

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10 Elektrotechnika, elektronika a komunikace

Ampalyzer – Analyzátor audio zesilovačů

**Jan Šlehofer
Praha**

Praha 2020

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10 Elektrotechnika, elektronika a komunikace

Ampalyzer – Analyzátor audio zesilovačů

Ampalyzer – Audio amplifier analyzer

Autoři: Jan Šlehofer

Škola: SPŠE V Úžlabině 320, Praha 10, 100 00

Kraj: Praha

Konzultant: Ing. Jiří Šindelka

Praha 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ 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 Praze dne

.....
podpis autora (Jan Šlehofer)

Anotace

Cílem mé práce SOČ bylo vytvořit přístroj, který je schopný změřit parametry nízkofrekvenčních zesilovačů zvuku jako jsou amplitudová frekvenční charakteristika, zesílení, výstupní výkon, harmonické zkreslení a harmonické zkreslení se šumem. Samotný přístroj kombinuje 3 části: funkční generátor, obvod vzorkující napětí na generátoru a na výstupu měřeného zesilovače, a dále obvod vzorkující proud do zátěže. Výstup ze vzorkovacích obvodů lze zobrazit na obrazovce ve formě osciloskopu, voltmetru, ampérmetru a wattmetru nebo na nich provést uvedené analýzy a zobrazit výsledky na obrazovce či data zapsat na externí datové médium. Tento proces je poloautomatický.

Klíčová slova

Analyzátor zesilovačů; elektronický měřicí přístroj; automatizované měření

Annotation

The goal of the SOČ assignment was to create an instrument capable of parameter measurement on audio amplifiers such as the frequency response, gain, output power, harmonic distortion and harmonic distortion plus noise. The instrument itself is composed of 3 parts: a function generator, a circuitry sampling the generator's voltage and the voltage on the output of the amplifier under test, as well as a sampling circuitry for the load current. The sampled data can be viewed on screen in a form of an oscilloscope, a voltmeter, an ammeter and a wattmeter or can be analyzed for the mentioned parameters with the results being displayed on screen or saved to an external data storage medium. This process is semi-automated.

Keywords

Amplifier analyzer; electronic measurement instrument; automated measurement

Obsah

Klíčová slova	
Keywords	
Úvod	1
1 Konstrukce přístroje	2
2 Koncepce přístroje a obvody řešení	3
2.1 Hlavní deska	3
2.1.1 Rozpiska součástek	4
2.2 Modul zdroje	4
2.2.1 Zdroj 5 V	5
2.2.2 Zdroj 3,3 V	5
2.2.3 Zdroj +15 V	5
2.2.4 Zdroj -15 V	6
2.2.5 Rozpiska součástek	7
2.3 Modul generátoru	7
2.3.1 Syntezátor signálu	7
2.3.1.1 Obvod DDS	7
2.3.1.2 Obvod napěťového zesilovače s digitálním řízením zesílení	8
2.3.2 Dolní Propust	9
2.3.3 Detektor průchodu generátoru nulou	9
2.3.4 Koncový zesilovač	11
2.3.5 Rozpiska součástek	11
2.4 Vstupní modul	11
2.4.1 Obvod úpravy napěťové úrovně	12
2.4.1.1 Vstupní atenuátor	12
2.4.1.2 Napěťový zesilovač s digitálním exponenciálně řízeným zesílením	12
2.4.2 Převodník proud napětí	15
2.4.3 Detektory průchodu napětí a proudu nulou	16
2.4.4 ADC Reference	16
2.4.5 Rozpiska součástek	16
2.5 Regulace ventilátoru chlazení	16
2.5.1 Rozpiska součástek	17
2.6 Dotykový TFT display	17

3	Funkce a vlastnosti	17
3.1	Generátor funkcí.....	19
3.2	Multimetr.....	20
3.3	Osciloskop.....	23
3.4	Analyzátor harmonického zkrvení a frekvenční čítač.....	23
3.5	Automatické měření	25
3.5.1	Funkce „Ampalyza“.....	26
3.5.2	Funkce „Freqchar“	27
3.6	Schopnost sebe kalibrace.....	27
4	Návod k použití automatického měření	28
5	Program mikrokontroleru	29
6	Ověřující měření	29
6.1	Popis měřeného předmětu.....	29
6.2	Původní naměřené hodnoty:	30
6.3	Hodnoty naměřené pomocí přístroje.....	31
7	Disciplíny vývoje	33
7.1	Návrh obvodů.....	33
7.2	Návrh plošných spojů	33
7.3	Fyzická úprava.....	33
7.4	Vyladění obvodů a korekční funkce	33
8	Potenciální výrobní cena (odhad bez zahrnutí práce).....	34
9	Uplatnění na trhu	34
10	Souhrn základních parametrů přístroje	35
	Závěr	
	Seznam literatury a jiných zdrojů	
	Přílohy – Fotodokumentace	

Úvod

Důvodem volby tohoto tématu je má záliba v elektronice, v jejím vývoji a v její konstrukci. Jednou mých z oblastí zájmu je i zvuková technika, která zahrnuje hlavně konstrukci zvukových předzesilovačů a zesilovačů výkonu, případně konstrukce pásmových výhybek a korekčních obvodů. Na jejich konstrukci je velmi užitečné být vybaven signálním generátorem, osciloskopem a ideálně přístrojem na analýzu signálu za účelem zjištění harmonického zkreslení a harmonického zkreslení se šumem. V rámci práce jsem se rozhodl všechny tyto funkce implementovat do jediného přístroje a doplnit je o možnost polo automatizovaného měření. Výsledný přístroj realizuji tak, abych ho i já sám mohl spokojeně používat pro dané účely a mohl ho případně snadno doplnit o dodatečné funkce.

