



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Stavba elektronkového zesilovače

Max Novák

Střední škola elektrotechnická Lipník nad Bečvou, Tyršova 781

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Stavba elektronkového zesilovače

Max Novák

Olomoucký kraj

Lipník nad Bečvou 2025

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Stavba elektronkového zesilovače

Building an electronic amplifier

Autor:	Max Novák
Škola:	Střední škola elektrotechnická, Tyršova 781, 751 31, Lipník nad Bečvou
Kraj:	Olomoucký
Vedoucí práce:	Jaroslav Frankovič
Konzultanti:	Ing. Lukáš Koziel, Vít Elisek

Lipník nad Bečvou 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze ročníkové práce jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Lipníku nad Bečvou dne: 31. 3. 2025

Max Novák

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce, panu Jaroslavu Frankovičovi, za pomoc při zpracování práce, za připomínky k písemné části práce i k části praktické. Dále bych chtěl poděkovat za podporu mé rodině a všem, kteří mi byli při zpracování nápomocni.

Anotace

Práce se zabývá teoreticky a prakticky stavbou elektronkového zesilovače o výkonu 15 W. Aktivní prvky zesilovače tvoří koncové elektronky EL84 a jedna trioda ECC83. Cílem práce je stavba funkčního elektronkového zesilovače. Práce obsahuje návrh a design zesilovače, schémata zapojení a návrh plošného spoje.

Klíčová slova

Elektronka; zesilovač; transformátor; dvoucestný usměrňovač; trioda

Anotation

The thesis deals with the theoretical and practical construction of a 15 W tube amplifier. The active elements of the amplifier consist of EL84 power tubes and one ECC83 triode. The aim of the thesis is to build a functional tube amplifier. The thesis includes the proposal and design of the amplifier, wiring diagrams and printed circuit board design.

Keywords

Vacuum tube; amplifier; transformer; two-way rectifier; triode

Obsah

Úvod.....	8
1 Teorie	9
1.1 Elektronka	9
1.1.1 Trioda	12
1.2 Elektronkové zesilovače.....	13
1.3 Třídy zesilovačů	14
1.3.1 Zesilovače třídy A:	14
1.3.2 Zesilovače třídy B:	15
1.3.3 Zesilovače třídy AB:.....	15
1.3.4 Zesilovače třídy C	16
1.4 Transformátor	17
1.4.1 Sít'ový transformátor	18
1.4.2 Výstupní transformátor	18
1.5 Porovnání elektronkového a tranzistorového zesilovače	19
2 Stavba elektronkového zesilovače	20
2.1 Volba součástek	20
2.1.1 Elektronky	20
2.1.2 Pasivní součástky	20
2.1.3 Napájení a transformátory	20
2.1.4 Spoje a vedení signálu.....	20
2.1.5 Regulátory a ovládací prvky	20
2.1.6 Důraz na design a chlazení.....	21
2.1.7 Parametry a tolerance součástek	21
2.1.8 Mechanická konstrukce a bezpečnost	21
2.2 Schéma zapojení.....	22
2.2.1 Specifikace obvodu (vysvětlení)	23
2.3 Návrh úložné bedny (boxu) pro součástky zesilovače	24
2.4 Návrh plošného spoje	26
2.4.1 Návrh dvoucestného usměrňovače.....	28
2.5 Finální propojení a osazení	29
2.6 Měření elektronkového zesilovače.....	30
2.6.1 Kmitočtový rozsah	30
2.6.2 Minimální a maximální rozsah.....	31

Závěr.....	32
3 Seznam tabulek	33
4 Seznam obrázků	33
5 Zdroje	34

Úvod

Tato práce se zabývá stavbou elektronkového zesilovače. Přestože elektronky už nejsou nejmodernější a nejužívanější technologií, pořád se používají a ani o tom uživatelé nemusí vědět. Mnoho lidí si pod názvem „elektronkový zesilovač“ kromě zesilovače nepředstaví nejspíše nic. Pokud by si někdo vzpomněl, nejspíše by si položil otázku „Není to zastaré? Je to ještě k něčemu?“

Ovšem opak je pravdou, elektronky jsou stále využívány, převážně u muzikantů a lidí, kteří se zabývají např. audiem apod. Možná to bude překvapivé, ale elektronky používají také vojáci, protože tyto součástky jsou odolné proti elektromagnetickým impulzům.

Mým cílem bylo sestavení elektronkového zesilovače pro využití v oblasti audio elektroniky. Zdrojem elektrického (linkového) signálu bude zařízení s výstupem, například počítač, mobil, elektrická kytara a další.

Teoretická část se zabývá funkcí elektronkového zesilovače a částečným porovnáním s tranzistorovým zesilovačem, přiblížením principů, výhod a nevýhod tohoto typu zesilovače.

Praktická část se zabývá návrhem skříně pro uložení všech součástek, které jsem použil ke stavbě elektronkového zesilovače, dále návrhem desky plošného spoje a jejím následným zhotovením včetně celkového zapojení.

Doufám, že tato práce pomůže zájemcům o „elektronky“ připomenout, že něco takového existuje, funguje a má to stále svoje využití.

1 Teorie

1.1 Elektronka

Konstrukce elektronky se vyvinula ze žárovky díky objevu T.A. Edisona, který přišel na to, že kolem rozžhaveného vlákna (katody) žárovky umístěného ve vakuu vznikají elektrony. J. A. Fleming přidal do skleněné „baňky“ desku (anodu), přivedl na ni napětí a obvodem začal téct proud. Takto vznikla první elektronka (dioda). Lee de Forrest přidal do diody mřížku mezi anodu a katodu a tímto vznikla trioda a zesilovací prvek.

Princip elektronky: nejjednodušším druhem elektronky je dioda s přímým žhavením. Jedním zdrojem proudu je rozžhavena katoda. Druhý zdroj je připojen mezi anodu a katodu tak, aby anoda měla kladné napětí. Elektrony, které jsou teplem uvolněny z katody do okolního prostoru, budou přitaženy na anodu. Proud teče z anody ke katodě a elektrony jdou opačným směrem. Po přepólování zdroje napětí mezi katodou a anodou jsou uvolněné elektrony, které jsou odpuzovány a proud mezi anodou a katodou neteče a dioda pak funguje jako usměrňovač.

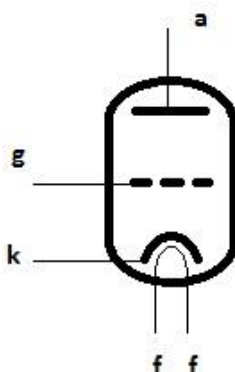
Aby elektronka fungovala, musí splňovat dvě základní podmínky. Na katodě musí vznikat elektrony a anoda musí být kladně nabitá.

Přidáním většího počtu mřížek se vytvářejí různé typy elektronek. Například tetroda obsahuje dvě mřížky, trioda má tři mřížky, a tento princip pokračuje až k enneodě, která má sedm mřížek. Počet mřížek ovlivňuje vlastnosti elektronky i její možnosti využití. Přehled typů elektronek, jejich vlastností a aplikací podle počtu mřížek je uveden v tabulce.

Název elektronky	Mřížky	Využití
Dioda	0	Usměrňovací
Trioda	1	Zesilovací
Tetroda	2	Zesilovací
Pentoda	3	Zesilovací
Hexoda	4	Směšovací
Heptoda	5	Směšovací
Oktoda	6	Směšovací
Enneoda	7	Speciální

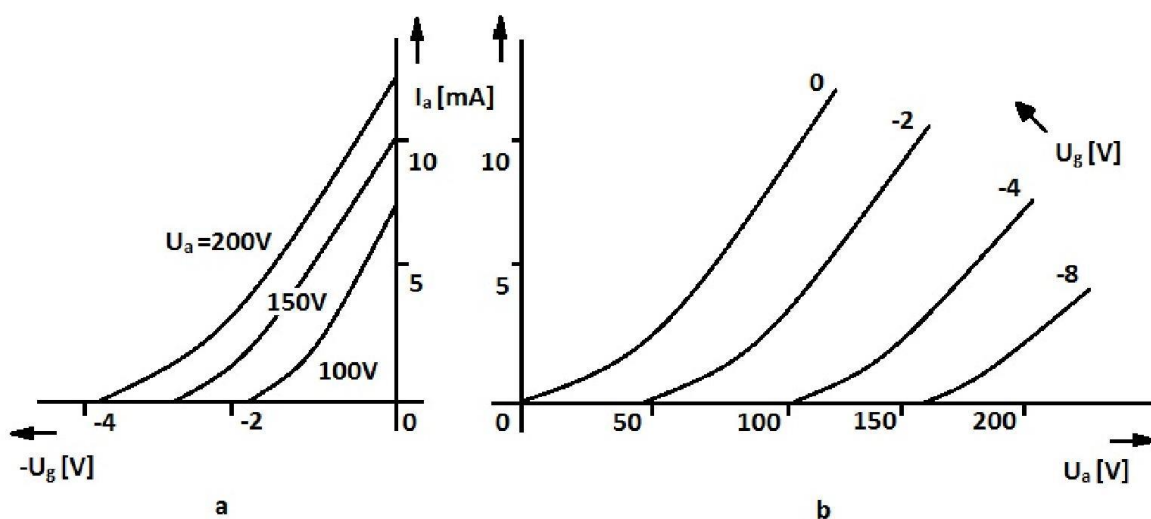
Tab.1: Typy elektronek

Na obr. č. 1 je znázorněna schematická značka triody. Anoda je označena písmenem **a**, katoda písmenem **k**, mřížka **g** a žhavicí vlákno potřebné pro emitování elektronů písmenem **f**.



