tr4.....BDW84 PNP	Tp2.....5k
Tr5.....BC 548 NPN	Tp3.....1k
Ld1.....LED modrá 5mm	Trafo 150VA a 2000VA
Ld2.....LED červená 5mm	Ventilátor 30V / 10W
Ld3.....LED zelená 5mm	
Ld4.....LED červená 5mm	
Ld5-Ld54..... LED moduly	

Oživení zesilovače

Oživování zesilovače provádíme po částech, kdy nejdříve zprovozníme vlastní anodový zdroj. Změříme jednotlivé sekce a pokud máme VN sondu, tak i výsledné anodové napětí 3,5kV. Anodový zdroj opět vypneme a počkáme dostatečně dlouho, než dojde k vybití kondenzátorů. Vždy je pak vhodné vše ještě opatrně vybit zkratovacím vodičem a nechat ho po dobu úprav připojený. Vše provádíme bez připojené elektronky. V dalším kroku již připojíme elektronku a změříme žhavicí napětí, zda je skutečně 12,6V v toleranci +- 5%. Dále kontrolujeme potřebné předpětí, které uzavírá elektronku. Mělo by být na katodě proti zemi cca 60V. Zkusíme zesilovač přepnout do polohy TX a kontrolujeme přepnutí všech potřebných relátek. Zároveň kontrolujeme, zda došlo k poklesu předpětí, které si nastavujeme trimrem Tp1. Pokud vše probíhá tak, jak má, necháme elektronku dobře nažhavit (minimálně 3min) a připojíme anodové napětí. Zesilovač zaklíčujeme a sledujeme anodový proud, kdy trimrem Tp1 nastavíme asi 150mA. Dále výstup zesilovače zatížíme dostatečně dimenzovanou umělou zátěží s připojeným W-metrem a do vstupu připojíme radiostanici přes PSV metr. Jako radiostanice se nejlépe hodí typ, který umožňuje vysílat i mimo radioamatérské pásmo 144MHz, a její výstupní výkon je cca 1W. Přeladováním radiostanice najdeme maximum výkonu. Laděním kondenzátoru Czem se snažíme, aby maximum leželo v požadovaném kmitočtovém pásmu 144MHz. Pokud se nám to nedaří, musíme změnit rozměry cívky, nejdříve stlačováním a roztahováním cívky, později případnou změnou její délky. Anténní vazbu nastavíme na maximum výstupního výkonu a současně se snažíme nastavit co nejlepší vstupní PSV kapacitními trimry ve vstupním obvodu. Zkusíme postupně zvyšovat budící výkon a současně opět nastavujeme vstup na nejlepší PSV a anodový obvod na maximální výstupní výkon. Ladění vyžaduje chladnou hlavu, dostatek prostoru a času. Pokud jsme úspěšní, měl by se výstupní výkon pohybovat okolo 1000W při buzení cca 50W a vstupní PSV by mělo být pro všechny rozsahy buzení menší než 1,5. Při buzení okolo 100W je zesilovač schopen odevzdat do limitace přes 1500W PEP. Ke konci kontrolujeme i účinnost zesilovače, která by měla být okolo 55%. Pokud se nám nedaří dosáhnout dobré účinnosti, tak problém bude pravděpodobně v malém nezatíženém Q dutiny. Možnou, ale méně pravděpodobnou variantou může být i špatná elektronka. Celé oživování zesilovače končíme přibližnou kalibrací jednoduchého měřiče výkonu, který si vhodně ocejchujeme, aby nám stupnice vyhovovala. Nastavíme i indikátor vybuzení tak, aby se při maximálním výkonu rozsvítila předposlední LED dioda. Při každém zapnutí zesilovače je vhodné po nažhavení a zapnutí anodového zdroje vizuálně zkontrolovat anodový proud při minimálním budícím výkonu při SSB. Dále radiostanici přepneme na CW a postupně budeme zvyšovat budící výkon a doladovat kondenzátorem Czem na maximum výkonu a minimum anodového proudu...