V této práci popíši hlavně konstrukci výsledného přístroje, popis jednotlivých obvodů, schopnosti a vlastnosti, program mikrokontroleru, s čím jsem se potýkal při vývoji, potenciální výrobní cenu a možnosti uplatnění na trhu.

1 Konstrukce přístroje

Fotodokumentace viz příloha 1A, 1B, 1C a 1D.



Obr. 1 – Rozložení vstupů a výstupů přístroje

Zařízení je zabudováno do plastové skřínky na jejímž čelním panelu jsou graficky rozlišeny 3 vstupně výstupní bloky, blok generátoru (1), blok snímající výstup měřeného zesilovače (2) a blok pro připojení externí zátěže (3). Každý z uvedených bloků disponuje 5-ti možnostmi připojení, konektor BNC (a), 3,5 mm audio jack (b), konektor RCA (c), zdířky pro banánky (d) a pružinové svorky pro drátové připojení (e). Dále se na panelu nachází dotykový LCD TFT 2,4“ display pro interakci uživatele s přístrojem a zobrazování údajů (4).

Zařízení má na levé straně drážku (5) pro vložení externího paměťového média pro ukládání výsledků poloautomatického měření, v tomto případě pro vložení karty SD. Dále se na levé straně nacházejí otvory nasávání vzduchu chladicího systému (6).

Na zadní stěně je umístěn konektor připojení napájení (7), konektor 3,5mm využívaný pro připojení linky RS232 (8), zapínač (9), pojistka pro jištění celého přístroje (10) a pojistka pro jištění proudu do zátěže (11).

Na přední stěně jsou umístěny banánkové zdičky pro vyvedení symetrického napájení +/- 15 V společně se dvěma pojistkami pro jištění příslušných větví (12).

Na spodní straně výrobku je umístěn výfuk vzduchu systému chlazení.

2 Koncepce přístroje a obvody řešení

Blokové schéma zapojení viz souborová příloha 2A. Fotodokumentace viz příloha 2B a 2C.

Elektronika přístroje se skládá z 5 bloků či modulů a jejich příslušných pod bloků:

- Hlavní deska
- Modul zdroje
- Modul generátoru
 - Syntezátor signálu
 - Dolní propust
 - Detektoru průchodu nulou
 - Koncový zesilovač
- Vstupní modul
 - Obvod úpravy napěťové úrovně
 - Převodník proud napětí
 - Detektor průchodu napětí nulou
 - Detektor průchodu proudu nulou
 - ADC Reference

Jednotlivé bloky či moduly jsou společně s jejich pod bloky popsány v následujících kapitolách.

2.1 Hlavní deska

Schéma zapojení viz souborová příloha 2.1A. Fotodokumentace viz příloha 2.1B a 2.1C.

Hlavní deska slouží jako základna, na kterou a přes kterou jsou propojeny jednotlivé moduly, vstupy a výstupy a slouží k vedení napájení ze zdroje k modulům.

Hlavní deska je osazena mikrokontrolerem STM32F103CBT6 od výrobce ST Microelectronics s označením U1. Využívá architektury ARM Cortex-M3 32-bit RISC s taktovací frekvencí 72 MHz. Mikrokontroler svůj takt odvozuje od oscilátoru tvořeného 8MHz krystalovým

rezonátorem X1, který je doplněný o kapacity C1 a C2. Mikrokontroler slouží k ovládání všech modulů, interakci s uživatelem a k nahrávání dat do externího datového média. V mikrokontroleru je integrovaný dvoukanálový 12bitový převodník analog digitál, který je zde provozován jako jeden kanál se střídavým vzorkováním pro maximalizaci vzorkovací frekvence, je tak dosaženo vzorkovací frekvence o velikosti přibližně 1,7 MSPS. Jeho referenční napětí je připojeno na výstup reference modulu snímání napětí a proudu. Vstup převodníku je pomocí integrovaného multiplexoru přepínán mezi výstupy obvodu snímání napětí a výstupy obvodu snímání proudu na pinech PA2 a PA3, a tvoří tak s nimi vzorkující obvod. Dále se na desce nachází posuvný registr 74HC595 od výrobce Texas Instruments nesoucí označený U2, který slouží k rozšíření výstupních možností hlavního mikrokontroleru. Jak mikrokontroler, tak i posuvný registr jsou osazeny povrchovou montáží. Výstupy posuvného registru jsou používány k ovládání pomalejších prvků jako jsou magnetická a polovodičová relé. Na desce jsou také umístěny lištové konektory s rozpětím 2,54 mm pro mechanické a elektrické spojení s moduly. Tyto konektory nesou označení Pn (n je číslo konektoru). Mezi ně patří:

- P1 a P3 – Modul snímání napětí a proudu
- P2 a P4 – Dotykový TFT LCD a adaptér SD karty
- P5 a P6 – Modul generátoru funkcí
- P7, P8 a P9 – Modul zdroje

Společně s konektory pro připojení modulů je deska ještě osazena konektory pro připojení částí přístroje nacházejících se mimo desku. Jejich označení je Hn (n je číslo konektoru). Patří mezi ně:

- H1 – připojení reset tlačítka
- H2 – volba pro nahrání zavaděče programu
- H3 – konektor pro možnost rozšíření funkcionality
- H4 – připojení sériové linky
- H5 – volba programovacího režimu mikrokontroleru
- H6 – Výstup napájení

2.1.1 Rozpiska součástek

Rozpiska součástek viz příloha 2.1D.

2.2 Modul zdroje

Schéma zapojení viz souborová příloha 2.2A. Fotodokumentace viz příloha 2.2B.

Modul zdroje slouží k přeměně vstupního napájecího napětí přístroje na napětí pro napájení hlavní desky a ostatních modulů. Vstupní napájecí napětí 12 V. Výstupní napětí jsou 5 V a 3,3 V pro napájení digitálních obvodů hlavní desky, dále propouštěné vstupní napájecí napětí pro

provoz elektromagnetických relé a posledně symetrické napětí 15 V pro napájení analogových obvodů u modulu generátoru a u vstupního modulu.