Obr. 1: Schematická značka triody

Vlastnosti elektronek se určují pomocí anodové a převodní charakteristiky. Na níže uvedeném obrázku jsou zobrazeny charakteristiky triody. Z těchto grafů můžeme odvodit klíčové parametry elektronky, jako jsou strmost (S), vnitřní odpor (R_i), zesilovací činitel (μ) a průnik (D).



Obr. 2: Charakteristiky triody



Obr. 3: Ukázky elektronek

Na obrázku vlevo jsou ukázky různých elektronek, od triody až po „malé obrazovky“ nebo magické oko, které u starých radiopřijímačů sloužilo k indikaci naladění rozhlasové stanice. Na pravé straně obrázku je zobrazená elektronka, u níž došlo k rozbití její skleněné baňky.

1.1.1 Trioda

Trioda je elektronka se třemi elektrodami: katodou, anodou a řídicí mřížkou. Slouží jako zesilovač nebo spínač v elektronických obvodech.

Hlavní součásti triody jsou:

Katoda – zahřátá, emituje (vyzařuje) elektrony.

Anoda – sbírá elektrony a vytváří proud.

Řídicí mřížka – nachází se mezi katodou a anodou a reguluje tok elektronů.

Princip činnosti triody spočívá v tom, že zahřátá katoda emituje elektrony směrem k anodě. Mezi anodou a katodou je vysoké napětí, které přitahuje elektrony. Malá změna napětí na řídicí mřížce (mezi mřížkou a katodou) ovlivňuje velký proud mezi katodou a anodou.

Díky tomuto principu umožňuje trioda zesilovače signálů. Malé změny vstupního signálu na mřížce způsobují velké změny anodového signálu, což umožňuje zesílení signálů.

Trioda pracuje na principu řízeného toku elektronů mezi katodou a anodou pomocí elektrostatického pole řídicí mřížky. Důležitou vlastností triody je její proudový a napěťový zisk, který je dán zesilovacím činitelem (μ). Tento parametr vyjadřuje, jak velké zesílení signálu může dosáhnout v daném zapojení.

Jedním z hlavních parametrů triody je vnitřní odpor (R_a), který určuje, jak snadno může proud procházet mezi anodou a katodou. Tento odpor závisí na konstrukci triody a napětích na jejích elektrodách. Dalším důležitým parametrem je strmost (S), což je míra změny anodového proudu v závislosti na změně napětí na mřížce, udává se v jednotkách mA/V a je důležitá pro zesilovací schopnost triody.

Trioda se může používat v různých zapojeních, například jako zesilovač v zapojení se společnou katodou, kde poskytuje vysoké zesílení nebo jako elektronický oscilátor, kde ve spolupráci s rezonančním obvodem vytváří stabilní kmitočet. Speciálním režimem je taky zapojení jako spínací prvek, kde může sloužit k řízení výkonu v obvodech s nízkofrekvenčním i vysokofrekvenčním signálem.

Dalším důležitým aspektem je vliv parazitních kapacit mezi elektrodami, které mohou ovlivňovat frekvenční charakteristiku triody, hlavně v oblasti vysokých frekvencí. Pro potlačení nežádoucích oscilací se často používá neutralizační obvody nebo speciální zapojení mřížek.

Kromě klasické triody existují, jak už jsem zmínil výše, například tetrody, pentody, které zavádějí další elektrody (například: stínící mřížku) pro zlepšení výkonových vlastností a snížení nežádoucích efektů zpětné vazby, známé jako Millerův jev.

1.2 Elektronkové zesilovače

Elektronkový zesilovač je zařízení, které využívá elektronky, známé také jako vakuové trubice, k zesilování elektrických signálů. Elektronky byly klíčovou součástí elektroniky zejména v první polovině 20. století. Přestože jsou dnes z velké části nahrazeny polovodičovými součástkami, stále nacházejí využití v oblastech, kde vynikají svými specifickými vlastnostmi, například v audio technice nebo v některých průmyslových aplikacích.

Hlavní funkcí elektronkového zesilovače je zesilování signálu. Díky své schopnosti zvýšit napětí, proud nebo výkon signálu, jsou elektronkové zesilovače používány v mnoha oblastech. V audio technice jsou oblíbené pro svou schopnost přirozeného a teplého zvukového podání, které je často považováno za příjemnější než zvuk z tranzistorových zesilovačů. Elektronkové zesilovače se proto často používají v profesionální i domácí audiotechnice, zejména u hudebníků, zvukařů.

Další významnou funkcí elektronkových zesilovačů je jejich schopnost zpracovávat signály s minimálním zkreslením a jedinečnými harmonickými vlastnostmi. Tyto vlastnosti činí elektronky nenahraditelné, například v kytarových zesilovačích, kde jejich nelineární zkreslení přispívá ke specifickému charakteru zvuku.

I přes postupný úpadek elektronkových zesilovačů v mnoha oblastech zůstávají důležitou součástí specializované techniky. Jejich jedinečné vlastnosti zaručují, že mají své místo v audio technice, některých vysílačích a dalších zařízeních, kde výkon a kvalita signálu hrají hlavní roli.

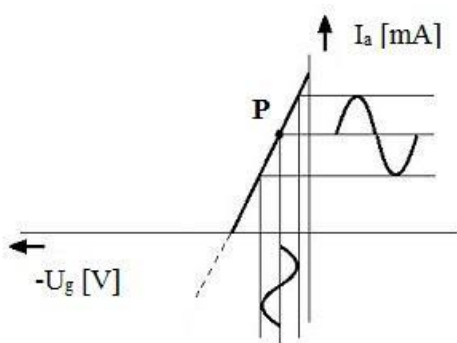
1.3 Třídy zesilovačů

Třídy zesilovačů označují způsob, jakým zesilovače zpracovávají signál a jak efektivně využívají elektrickou energii. Rozdělení do tříd se zakládá na pracovní oblasti aktivního prvku (například tranzistoru nebo elektronky) během zpracování signálu. Každá třída má své specifické vlastnosti, které ovlivňují účinnost, zkreslení a celkové použití zesilovače. Mezi základní třídy zesilovačů patří třída A, B, AB a C.

Kromě těchto základních tříd existují i pokročilejší třídy, jako třída D, E, F a další. Třída D je známá jako spínaný zesilovač, kde tranzistory pracují jako spínače v režimu zapnuto/vypnuto. Díky tomu dosahuje extrémně vysoké účinnosti (až 90 % a více) a využívá se zejména v moderních audio zesilovačích a napájecích zdrojích. Třídy E a F se používají v radiofrekvenční technice a jsou optimalizovány pro vysokou účinnost při specifických frekvencích.

1.3.1 Zesilovače třídy A:

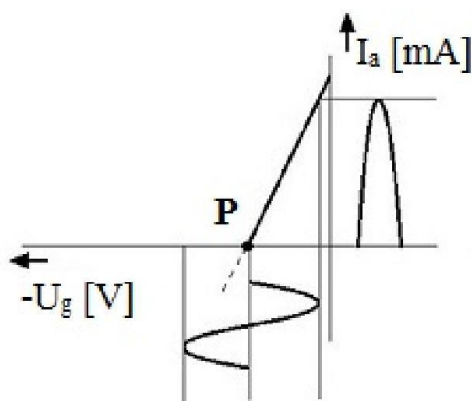
Pracují tak, že aktivní prvek zpracovává celý vstupní signál v lineárním režimu. To znamená, že proud neustále protéká obvodem, a to i v okamžiku, kdy signál není přítomen. Tento přístup minimalizuje zkreslení a zajišťuje velmi vysokou kvalitu přenosu signálu. Nicméně nízká účinnost, která dosahuje maximálně 30 %, znamená značné ztráty energie ve formě tepla. Z tohoto důvodu jsou zesilovače třídy A využívány především tam, kde je hlavní vysoká kvalita zvuku.



Obr. 4: Zesilovač třídy A

1.3.2 Zesilovače třídy B:

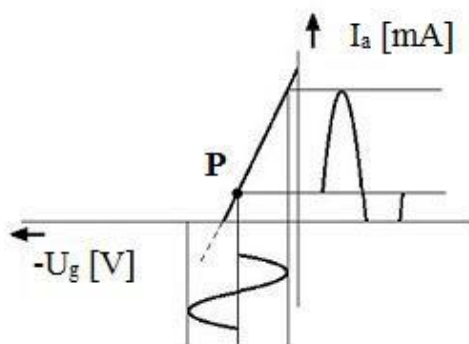
Přistupují k zpracování signálu jiným způsobem. Aktivní prvek je v tomto případě zapnutý pouze po dobu, kdy zpracovává odpovídající polovinu sinusové vlny – kladnou nebo zápornou. K tomu se obvykle používají dva prvky, z nichž každý je zodpovědný za jednu polovinu signálu. Díky tomuto uspořádání je dosaženo vyšší účinnosti, která může být až 70 %. Nicméně tento typ zesilovače trpí přechodovým zkreslením, které vzniká na přechodu mezi kladnou a zápornou částí signálu. Kvůli tomuto zkreslení se zesilovače třídy B používají hlavně tam, kde je důležitá účinnost, například ve vysílací technice.