Závěr

Vzhledem ke kapacitní vazbě do antény, která má malé filtrační schopnosti pro vyšší harmonické produkty, je bezpodmínečně nutné za tento zesilovač umístit vhodný filtr typu dolní propust'. Vhodné provedení, které přenesení požadovaný výkon je popsáno například zde [5]. Pokud zesilovač máme v plánu provozovat i v závodním provozu, je vhodné provést i měření IMD produktů dvoutónovou zkouškou a změřit si bod jednodécibellové komprese. V nouzi postačí, pokud z protějšího kopce odměříme spektrálním analyzátozem spektrum vysílaného signálu. Vždy zesilovač používejte jen v lineární oblasti, tj. do cca 1kW. Myslete také na to, že zesilovač potřebuje poměrně veliký budící výkon 50-100W a že ještě důležitější je tak spektrální čistota samotného budiče. Bezpodmínečně se vyhněte polovodičovým koncovým stupňům osazených bipolárními tranzistory a napájenými 12V! Velmi vhodným řešením je použití moderního LDMOS tranzistorového zesilovače napájeného 50V, který provozujeme v lineární oblasti do bodu jednodécibellové komprese. Ještě jednou opakuji, že do stavby tohoto zesilovače by se neměl pustit začátečník ani laik a i provoz tohoto zesilovače by měl být v souladu s respektováním zásad ohleduplného chování. Na pásmu nejste sami a nezodpovědným přístupem neuděláte dobré jméno své značce. Děkuji za pomoc všem, kteří mi pomohli s návrhem a stavbou tohoto zesilovače. Hodně úspěchů na pásmech přeje Tomáš OK1GTH ☺.

Odkazy:

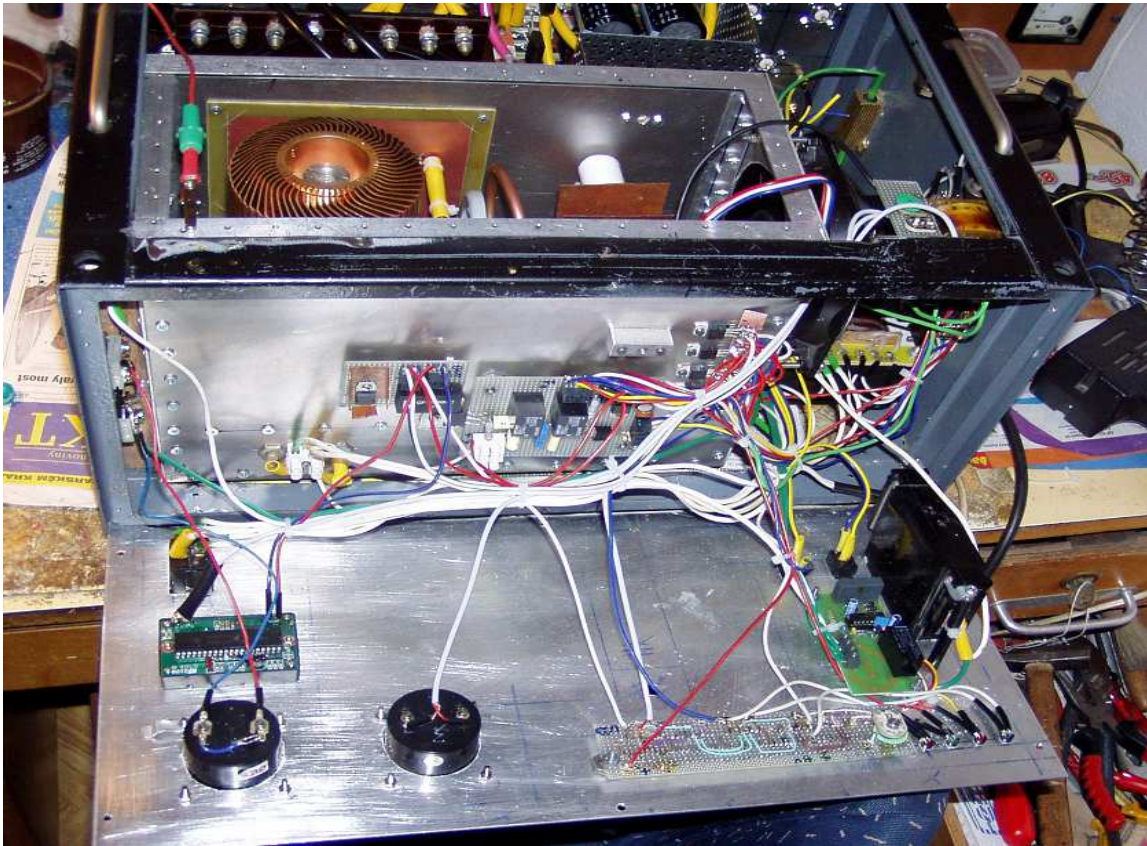
[1] <http://yu1aw.ba-karlsruhe.de/>

[2] Konstrukční poznámky ke koncovým stupňům - Jan Boček, OK2BNG

[3] <http://www.metronix.cz>

[4] http://www.ok2kkw.com/zdroj_predpeti_elektronky.htm

[5] RA 1/2010 – Dolní propust pro 144MHz – Ing. Tomáš Kavalír, OK1GTH



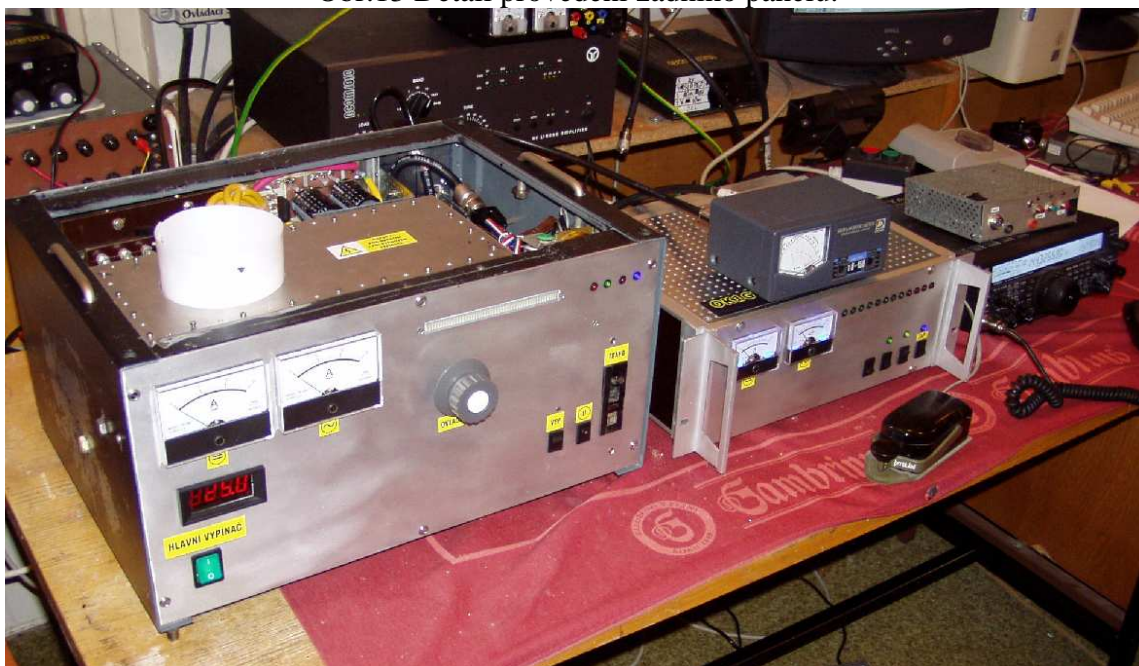
Obr.11 Anodový obvod a ovládací elektronika.



Obr.12 Finální provedení výkonového zesilovače.



Obr.13 Detail provedeni zadního panelu.



Obr.14 Zapojení zesilovače s budičem a radiostanicí.