2.2.1 Zdroj 5 V

Napětí 5 V je získáváno z napětí 12 V pomocí tří svorkového integrovaného lineárního napěťového regulátoru KA7805 od výrobce Fairchild Semiconductor nesoucím ve schématu označení U2. Regulátor jsem vybral v provedení v pouzdru D-PAK pro povrchovou montáž. Výstup regulátoru je blokován kondenzátorem C6 pro zajištění stability.

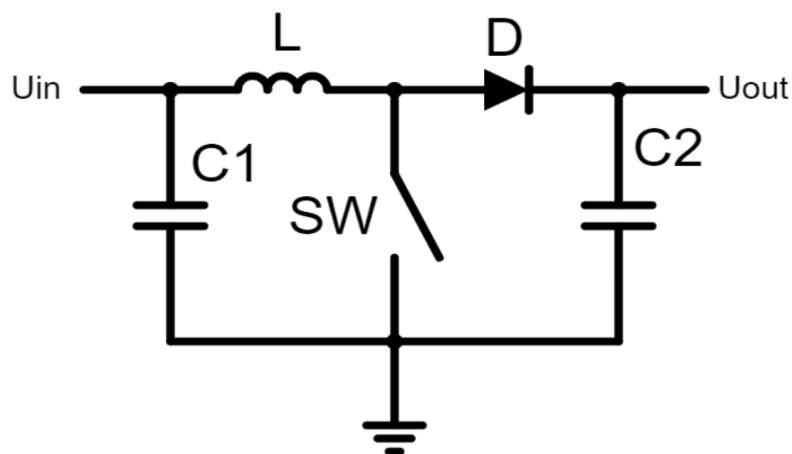
2.2.2 Zdroj 3,3 V

Z napětí 5 V je dále vytvářeno napětí 3,3 V pomocí tří svorkového integrovaného napěťového regulátoru XC6206P332 od výrobce Torex s označením U4. Regulátor je proveden v pouzdře SOT – 23 pro povrchovou montáž. Výstup regulátoru je blokován kondenzátorem C5.

2.2.3 Zdroj +15 V

Kladné napětí 15 V je tvořeno pomocí obvodu spínaného zvyšovače tvořeného 5 prvky.

Prvním prvkem je integrovaný obvod MT3608 od výrobce Arosemi s označením U3. Tento integrovaný obvod obsahuje spínací transistor (ve zjednodušeném schématu prvek SW, spínač), pulzně šířkový regulační obvod pracující na frekvenci 1,2 MHz a napěťovou referenci 0,6 V. Dalším prvkem je výkonový induktor L3 (ve zjednodušeném schématu prvek L).



Obr. 2 – Zjednodušené schéma zapojení zvyšujícího obvodu

Hodnota induktoru L3 (ve zjednodušeném schématu prvku L) byla zvolena dle rovnic uvedených ve zdroji *Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage*, respektive podle dále uvedené rovnice 1.

$$(1) L = \frac{U_{IN} \cdot (U_{OUT} - U_{IN})}{0,2 \cdot I_{OUT} \cdot \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \cdot f_s \cdot U_{OUT}} = \frac{12 V \cdot (15 V - 12 V)}{0,2 \cdot 0,6 A \cdot \frac{15 V}{12 V} \cdot 450 kHz \cdot 15 V} \approx 15 \mu H$$

L – Indukčnost spínaného induktoru

U_{IN} – Vstupní napětí do zvyšujícího obvodu

U_{OUT} – Výstupní napětí ze zvyšujícího obvodu

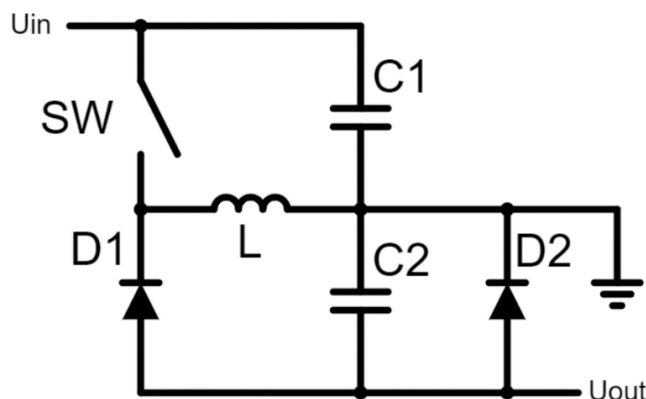
I_{OUT} – Výstupní proud ze zvyšujícího obvodu

f_s – Frekvence spínacího regulátoru

Třetí prvek je napěťový dělič tvořený odpory R3 a R4. Dělič zavádí napěťovou zpětnou vazbu a určuje tak velikost výstupního napětí, v tomto případě jsou hodnoty R3 a R4 voleny tak, aby při požadované hodnotě výstupního napětí, v tomto případě 15 V, dělil dělič na napětí 0,6 V, tedy napětí rovné napěťové referenci spínacího regulátoru. Dále je důležitým prvkem schottkyho dioda SS56 označená D3 (ve zjednodušeném schématu prvek D). Ta slouží k odvodu napětí ze zvyšovače do výstupního filtru. Posledním prvkem je výstupní vyhlazovací filtr (ve zjednodušeném schématu prvek C2). Ten je tvořený kondenzátory C7 a C8 a induktorem L4. Jeho účelem je minimalizace napěťového zvlnění na výstupu zdroje.

2.2.4 Zdroj -15 V

Záporné napětí 15 V je získáváno obvodem napěťového invertoru (zjednodušené zapojení je uvedeno ve zjednodušeném schématu). Skládá se z 6 prvků.