Obr. 5: Zesilovač typu B

1.3.3 Zesilovače třídy AB:

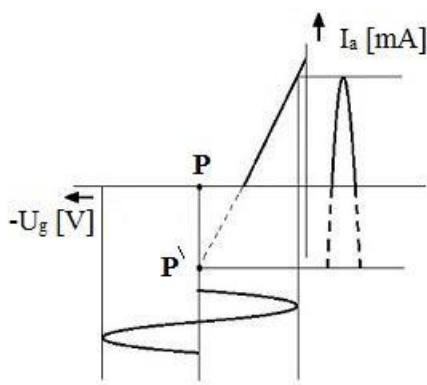
Kombinací výhod tříd A a B vznikla třída AB, která se snaží vyvážit kvalitu signálu a účinnost. Aktivní prvky mají posunutý pracovní bod, což umožňuje využití jejich činnosti v přechodové oblasti mezi kladnou a zápornou částí signálu. Tím se snižuje přechodové zkreslení typické pro třídu B, zatímco účinnost zůstává vyšší než u třídy A, obvykle mezi 50–70 %. Díky tomuto kompromisu jsou zesilovače třídy AB nejčastěji využívány v audio zesilovačích, kde je požadována dobrá kvalita zvuku při relativně vysoké účinnosti.



Obr. 6: Zesilovač typu AB

1.3.4 Zesilovače třídy C

Jsou specifické tím, že aktivní prvek je zapnutý pouze během krátkého intervalu signálu, což znamená, že zpracovávají méně než polovinu sinusové vlny. Tento způsob práce vede k výraznému zkreslení signálu, které je nutné následně upravit pomocí rezonančních obvodů. Na druhou stranu však třída C dosahuje velmi vysoké účinnosti, která může být až 90 %. Díky tomu jsou tyto zesilovače vhodné zejména pro vysokofrekvenční aplikace, jako jsou rádiové vysílače, kde není prioritou věrnost signálu, ale spíše maximální efektivita.



Obr. 7: Zesilovač typu C

1.4 Transformátor

Transformátor je elektrické zařízení využívané k přenosu střídavé elektrické energie mezi dvěma nebo více obvody prostřednictvím elektromagnetické indukce. Jeho hlavní funkcí je změna napětí a proudu při zachování stejné frekvence. Transformovny se hodně využívají v energetických soustavách i v elektronice, kde umožňují efektivní distribuci elektrické energie a přizpůsobení napětí podle požadavků jednotlivých zařízení.

Základní části transformátoru zahrnují primární vinutí, sekundární vinutí a magnetické jádro. Primární vinutí je cívka, do které se přivádí vstupní střídavé napětí. Sekundární vinutí je druhá cívka, na které se odebírá transformované napětí. Magnetické jádro, obvykle vyrobené z feromagnetického materiálu (například z plechů z křemíkové oceli), slouží k usměrnění a zesílení magnetického toku, čímž zvyšuje účinnost přenosu energie mezi vinutími.

Princip činnosti transformátoru je založen na Faradayově zákoně elektromagnetické indukce. Když střídavý proud protéká primárním vinutím, vytváří střídavé magnetické pole v jádře. Toto pole indukuje napětí v sekundárním vinutí, jehož velikost závisí na počtu závitů v jednotlivých vinutích. Poměr mezi vstupním a výstupním napětím odpovídá transformačnímu poměru, který je určen vztahem:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

U_1 a U_2 jsou napětí na primárním a sekundárním vinutí, N_1 a N_2 představují počet závitů na těchto vinutích. Pokud má sekundární vinutí více závitů než primární, transformátor zvyšuje napětí. Pokud má sekundární vinutí méně závitů, napětí se snižuje.

Transformátory mají široké využití v různých oblastech. Ve výkonové elektrotechnice se používají pro přenos elektrické energie na velké vzdálenosti. Elektrická energie je generována v elektrárnách na relativně nízkém napětí, které se pomocí zdvihových transformátorů převádí na vysoké napětí (110 kV, 220 kV... a více). Vyšší napětí snižuje ztráty na vedení způsobené Joulovým teplem. V blízkosti spotřebitelů se pak napětí opět snižuje pomocí distribučních transformátorů na bezpečnou úroveň (230 V).

Transformátory jsou konstruovány s ohledem na účinnost a minimalizaci ztrát. Mezi hlavní ztráty patří hysterezní ztráty, způsobené opakovanou magnetizací jádra, a vířivé proudy, které vznikají v jádře a zahřívají ho. Použití vhodných materiálů, jako jsou jádra z transformátorového plechu s nízkými ztrátami nebo ferity, pomáhá tyto jevy omezit. Dalším faktorem ovlivňujícím účinnost jsou měděné ztráty, tedy ztráty v odporu vinutí, které lze snížit použitím silnějších vodičů nebo chlazením.

1.4.1 Síťový transformátor

Síťový transformátor je elektrické zařízení pro připojení k elektrické síti o standardním napětí 230 V a frekvenci 50 Hz. Jeho hlavním účelem je transformace síťového napětí na požadovanou nižší hodnotu, která je vhodná pro napájení elektrických spotřebičů a elektronických zařízení. Základní konstrukce síťového transformátoru zahrnuje primární vinutí, které je dimenzováno na připojení k síti, a sekundární vinutí, které poskytuje výstupní napětí odpovídající potřebám konkrétního zařízení. Klíčovým konstrukčním prvkem je kvalitní elektrická izolace mezi primárním a sekundárním vinutím, která zajišťuje bezpečné oddělení od elektrické sítě a ochranu proti elektrickému šoku.

Síťové transformátory se běžně využívají v napájecích adaptérech pro domácí spotřebiče jako jsou televize, rádia, nabíječky a další elektronická zařízení. V průmyslových aplikacích jsou důležité pro stabilizaci napájení citlivých obvodů a pro napájení automatizačních systémů. Konstrukční parametry těchto transformátorů jsou navrženy s ohledem na vysokou účinnost přenosu elektrické energie a minimalizace tepelných ztrát. Moderní transformátory často obsahují ochranné prvky, jako jsou pojistky nebo tepelná čidla, které chrání proti přetížení a přehřátí. Důležitým aspektem je také materiál jádra, který bývá tvořen křemíkovou ocelí nebo feritovými materiály, aby se minimalizovaly energetické ztráty při přeměně elektrické energie.

1.4.2 Výstupní transformátor

Výstupní transformátor je specializované zařízení určené k přenosu elektrického signálu mezi zdrojem a zátěží s důrazem na zachování vysoké účinnosti a kvality signálu. Oproti síťovým transformátorům, které primárně upravují napětí pro napájení zařízení, je výstupní transformátor navržen pro přizpůsobení impedance mezi různými obvody. Typickým příkladem je jeho použití v elektronických zesilovačích, kde je potřeba přizpůsobit vysokou výstupní impedanci zesilovače nízkoimpedančnímu reproduktoru. Tento transformátor umožňuje optimální přenos výkonu bez výrazných energetických ztrát a zkreslení signálu.

Frekvenční odezva výstupního transformátoru je zásadní pro věrnost přenosu signálu. Zatímco síťové transformátory pracují na frekvenci 50 Hz, výstupní transformátory musí zvládnout široké pásmo, například v oblasti audia od 20 Hz do 20 kHz. Pro zajištění co nejmenšího zkreslení a věrného přenosu signálu jsou jádra těchto transformátorů často vyrobena ze speciálních materiálů, jako jsou amorfní slitiny, které minimalizují magnetické ztráty.

Hlavní rozdíl mezi síťovým a výstupním transformátorem spočívá v jejich funkci a konstrukci. Zatímco síťový transformátor je optimalizován pro efektivní transformaci napětí a dodávku energie s minimálními ztrátami, výstupní transformátor se zaměřuje na kvalitu přenosu signálu a přizpůsobení impedance. Konstrukčně se odlišují typem jádra, použitými vinutími i způsobem izolace, což je důvod, proč nelze tyto dva typy transformátorů změnit bez negativního dopadu na funkčnost celého systému.

1.5 Porovnání elektronkového a tranzistorového zesilovače

Elektronkové zesilovače mají oproti tranzistorovým zesilovačům několik nevýhod, které jsou na první pohled patrné. První z nich je velikost. Elektronky jsou výrazně větší než tranzistory, což se ukazuje i v celkové velikosti zesilovače. Pokud porovnáme zesilovače se srovnatelnými parametry, elektronkové varianty budou vždy rozměrnější.

Dalším podstatným rozdílem je hmotnost. Elektronkové zesilovače bývají výrazně těžší, hlavně kvůli transformátorům, které jsou jejich důležitou součástí. Tyto transformátory můžou vážit kolem 10-15 kg, což znamená, že celková hmotnost zesilovače bude vyšší než u tranzistorového zařízení s podobným výkonem. Tento fakt může být nevýhodou při přenášení nebo manipulaci se zesilovačem.

Napájecí nároky elektronkových zesilovačů jsou taky vyšší. Pro dosažení většího výkonu je důležité použít vysoké napájecí napětí, a kromě toho elektronky vyžadují i samostatné žhavení. To znamená vyšší spotřebu energie a složitější napájecí systém oproti tranzistorovým zesilovačům.

Další nevýhodou je mechanická odolnost. Elektronky mají skleněné pouzdro, což je dělá náchylnějšími na poškození ve srovnání s tranzistory, které jsou obvykle chráněny plastovým nebo kovovým obalem. To znamená, že elektronky jsou křehčí a citlivější na nárazy či vibrace.

Na druhou stranu mají elektronky i své výhody. Jednou z nich je odolnost vůči elektromagnetickému pulzu. Zatímco tranzistory tento pulz nevydrží, elektronky fungují i po jeho působení. Tato vlastnost je důležitá zejména pro vojenské využití, kde může být klíčové, aby elektronické zařízení přežilo i v extrémních podmínkách.

Jednou z významných výhod elektronek je jejich charakteristický zvukový projev. Elektronkové zesilovače často poskytují teplejší, přirozenější a hudebně příjemnější zvuk s jemnějšími přechody mezi jednotlivými tóny. Díky specifickým vlastnostem nelineárního zkreslení jsou oblíbené mezi hudebníky, kteří oceňují jejich větší harmonické zkreslení a přirozenější dynamiku.

Další výhodou je vyšší odolnost vůči přepětí a proudovým špičkám. Zatímco polovodičové součástky mohou být citlivé na náhlé změny napětí a proudové rázy, elektronky mají větší toleranci vůči těmto extrémům. Díky tomu jsou spolehlivější v nestabilních elektrických podmínkách, například v některých průmyslových aplikacích nebo starších elektrických sítích.

Elektronky jsou taky méně náchylné na teplotní změny. Tranzistory mohou měnit své elektrické vlastnosti v závislosti na teplotě, což může ovlivnit stabilitu obvodu. Naproti tomu elektronky pracují při vysokých teplotách už v základním režimu, a proto jsou méně ovlivněny teplotními výkyvy v okolí. To může být výhodné v prostředích s kolísající teplotou, například ve vojenské technice nebo v leteckém průmyslu.

2 Stavba elektronkového zesilovače

2.1 Volba součástek

2.1.1 Elektronky

Volba správných elektronek je zásadní, protože právě elektronky určují charakter zesilovače. Existuje široká škála typů, každý s jinými vlastnostmi. Například pro zesilovače, které mají poskytovat teplý muzikální zvuk, jsou populární elektronky typu 12AX7, 12AT7 nebo EL34. Při výběru elektronky je třeba brát v úvahu její životnost, pracovní napětí a také její zvukové charakteristiky. Dobré je zvolit kvalitní značky, protože to výrazně ovlivňuje výkon a životnost zařízení.

2.1.2 Pasivní součástky

Pro kvalitní zesilovač je důležitá volba kvalitních pasivních součástek. Rezistory by měly mít stabilní hodnoty a dobrou toleranci. Pro audio aplikace se často doporučují rezistory s nízkou šumovou charakteristikou, nebo speciální audio rezistory. Kondenzátory taky hrají velkou roli, hlavně v signálových cestách. Vhodné jsou kondenzátory s nízkým ekvivalentním odporem a kvalitními dielektriky, například filmové kondenzátory z polyesteru nebo polypropylenu. Kvalitní kondenzátory přispívají k čistotě zvuku a minimalizují nežádoucí artefakty.

2.1.3 Napájení a transformátory

Pro správný chod elektronkového zesilovače je nezbytné kvalitní napájení. To zahrnuje výběr vhodného transformátoru, který je schopný poskytnout potřebné napětí a proud pro elektronky. Transformátor by měl mít stabilní parametry a dobrou účinnost. Důležité je taky zvážit typ napájení, ať už jde o jednokanálový nebo dvoukanálový zesilovač. Je třeba, aby transformátor měl dostatečnou kapacitu a nezpůsobil výrazné ztráty nebo přehřívání. Vysoká kvalita napájecího zdroje je základem pro stabilní výkon a minimalizaci šumu a rušení.

2.1.4 Spoje a vedení signálu

U elektronkových zesilovačů je důležitý i výběr materiálů pro vedení signálu. Kvalitní vodiče s nízkým odporem, jako je měď, mohou pomoci zlepšit kvalitu signálu a snížit šum. Kromě samotného vedení signálu je důležitý i způsob propojení součástek, přesné pájení a pečlivé uspořádání obvodů s minimem rušivých vlivů.

2.1.5 Regulátory a ovládací prvky

Regulátory hlasitosti, tónových korekcí a přepínače by měly být spolehlivé a odolné proti opotřebení. U audio zařízení se často volí potenciometry s kvalitními odporovými dráhami a dobrým mechanickým pohybem.

2.1.6 Důraz na design a chlazení

Elektronkový zesilovač generuje teplo, které je třeba efektivně odvádět. Kvalitní chlazení elektronkového zesilovače, ať už pasivní (vývod z plošného desky) nebo aktivní (ventilátory), je nezbytné pro zajištění dlouhé životnosti součástek, především elektronek a transformátorů. U elektronkových zesilovačů je obvykle nutné zajistit dostatečný prostor pro odvádění tepla, což může ovlivnit i volbu obalu a konstrukci celého zařízení.

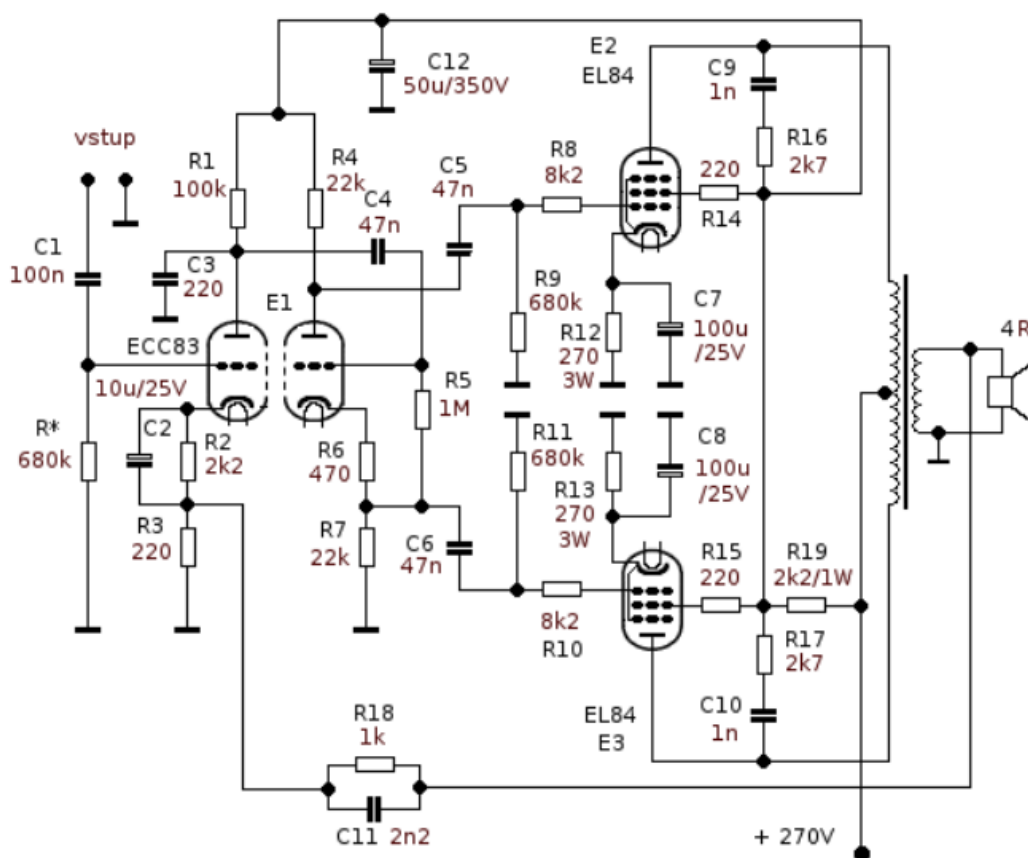
2.1.7 Parametry a tolerance součástek

Je důležité mít na paměti toleranci a parametry součástek. U pasivních součástek, jako jsou rezistory a kondenzátory, může malá změna v hodnotách ovlivnit výsledný zvuk. U některých součástek (v signálové cestě) by tolerance měla být co nejnižší. Taky je důležité dbát na jejich teplotní stabilitu a dlouhodobou spolehlivost, hlavně u těch, které jsou vystaveny vyšším teplotám nebo velkému elektrickému zatížení.