Obr. 3 – Zjednodušené schéma zapojení invertujícího obvodu

První prvek je integrovaný obvod AOZ1282 od výrobce Alpha & Omega Semiconductor nesoucí označení U1. Tento integrovaný obvod obsahuje spínací transistor (ve zjednodušeném schématu prvek SW), pulzně šířkový regulační obvod pracující na frekvenci 450 kHz a obsahující napěťovou referenci 0,8 V. Je dále opatřen externím bootstrapovým kondenzátorem C1, který zajišťuje plovoucí buzení pro integrovaný spínací prvek. Druhý prvek je výkonový induktor L1 (ve zjednodušeném schématu prvek L), jehož hodnota byla zvolena dle rovnic uvedených ve zdroji *Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage*, respektive podle dále uvedené rovnice 2.

$$(2) L = \frac{-U_{OUT} \cdot U_{IN}}{0,4 \cdot 2 \cdot I_{OUT} \cdot f_s \cdot (U_{IN} - U_{OUT})} = \frac{-(-15 V) \cdot 12 V}{0,4 \cdot 2 \cdot 1,2 A \cdot 450 \text{ kHz} \cdot (12 V - (-15 V))}$$

$$L \approx 15 \mu H$$

L – Indukčnost spínaného induktoru

U_{IN} – Vstupní napětí do invertujícího obvodu

U_{OUT} – Výstupní napětí z invertujícího obvodu

I_{OUT} – Výstupní proud z invertujícího obvodu

f_s – Frekvence spínacího regulátoru

Dalším prvkem je napěťový dělič tvořený odpory R1 a R2. Dělič zavádí napěťovou zpětnou vazbu a určuje tak velikost výstupního napětí, hodnoty R3 a R4 jsou voleny tak, aby při 15 V, tedy požadované hodnotě výstupního napětí, bylo na výstupu děliče napětí 0,8 V, tedy napětí rovné referenčnímu napětí integrovaného spínaného regulátoru. Třetí důležitým prvkem je schottkyho dioda SS56, respektive D1 (ve zjednodušeném schématu prvek D1). Ta slouží k zadržení změny polarity induktoru. Čtvrtým prvkem je usměrňovací dioda D2 (ve zjednodušeném schématu prvek D2). Její účel je vodit při prvotním spuštění měniče, kdy je přes ní napájen U1 po dobu náběhu výstupního záporného napětí. Posledním prvkem je opět výstupní vyhlazovací filtr (ve zjednodušeném schématu prvek C2). Ten je tvořený kondenzátory C3 a C4 společně s induktorem L2. Jeho úkol je minimalizovat výstupní napěťového zvlnění zdroje.

2.2.5 Rozpiska součástek

Rozpiska součástek viz příloha 2.2D.

2.3 Modul generátoru

Schéma zapojení viz souborová příloha 2.3A. Fotodokumentace viz příloha 2.3B a 2.3C

Modul generátoru slouží k vytvoření napětí harmonického či trojúhelníkového průběhu digitálně nastavitelné frekvence a amplitudy. Skládá se z 4 částí: syntezátoru signálu, dolní propusti o mezní frekvenci 1kHz, detektoru průchodu nulou a koncového zesilovače. Pomocí relé K1 je do signální cesty mezi syntezátorem signálu a koncovým zesilovačem připojována dolní propust. Relé je ovládáno pomocí pinu „mode“. Do detektoru průchodu nulou je veden stejný signál jako do koncového zesilovače.

2.3.1 Syntezátor signálu

Syntezátor signálu je obvod, ve kterém dochází k syntéze žádaného průběhu a k jeho zesílení na požadovanou úroveň. Skládá se z DDS obvodu a napěťového zesilovače s digitálním řízením zesílení.

2.3.1.1 Obvod DDS

Obvod DDS využívá integrovaného obvodu AD9833 od výrobce Analog Devices, respektive modulu osazeného tímto integrovaným obvodem společně s potřebným krystalovým rezonátorem a kapacitou pro integrovanou napěťovou referenci. Ve schématu nese modul označení U1. Jedná se o programovatelný generátor napěťových průběhů. Je řízen digitálně přes dedikovanou 3 vodičovou sběrnici SPI bez funkce chip-select, tudíž není možné na takovou sběrnici připojit další zařízení, a proto jsem se ji rozhodl pomocí mikrokontroleru softwarově emulovat. Sběrnice využívá piny:

- PA15 – SDATA, Serial Data, datová linka sériové sběrnice
- PA12 – SCLK, Serial Clock, taktovací linka sériové sběrnice
- PA11 – FSYNC, Frequency Synchronization, Synchronizace frekvence

Tento integrovaný obvod je schopný syntézy napětí harmonického, trojúhelníkového a obdélníkového průběhu s rozsahem frekvence od 0,1 Hz až po 12,5 MHz a rozlišením 0,1 Hz. V obvodu jsem ovšem zvolil rozsah jen do 100 kHz z důvodu, že cílové využití, tedy testování audio zesilovačů, širší pásmo nepotřebuje. Dále zde není využívána funkce obdélníkového průběhu z důvodu výrazně odlišné výstupní amplitudy takového signálu, jelikož není syntetizována integrovaným převodníkem digitál analog, ale je využíváno vnitřní logické úrovně 0 V - 2,5 V.

Generované signály harmonického a trojúhelníkového průběhu mají stejné napět'ové úrovně. Signál má napět'ový offset o hodnotě přibližně 344 mV a rozkmit 612 mVpp.

2.3.1.2 Obvod napět'ového zesilovače s digitálním řízením zesílení

Obvod napět'ového zesilovače s digitálním řízením zesílení je zde realizován pomocí jedné poloviny integrovaného dvojitého operačního zesilovače TL072 od výrobce Texas Instruments, označení U4A. Jedná se o nízko šumový operační zesilovač, u kterého je vstupní stupeň realizován pomocí transistorů J-FET. Je zde v zapojení invertujícího zesilovače. Vstupní impedance je tvořena 2 částmi.