2.1.8 Mechanická konstrukce a bezpečnost

Mechanická kvalita sestavy hraje velkou roli ve stabilitě zesilovače a v ochraně součástek. Dobré upevnění součástek, správně navržený obal a dostatečné odrušení před nežádoucími elektromagnetickými vlivy zajistí nejen dlouhou životnost zařízení, ale i jeho bezpečnost. Elektronky jsou křehké a je třeba je chránit před mechanickými nárazy, aby všechny součástky byly bezpečně uzemněny a nevznikal žádný rizikový elektrický proud.

2.2 Schéma zapojení



Obr. 8: Schéma zapojení

Toto schéma představuje elektronkový zesilovač ve třídě AB s push-pull uspořádáním, využívající elektronky ECC83 a EL84. Jde o osvědčenou konstrukci, která nabízí skvělé zvukové vlastnosti, přirozenou dynamiku a teplý ton, což jsou hlavní podstatné vlastnosti oblíbené zejména mezi milovníky lampového zvuku.

Zapojení kombinuje předzesilovací stupeň s fázovým invertorem, který zajišťuje symetrické řízení koncového stupně s párovanými pentodami EL84. Díky pečlivě navržené zpětné vazbě a filtraci se zesilovač vyznačuje stabilním chodem, nízkým zkreslením a dostatečným výkonem pro běžné domácí nebo studiové použití.

Tento zesilovač je ideální pro ty, kdo hledají autentický lampový zvuk s bohatými harmonickými a příjemnou dynamikou. Schéma je poměrně jednoduché a dobře srozumitelné, což umožňuje jeho stavbu.

2.2.1 Specifikace obvodu (vysvětlení)

Nízkofrekvenční signál vstupuje do obvodu přes kondenzátor C1, který ho přivádí na řídicí mřížku první poloviny elektronky E1. Pracovní bod tohoto stupně je nastaven odporem R2, zatímco kondenzátor C2 omezuje negativní zpětnou vazbu, čímž dochází ke zvýšení zesílení. Do tohoto místa je zároveň zapojena globální zpětná vazba přes odpor R18, zatímco kondenzátor C11 slouží k potlačení nežádoucího rozkmitání při vysokých frekvencích.

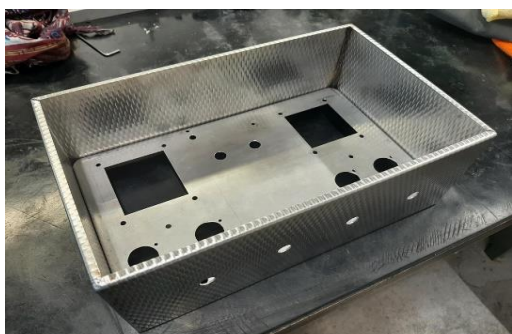
Zesílený signál se následně objevuje na anodě elektronky E1, kde kondenzátor C3 upravuje frekvenční charakteristiku ve vyšších pásmech. Dále je signál veden přes vazební kondenzátor C4 na řídicí mřížku druhé poloviny elektronky E1, která zde plní funkci fázového invertoru. Jeho pracovní bod je dán odpory R5 a R6. Díky tomu, že anodový i katodový odpor mají stejnou hodnotu, jsou výstupní signály z anody i katody shodné co do amplitudy, ale jsou vůči sobě v opačné fázi.

Po této části obvodu následuje výkonový stupeň typu push-pull, ve kterém pracují dvě párované výkonové pentody E2 a E3. Řídicí signál k nim přichází přes kondenzátory C5 a C6 a následně prochází „stop“ odpory R8 a R10. I když zesilovač nefunguje v ultralinearním režimu, jeho vlastnosti zůstávají velmi dobré. Napětí na urychlovacích mřížkách E2 a E3 je regulováno „stop“ odpory R14 a R15 spolu s prvky C9, R16 a C10, R17. Stínicí mřížka je v rámci těchto elektronek spojena s katodou. Koncový stupeň zesilovače je napájen stejnosměrným napětím 270 V přes primární vinutí výstupního transformátoru, který kromě napájení plní i izolační funkci. Na sekundární vinutí tohoto transformátoru je připojen reproduktor jako zátěž. Je zásadní, aby zesilovač nepracoval bez připojené zátěže, protože by mohlo dojít k nežádoucímu zvýšení napětí na primární straně transformátoru, což by mohlo vést k jeho poškození.

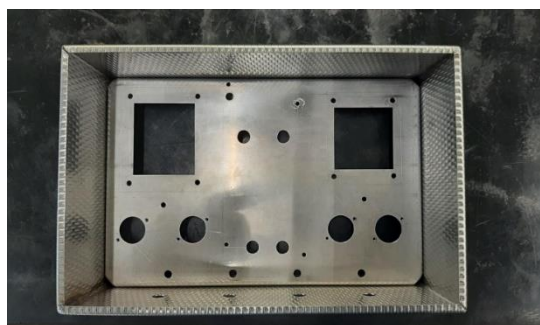
Pokud by zesilovač po spuštění vykazoval oscilace, řešením může být přepólování primárního vinutí transformátoru.

2.3 Návrh úložné bedny (boxu) pro součástky zesilovače

Při návrhu úložné bedny pro součástky elektronického zesilovače jsem se zaměřil na přesnost a pevnost konstrukce. Celý box je konstruován z 1,2 mm silného nerezového 3D grafického plechu pro boční stěny a okraje, zatímco dno je vyrobeno z 2 mm silného nerezového plechu. Výběr materiálů byl zvolen s ohledem na pevnost a funkčnost, odolnost proti korozi a snadnou opracovatelnost.

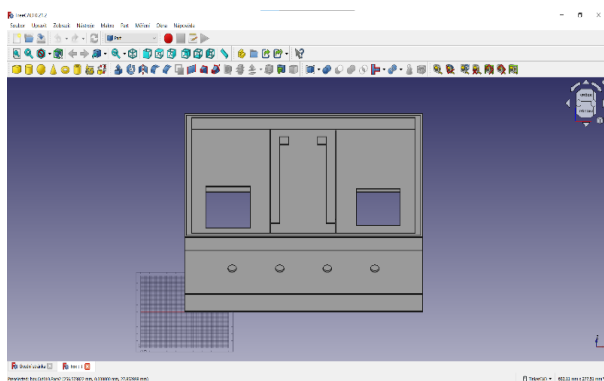


Obr. 9: Úložná bedna pro uložení součástek – fotka autora

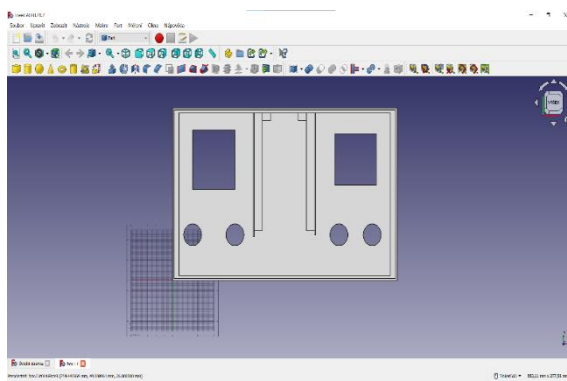


Obr. 10: Úložná bedna pro uložení součástek – fotka autora

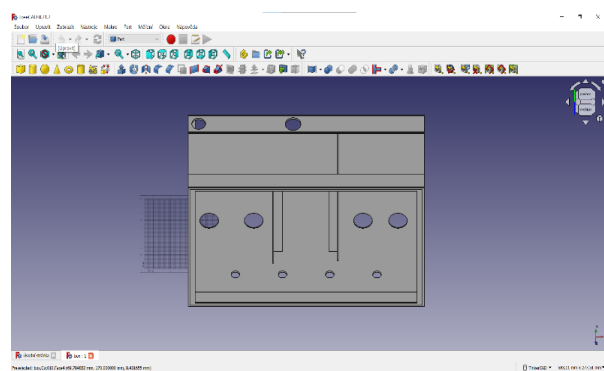
Návrh celé konstrukce byl realizován v softwaru FreeCAD, který umožnil detailní modelování jednotlivých částí a přesné umístění všech prvků. Díky tomu bylo možné optimalizovat rozměry a polohu montážních otvorů ještě před samotnou výrobou, čímž se minimalizovalo riziko chyb při obrábění a sestavování.



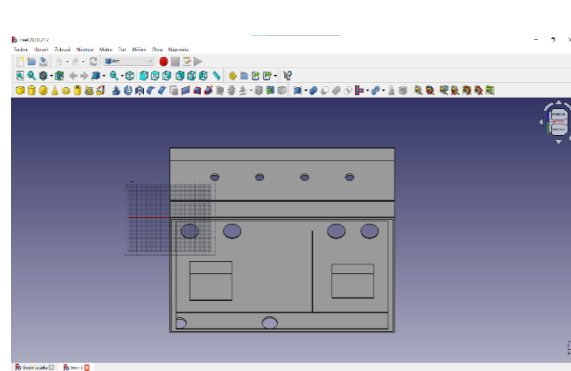
Obr. 11: 3D návrh úložné bedny – fotka autora



Obr. 12: 3D návrh úložné bedny – fotka autora

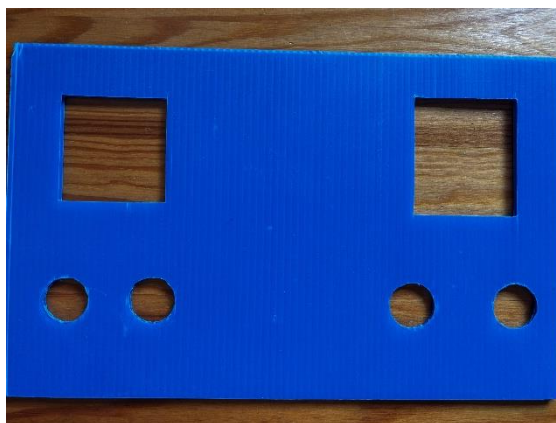


Obr. 13: 3D návrh úložné bedny – fotka autora



Obr. 14: 3D návrh úložná bedny – fotka autora

Před samotnou výrobou jsem pečlivě vyměřil všechny rozměry pomocí posuvného měřítka, aby bylo zajištěno přesné sestavení všech částí boxu. V návrhu jsem zohlednil umístění montážních otvorů pro součástky, přívody a další předem promyšlené otvory. Otvory byly vyvrtány vrtačkou a některé z nich byly přesně vyřezány pomocí CNC drátového řezu na stroji Fanuc Robocut a-C400iC, což zajistilo dokonalou přesnost řezů.



Obr. 15: Zkušební patro pro osazení – fotka autora

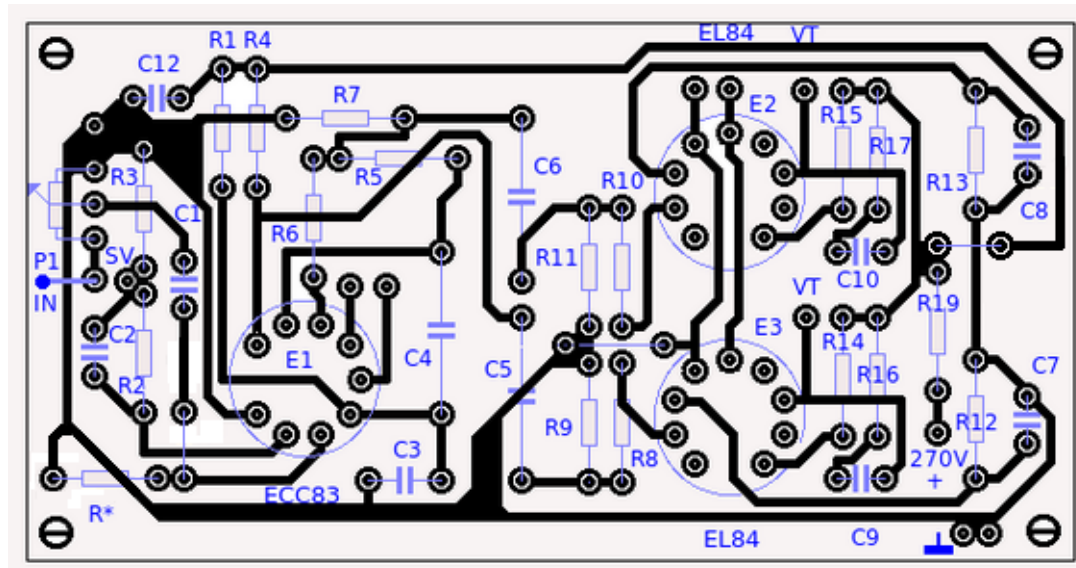
Při ohýbání bočních částí bedny jsem použil hydraulickou CNC ohýbačku Trumpf TruBend 5170, která umožňuje precizní ohyby i u tenkých plechů s vysokou opakovatelností. Ohyby byly provedeny podle předem definovaných úhlů tak, aby bylo dosaženo požadované konstrukční pevnosti a zároveň umožněno přesné sesazení jednotlivých dílů.

Jednotlivé díly byly následně sestaveny a svařeny bodovou svářečkou, která zajistila pevné spoje bez zbytečného přehřátí materiálů, což je klíčové pro zachování strukturální integrity plechu. Po svaření bylo nutné provést finální úpravy, jako je odjehlení hran a případné korekce otvorů pro upevnění komponentů.

Celý proces návrhu a výroby boxu byl realizován s důrazem na přesnost a funkčnost. Výsledkem je pevná a estetická vyhovující konstrukce, která zajišťuje bezpečné uložení součástek elektronkového zesilovače a zároveň umožňuje snadný přístup pro montáž a údržbu.

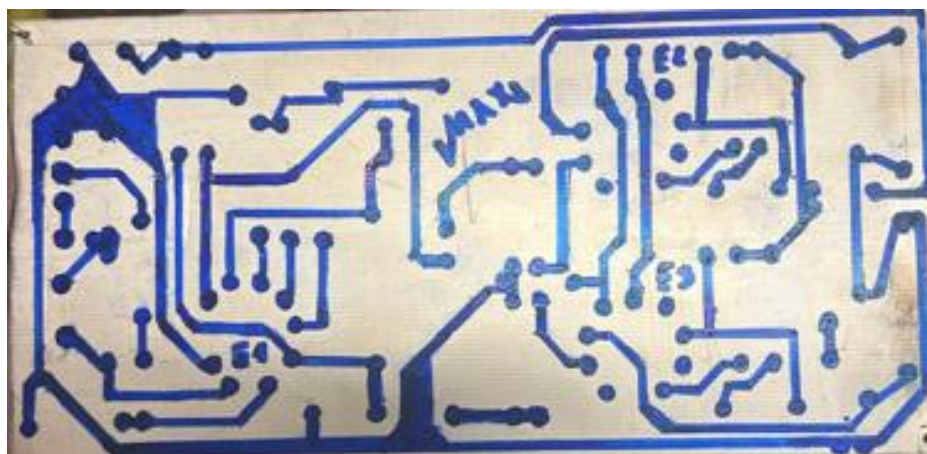
2.4 Návrh plošného spoje

Nejprve jsem si vybral vhodný typ plošného spoje. Při této činnosti bylo důležité správné rozložení součástek a optimalizace vodivých cest tak, aby byly co nejkratší a minimalizovalo se rušení.



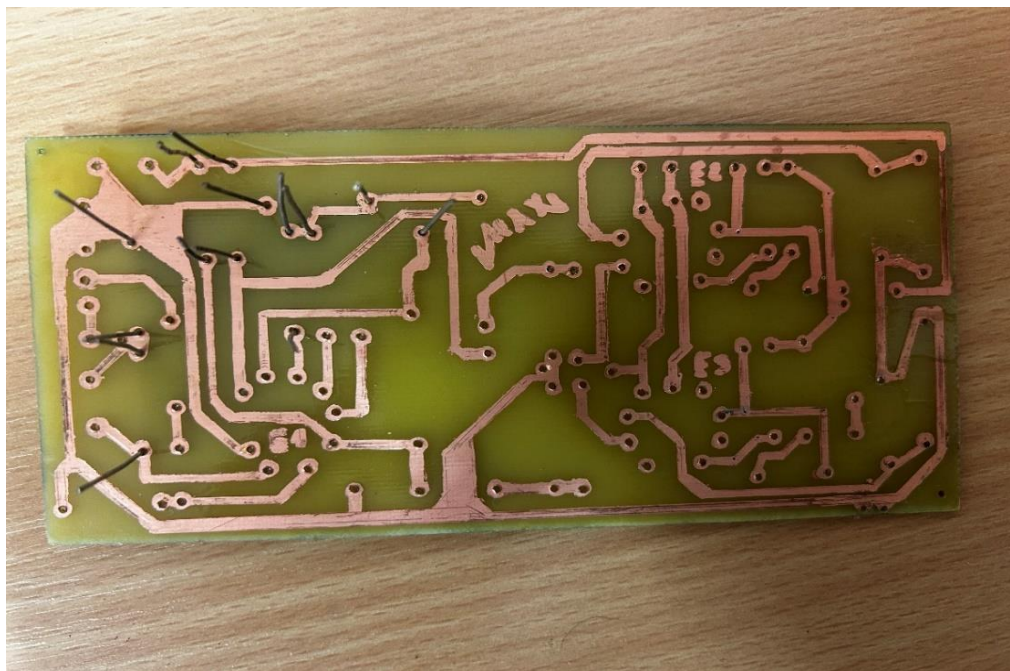
Obr. 16: Plošný spoj – návrh

Hotový návrh jsem poté přenesl na čistou 3 mm měděnou desku. K následným cestám spojů jsem použil speciální leptací rezistentní fixu EDDING 792 určenou pro nákres plošných spojů.