První část je tvořena trimrem TR1, jehož odporová cesta je zapojena mezi výstup DDS obvodu a přes odpor R1 na zápornou napět'ovou referenci -2,5 V tvořenou pomocí integrované napět'ové reference AP431 od výrobce Diodes Incorporated U3. Účelem této konfigurace je eliminovat napět'ový offset vykazovaný DDS obvodem. Trimrem TR1 se tedy nastavuje napět'ová symetrie signálu. Mezi jezdec trimru a zem je zde připojena kapacita C14 za účelem omezení pásma a zlepšení odolnosti proti rušení.

Druhá část je zapojena mezi jezdec trimru TR1 a invertující vstup operačního zesilovače. Je tvořena sériovým spojením R3 a trimru TR2. Trimer TR2 slouží k nastavení maximální úrovně zesílení, a tedy ke kalibraci výstupní amplitudy.

Impedance ve zpětné vazbě je tvořena integrovaným obvodem X9C103 od výrobce Intersil, ve schématu nese označení U2. Jedná se o digitálně řízený 100 polohový lineární potenciometr, řízen je přes UP/DOWN protokol prostřednictvím pinů:

- PB6 – CS, Chip Select, aktivace komunikace s obvodem
- PB4 – INC, Increment, posun jezdce nahoru/dolu
- PB3 – U/D, Up/Down, volba směru posuvu jezdce

Je schopný provozu v napět'ovém rozsahu -5 V až 5 V, což je pro účely tohoto zapojení ideální. Integrovaný obvod je zde zapojen jako proměnný odpor v rozsahu 0–10 k Ω s rozlišením přibližně 100 Ω na krok. Pomocí něho je digitálně voleno žádané výstupní napětí v rozsahu

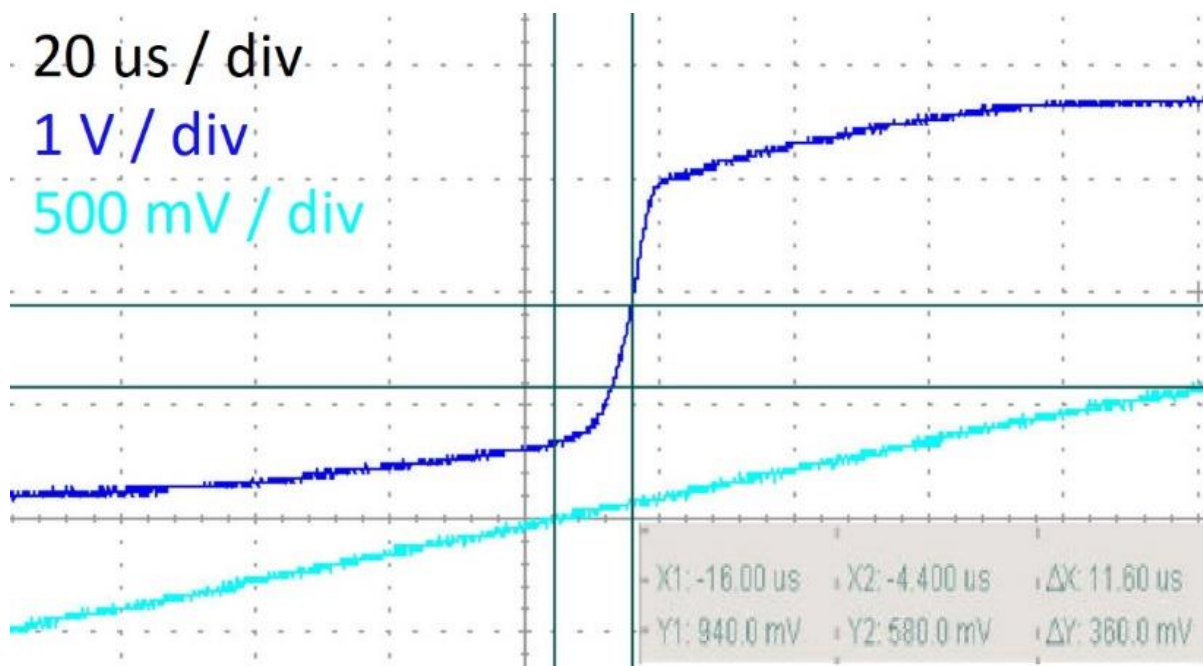
přibližně 10 mV až 1 V. Paralelně s ním je zapojena kapacita C12, její úkol je omezit pásmo a tím zlepšit stabilitu.

2.3.2 Dolní Propust

Dolní propust o mezní frekvenci 1 kHz slouží k propusti frekvencí a frekvenčních složek nižších jak 1kHz a k potlačení frekvencí a frekvenčních složek vyšších než 1 kHz. V tomto případě je využívána k minimalizaci harmonického zkreslení generovaného průběhu na pevné frekvenci 1kHz tak, že výrazně potlačuje vyšší harmonické složky průběhu. Jedná se o aktivní dolní propust 3. řádu s Čebyševovým průběhem frekvenční amplitudové charakteristiky. Je realizována pomocí druhé poloviny operačního zesilovače NE5532 U6B. Jedná se o nízko šumový operační zesilovač s velmi nízkým harmonickým zkreslením. Hodnoty propusti byly spočítány pomocí elektronické online kalkulačky od OKAWA Electric Design uvedené ve zdrojích. Pro svou nezávislost kapacity na napětí jsou větší hodnoty kapacit, respektive C5 a C6, voleny ve svitkovém provedení. Přenos obvodu při pracovní frekvenci je kalibrován pomocí trimru TR3.