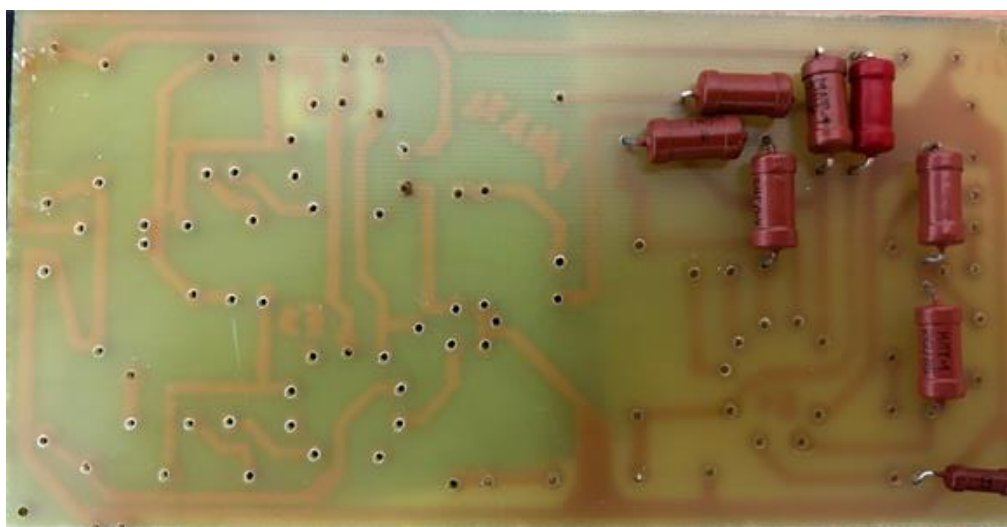
Obr. 17: Plošný spoj – nákres

Po dokončení kreslení byla deska ponořena do leptací lázně s chloridem železitým (FeCl_3). Během leptání došlo k odstranění přebytečné mědi a zůstaly pouze vodivé cesty chráněné fixou. Proces leptání trval přibližně 25 minut (v závislosti na koncentraci roztoku a teplotě). Po vyleptání jsem desku důkladně opláchl vodou a odstranil zbytky fixy pomocí acetonu.



Obr. 18: Vyleptání

Poté následovalo vrtání otvorů pro vývody součástek. K tomu se použil jemný vrták s průměrem odpovídajícím konkrétním součástkám, aby bylo zajištěno jejich pozdější pevné uchycení. Po navrtání následovalo cínování spojů (pro zlepšení jejich vodivosti a jako ochrana před oxidací a mechanickým opotřebením).



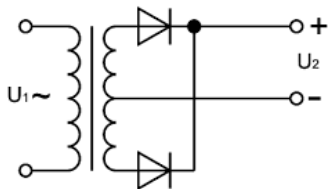
Obr. 19: Plošný spoj - osazení

Osazení součástek: nejprve se osazovaly nejmenší součástky, jako jsou rezistory a diody, poté kondenzátory a další prvky. Jako poslední byly osazeny elektronky, aby nedošlo k jejich poškození během manipulace s deskou. Každá součástka byla pečlivě připájená, přitom bylo nutné dbát na kvalitní spoje, aby se zabránila vzniku studených spojů, které by mohly způsobit poruchu celého zesilovače.

Po dokončení pájení proběhla vizuální kontrola a testování spojů pomocí multimetru. Následně bylo provedeno první zapojení a otestování funkčnosti. Po úspěšném testu byl zesilovač zabudován do připraveného boxu a připraven k finálnímu použití.

2.4.1 Návrh dvoucestného usměrňovače

Součástí návrhu bylo vytvoření plošného spoje pro dvoucestný usměrňovač, který se stará o konverzi střídavého napětí na stejnosměrné napětí. Návrh desky plošných spojů zahrnoval pečlivé rozmístění diodového můstku, filtračních kondenzátorů a regulačních prvků tak, aby byla zajištěna co nejmenší úroveň zvlnění výstupního napětí a minimalizace tepelných ztrát.

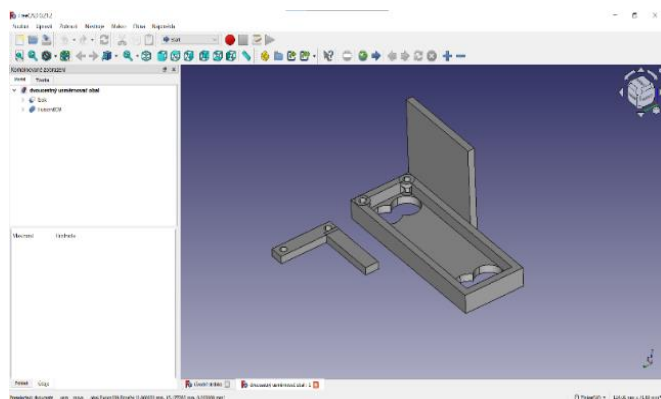


Obr. 20: Schéma zapojení dvoucestného usměrňovače

Funkce dvoucestného usměrňovače spočívá v tom, že využívá obě půlvlny vstupního střídavého napětí, čímž dochází k efektivnějšímu využití energie a snížení zbytkového zvlnění na výstupu. Ve fázi návrhu bylo nutné správně dimenzovat usměrňovací diody podle maximálního proudového zatížení a provozního napětí. Současně bylo třeba navrhnut dostatečnou kapacitu filtračních kondenzátorů, které zajišťují stabilní stejnosměrné napětí pro napájení dalších obvodů zesilovače.

Při návrhu plošného spoje bylo dbáno na optimální šířku vodivých cest, aby byla zajištěna dostatečná proudová nosnost. Výstupní svorky byly umístěny tak, aby umožnily snadné připojení k napájecím obvodům. Následně bylo provedeno testování desky na možné přehřívání a úroveň zvlnění napětí, přičemž byly provedeny úpravy v uspořádání pro dosažení lepšího výkonu.

Doplnění: 3D návrh ochranné krabičky pro dvoucestný usměrňovač.



Obr. 21: Návrh ochranné krabičky dvoucestného usměrňovače

2.5 Finální propojení a osazení

Po dokončení návrhu a osazení jednotlivých komponentů bylo nutné přistoupit k finální montáži zesilovače do jeho skříně – **úložné bedny -boxu**. Tento krok vyžadoval přesné sladění mechanických a elektronických částí, aby bylo dosaženo optimální funkčnosti a spolehlivosti zařízení.

Prvním krokem bylo umístění hlavních transformátorů - výstupního a napájecího. Tyto klíčové komponenty byly upevněny do připravených montážních otvorů pomocí robustních šroubových spojů s podložkami pro minimalizaci mechanických vibrací. U napájecího transformátoru bylo třeba pečlivě vést silové vodiče, aby nedocházelo k nechtěnému elektromagnetickému rušení v citlivých obvodech předzesilovače.

Následovalo upevnění desky plošných spojů s elektronickými součástkami. Bylo nutné zajistit její pevné uchycení pomocí distančních sloupků, které nejen stabilizovaly desku, ale také umožnily dostatečné proudění vzduchu pro chlazení součástek. Součástky byly předem otestované, ale i přesto proběhla vizuální kontrola a měření obvodů pro zajištění správné funkce zesilovače.

Dalším zásadním krokem bylo osazení elektronek do jejich keramických patiček. Elektrony ECC83 a EL84 byly pečlivě zasunuty tak, aby nedošlo k poškození vývodů. Aby se zamezilo mikrofonnímu efektu a vibracím. Elektrony byly v této fázi také chráněny před náhlými nárazy, které by mohly způsobit jejich poškození.

Poté přišlo na řadu vedení signálových a silových vodičů. Kabeláž byla důkladně organizována, silové vodiče byly vedeny odděleně od signálových, aby se minimalizovalo rušení a šum. Použití kvalitních stíněných kabelů u vstupních a citlivých částí obvodu přispělo ke snížení nechtěných interferencí. Pro lepší přehlednost byla kabeláž svázána pomocí stahovacích pásek a upevněna ke konstrukci.

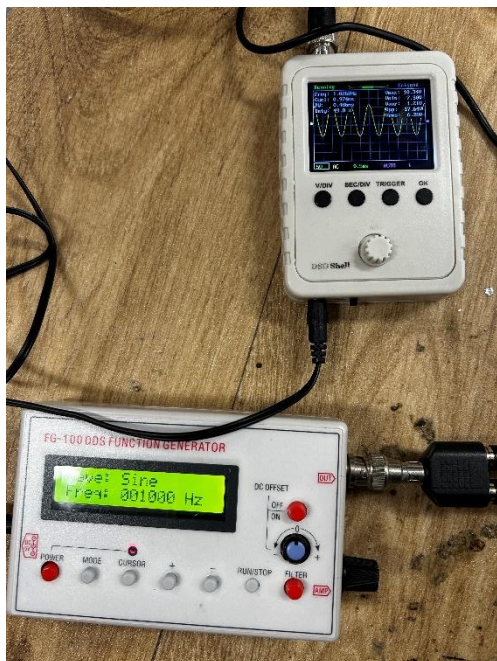
Po dokončení elektroinstalace následovalo připojení reproduktorového výstupu. Výstupní transformátor byl spojen s výstupními svorkami a provedeny zátěžové testy. Důležité bylo ověřit, že zesilovač pracuje stabilně i při vyšším výkonu a nedochází k nechtěnému přebuzení nebo oscilacím.

Když bylo mechanické a elektronické sestavení dokončeno, následovalo první spuštění a testování. Postupně byly prověřeny všechny pracovní napětí, kontrolována funkčnost jednotlivých stupňů zesilovače a kontrola zpětné vazby pro optimální zvukový výkon. Po zahřátí elektronek byla provedena zkouška, kde se ověřila linearita a zkreslení signálu.

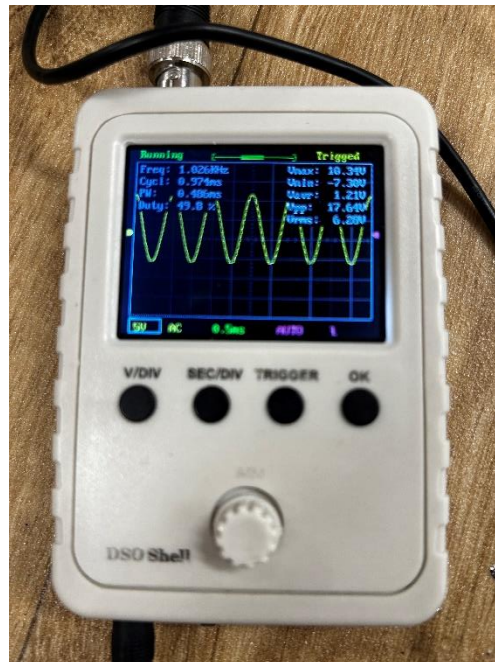
Výsledkem této práce je funkční robustní elektronkové kombo, které nejenže poskytuje autentický a bohatý lampový zvuk, ale zároveň splňuje technické a konstrukční požadavky pro dlouhodobé a spolehlivé používání. Pečlivě navržené uspořádání komponentů a důsledná montáž zajistily, že zesilovač pracuje stabilně, bez rušení a nabízí vynikající zvukové vlastnosti jak pro domácí, tak studiové využití.

2.6 Měření elektronkového zesilovače

2.6.1 Kmitočtový rozsah



Obr. 23: Kmitočtový rozsah 1



Obr. 22: Kmitočtový rozsah 2

Provedené měření se zaměřuje na analýzu signálu generovaného funkčním generátorem FG-100 DDS a jeho průběh na digitálním osciloskopu DSO Shell. Cílem měření bylo ověření správnosti signálu na vstupu zesilovače, zjištění případných odchylek nebo jiných nežádoucích jevů v signálové cestě.

Naměřené hodnoty:

Frekvence: 1,026 kHz (míra odchylky od nastavené hodnoty může být způsobena nepřesností generátoru nebo šumem v obvodu)

Perioda: 9,974 ms, což odpovídá uvedené frekvenci

Maximální napětí (U_{max}): 10,34 V

Minimální napětí (U_{min}): -7,30 V

Efektivní napětí (U_{ef}): 6,28 V

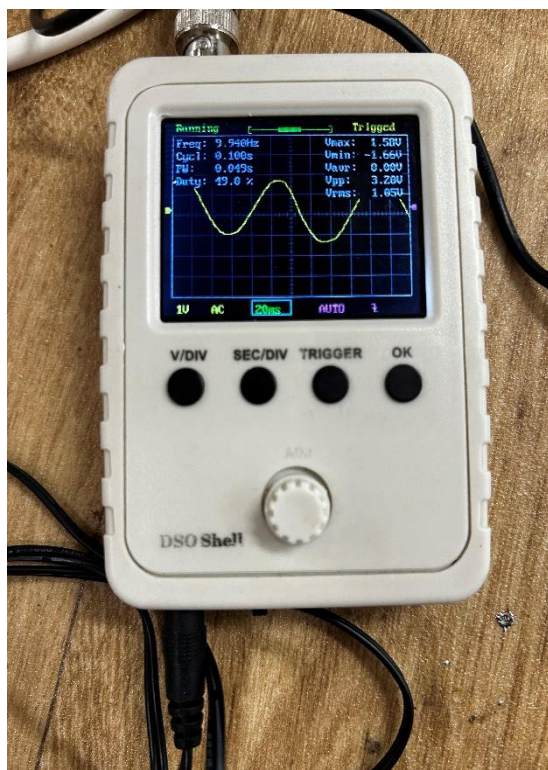
Špičkové napětí (U_{pp}): 17,64 V

Vyhodnocení:

Naměřené hodnoty potvrzují, že generátor správně generuje signál o požadované frekvenci a amplitudě. Efektivní napětí U_{ef} 6,28 V naznačuje dostatečnou úroveň signálu, což je důležité

pro správnou funkci zesilovače. Rozdíl mezi U_{max} a U_{min} odpovídá amplitudovým parametrům signálu.

2.6.2 Minimální a maximální rozsah



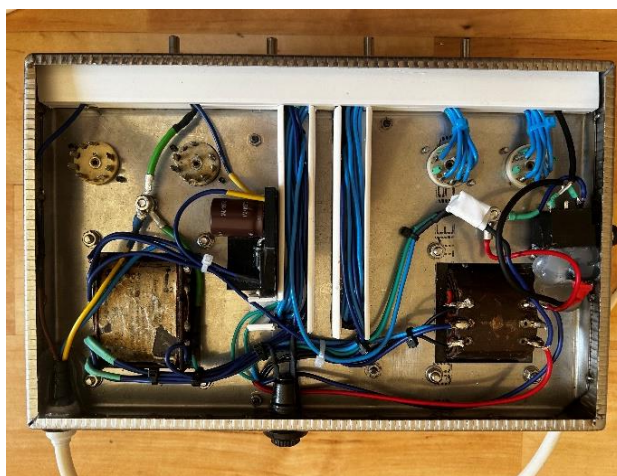
Obr. 24: Kmitočtový rozsah 3-10 Hz

Závěr

Tato práce představuje komplexní proces návrhů, montáže, teorie a testování elektronkového zesilovače, který splňuje vysoké technické i zvukové požadavky. Precizní mechanická a elektronická konstrukce zajišťuje stabilní a spolehlivý provoz, pečlivě sladěné komponenty minimalizují rušení a zajišťují optimální zvukový výkon.

Důležitým aspektem bylo správné umístění a uchycení hlavních součástek, hlavně transformátorů a elektronkových patic, kde byl kladen velký důraz na minimalizaci vibrací a elektromagnetického rušení. Významná byla i organizace kabeláže, která přispěla k čistotě signálu a efektivnímu vedení proudových cest.

Finální testování potvrdilo nejen správnou funkci zesilovače, ale i jeho vysokou kvalitu zvukového výstupu. Kombinace pečlivé konstrukce, efektivního chlazení a kvalitního zpracování signálu umožnila dosažení optimálních akustických vlastností. Výsledkem je robustní a spolehlivý zesilovač s autentickým lampovým zvukem, který je vhodný pro domácí i studiové využití.



Obr. 25 Finální pohled do úložné bedny - zdola



Obr. 26: Finální pohled do úložné bedny - shora

3 Seznam tabulek

Tab.1: Typy elektronek

4 Seznam obrázků

Obr. 1: Schematická značka triody

Obr. 2: Charakteristiky triody

Obr. 3 Ukázky elektronek

Obr. 4: Zesilovač třídy A

Obr. 5: Zesilovač typu B

Obr. 6: Zesilovač typu AB

Obr. 7: Zesilovač typu C

Obr. 8: Schéma zapojení

Obr. 9: Úložná bedna pro uložení součástek – fotka autora

Obr. 10: Úložná bedna pro uložení součástek – fotka autora

Obr. 11: 3D návrh úložné bedny – fotka autora

Obr. 12: 3D návrh úložné bedny – fotka autora

Obr. 13: 3D návrh úložné bedny – fotka autora

Obr. 14: 3D návrh úložné bedny – fotka autora

Obr. 15: Zkušební patro pro osazení – fotka autora

Obr. 16: Plošný spoj – návrh

Obr. 17: Plošný spoj – nákres

Obr. 18: Vyleptání

Obr. 19: Plošný spoj - osazení

Obr. 20: Návrh ochranné krabičky dvoucestného usměrňovače

Obr. 21: Návrh ochranné krabičky dvoucestného usměrňovače

Obr. 22: Kmitočtový rozsah 2

Obr. 23: Kmitočtový rozsah 1

Obr. 24: Kmitočtový rozsah 3-10 Hz

Obr. 25: Finální pohled do úložné bedny - zdola

Obr. 26: Finální pohled do úložné bedny - shora

5 Zdroje

https://theses.cz/id/y1sl5r/Strejc_Jakub_BP.pdf

<https://www.mensagymnazium.cz/pdf/nf-mk/skolni-prace/2011-06%20kvinta%20Stavba%20elektronkov%C3%A9ho%20zesilova%C4%8De.pdf>

<https://elektrolukis.estranky.cz/clanky/elektronkovy-zesilovac-s-pcl86.html>

<https://hlava.webpark.cz/>

https://kdf.mff.cuni.cz/tabor_old/2014/odborny/projekty/tajuplne_svetlo_elektronek/tajuplne_svetlo_elektronek.pdf

https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronkov%C3%BD_zesilova%C4%8D

<https://eluc.ikap.cz/lekce/pracovni-tridy-zesilovacu>

https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/F5090/um/E17_P7.pdf

<https://eluc.ikap.cz/lekce/elektronky>

tady chybí ty datumy