2.3.3 Detektor průchodu generátoru nulou

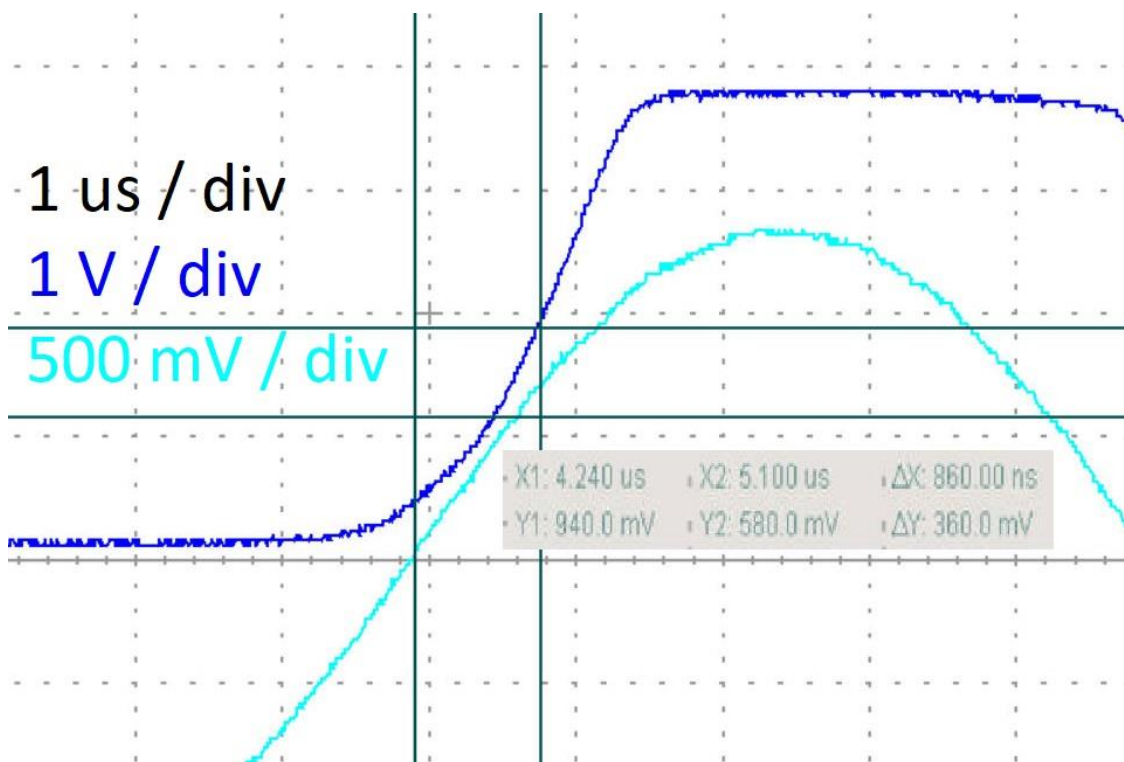
Detektor průchodu generátoru nulou je obvod, který sleduje průběh generátoru a při průchodu nulou překlápí polaritu svého výstupu. Jedná se o zapojení komparátoru bez hystereze s omezením rozkmitu. Je realizován pomocí druhé poloviny operačního zesilovače TL072 s označením U4B. Sledovaný signál je přiváděn právě přes odpor R23 na omezovač amplitudy. Ten je tvořen antiparalelním zapojením diod 1N4148 D1 a D2 na zem. Výstup z omezovače je zaveden na neinvertující vstup operačního zesilovače. Invertující vstup je zapojen přes odpor R22 na zem. Z invertujícího vstupu je vedena Zenerova dioda D5 na výstup zesilovače. Její účelem je omezení rozkmitu výstupu zesilovače na rozsah přibližně -700 mV až 3,2 V. Hlavním přínosem omezení rozkmitu je snížení vlivu mezní rychlosti přeběhu na rychlosti překlopení komparátoru. Napěťový rozsah z komparátoru je pomocí pull up odporu R28 a napěťového úbytku 2 diod 1N4148 D6 a D7 zapojených v sérii posunut o přibližně 1,4V výše. Tím je dosaženo výstupního rozsahu detektoru přibližně 700 mV až 4,6 V. Takový rozsah přibližně odpovídá úrovni TTL, která je vhodná pro snímání mikrokontrolerem.



Obr. 4 – Chování detektoru průchodu nulou při harmonickém napětí o kmitočtu 1 kHz

Na uvedených snímcích (Obr. 3 a Obr. 4) lze pozorovat chování detektoru průchodu nulou při sledování harmonického průběhu o kmitočtech 1 kHz a 100 kHz o amplitudě 1 V. Tyrkysový průběh je sledované napětí a modrý průběh je napěťová hladina na výstupu detektoru.

Levá svislice ve snímku zachycuje čas průchodu signálu nulou, pravá svislice zachycuje průchod výstupního napětí detektoru napěťovou hladinou 1,883 V. Tato hladina je horní mezí logické hodnoty HIGH v digitálním vstupu mikrokontroleru.



Obr. 5 – Chování detektoru průchodu nulou při sledování harmonického napětí o kmitočtu 100 kHz

Rozdíl mezi čarami je hodnota zpoždění detektoru. Při kmitočtu 1 kHz (Obr. 3) je hodnota zpoždění 11,6 μ s, tedy 1,16 % periody. U kmitočtu 100 kHz (Obr. 4) je hodnota zpoždění 860 ns, tedy 8,6 % periody. Tyto hodnoty zpoždění jsou uspokojivé pro účely měření frekvence či například pro implementaci funkce spouštění časové základny digitálního osciloskopu.

2.3.4 Koncový zesilovač

Koncový zesilovač je zesilovač se 2 úrovněmi zesílení a neměnnou výstupní impedancí o hodnotě 50 Ω . Je tvořen druhou polovinou operačního zesilovače NE5532 od výrobce Texas Instruments U6A v zapojení invertujícího zesilovače, výstup je posílen diskretním sledovačem napětí. Vstupní impedance invertujícího zesilovače je tvořena pomocí paralelní kombinace R8 a TR4 v sérii s odporem R12. Paralelní kombinace R8 a TR4 je přemostitelná pomocí polovodičového relé CPC1017 od výrobce Ixys značeného U5. Impedance ve zpětné vazbě je tvořena odporem R14 vedoucího z výstupu diskretního sledovače a kapacitou C13 vedenou z výstupu operačního zesilovače. Úrovně zesílení nastavují rozsahy výstupního napětí na hodnoty 10 mV až 1 V a 1 V až 10 V. Jsou voleny pomocí velikosti vstupní impedance. Pro rozsah 10 mV až 1 V je relé U5 deaktivované a vstupní impedance je tvořena paralelní kombinací R8 a TR4 a sériovým odporem R12, tím je nastaveno prakticky jednotkové zesílení. Pro rozsah 1 V až 10 V je relé U5 aktivováno a vstupní impedance je tvořena pouze hodnotou R12, je tak nastaveno zesílení o hodnotě přibližně 10. Diskretní napěťový sledovač je tvořen pomocí komplementární dvojice transistorů NPN a PNP, Q2 a Q3, jejichž pracovní body jsou nastaveny pomocí složeného děliče tvořeného odpory R16, R17, R18 a R19. Výstup operačního zesilovače je přiveden na pomezí odporů R17 a R18, přičemž s každým z nich je paralelně přemostěn kapacitou, respektive C8 a C9. Je tak vytvořen stejnosměrně vázaný napěťový sledovač schopný dodávat dostatečný výstupní výkon. Výstup generátoru je přes odpor 50 Ω přepínán mezi výstup koncového zesilovače a zem pomocí relé K2. Odpor 50 Ω je vytvořen paralelním zapojením 3 odporů o hodnotách 150 ohm, respektive R24, R25 a R26.

2.3.5 Rozpiska součástek

Rozpiska součástek viz příloha 2.3D.

2.4 Vstupní modul

Schéma zapojení viz souborová příloha 2.4A. Fotodokumentace viz příloha 2.4B a 2.4C.

Vstupní modul slouží k úpravě úrovně měřeného napětí, k převodu měřeného proudu na napětí k detekci průchodu obou těchto veličin nulou. Je zároveň i zdrojem referenčního napětí pro převodník analog-digitál. Skládá se ze 5 hlavních bloků a následného stejnosměrného vázání výstupu na napětí 1,65 V pro převodník analog-digitál v mikrokontroleru. Hlavní bloky jsou: obvod úpravy napěťové úrovně, převodník proud napětí, detektory průchodu napětí a proudu nulou a ADC reference.

2.4.1 Obvod úpravy napěťové úrovně

Obvod úpravy napěťové úrovně slouží k zesílení či zeslabení vstupního měřeného napětí na úroveň vhodnou pro převodník analog digitál. Je tvořen ze 2 částí: vstupního atenuátoru a napěťového zesilovače s digitálním exponenciálně řízeným zesílením.

2.4.1.1 Vstupní atenuátor

Vstupní atenuátor slouží k volbě mezi měřením napětí na generátoru a výstupem měřeného zesilovače a k volbě 2 režimů vstupní citlivosti, 0 V až 3 V a 3 V až 30 V.

Je realizován jako invertující zapojení operačního zesilovače TL071 od výrobce Texas Instruments U1. Invertující vstup je vybaven ochranou ve formě diodového omezovače tvořeného diodami 1N4148 D3 a D4. Vstupní impedance je frekvenčně kompenzovaný napěťový dělič s přepínatelnou velikostí. Skládá se ze dvou impedancí.

První impedance je tvořena paralelním spojením odporu 900 k Ω , který je vytvořen sériovým spojením R3 a R8, s laditelnou kapacitou o hodnotě přibližně 15 pF tvořenou paralelním spojením C1 a TC1. Kapacitní trimer TC1 slouží k nastavení frekvenční kompenzace.

Druhá impedance je odpor R9 100 k Ω vedoucí do invertujícího vstupu a kapacita C3 150 pF vedoucí na zem.

První impedance je přemostitelná pomocí jazýčkového relé K4, tím je dosaženo toho, že vstupní impedance je tvořena pouze druhou impedancí, a tudíž je aktivován režim vyšší citlivosti, respektive 0 V až 3 V. V případě nepřemostění je vstupní impedance přibližně 10x vyšší, a vstupní citlivost nižší, umožňující rozsah měření 3 V až 30 V. Příznivou vlastností režimu nižší citlivosti je, že celková vstupní impedance má hodnotu 1 M Ω paralelně s přibližně 15 pF. Taková hodnota vstupní impedance je běžná u osciloskopů a umožňuje kompatibilitu s osciloskopickými sondami 10x, rozšiřující rozsah dále na 30 V až 300 V. V tomto režimu ovšem nelze využívat měření proudu do zátěže.

Volba zdroje vstupu je prováděna pomocí relé K1. Dále je možné vstup odpojovat pomocí jazýčkového relé K2. Odpojení vstupu umožňuje mikrokontroleru změřit napěťovou odchylku nuly nutnou pro přesné měření.

Impedance ve zpětné vazbě je tvořena sériovým spojením R19 a TR1. Pomocí trimru TR1 se kalibruje minimální vstupní citlivost.

Při režimu nižší citlivosti je přenos celého obvodu přibližně 0,22, při vyšší citlivosti je přenos přibližně 2,2.

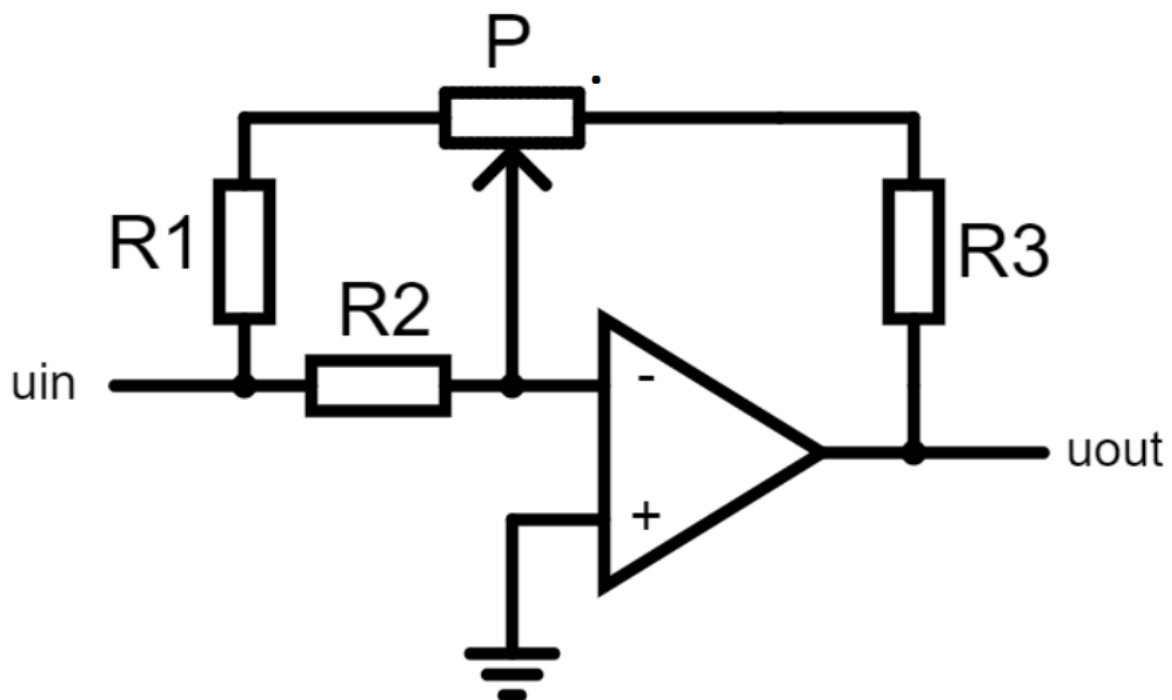
2.4.1.2 Napěťový zesilovač s digitálním exponenciálně řízeným zesílením

Napěťový zesilovač s digitálním exponenciálně řízeným zesílením je nejdůležitější prvek obvodu úpravy napěťové úrovně. Jeho úkolem je zesílovat takovou hodnotou, aby jakýkoliv rozkmit napětí na vstupu pokryl rozkmit 3,3 V_{pp} na výstupu, a tím využil plný rozsah převodníku analog digitál tedy maximalizoval přesnost měření. Jedná se o invertující zapojení využívající jedné poloviny dvojitého operačního zesilovače NE5532 od výrobce Texas Instruments s označením U2A. Pro řízení zesílení je zde využit integrovaný obvod X9C103 od

výrobce Intersil, ve schématu nese označení U3 (ve zjednodušeném schématu potenciometr P). Jedná se o digitálně řízený 100 polohový lineární potenciometr o rozsahu 10 kΩ s rozlišením přibližně 100 Ω, řízen je přes UP/DOWN protokol prostřednictvím pinů:

- PB7 – CS, Chip Select, aktivace komunikace s obvodem
- PB3 – INC, Increment, posun jezdce nahoru/dolu
- PB4 – U/D, Up/Down, volba směru posuvu jezdce

Je schopný provozu v napět'ovém rozsahu -5 V až 5 V, mezní hodnoty jsou -8 V až 8 V, ovšem v zapojení se může vyskytovat až saturační napětí U1, přibližně -12 V až 12 V. Proto jsou krajní dorazy tohoto obvodu chráněny pomocí Zenerových diod D15, D16, D17 a D18 s průrazným napětím 5,6 V. Pomocí odporů R20 a R21 (ve zjednodušeném schématu odpor R1), R23 (ve zjednodušeném schématu odpor R2), R27 a R30 (ve zjednodušeném schématu odpor R3) je jeho lineární průběh přiblížen průběhu exponenciálnímu v rozsahu zesílení přibližně 0,5 až 5.



Obr. 6– Zjednodušené schéma zapojení zesilovače s exponenciálně řízeným zesílením

Na uvedeném zjednodušeném schématu lze pozorovat zapojení umožňující převést lineární průběh potenciometru P na exponenciální průběh řízení přenosu zesilovače. Hodnoty součástek jsem počítal pomocí dále uvedených odvozených rovnic 3 a 4.

Vztah pro ideální průběh přenosu zesilovače:

$$(3) |A_u| = 0,5 \cdot e^{(p \cdot \ln 10)}$$

$|A_u|$ – absolutní hodnota přenosu zesilovače v intervalu $\langle 0,5; 5 \rangle$

p – poloha jezdce na potenciometru v intervalu $\langle 0; 1 \rangle$

Vztah pro skutečný průběh přenosu zesilovače:

$$(4) |A_u| = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{R_{p1} + R_3}{(R_1 + R_{p2}) \cdot R_2} = \frac{R_p \cdot p + R_p \cdot c}{(R_p \cdot a + R_p \cdot (1 - p)) \cdot R_p \cdot b}$$

$|A_u|$ – absolutní hodnota přenosu zesilovače v intervalu $\langle 0,5; 5 \rangle$

Z_1 – vstupní impedance

Z_2 – impedance ve zpětné vazbě

R_{p1} – odpor potenciometru P od spodního dorazu po jezdec

R_{p2} – odpor potenciometru P od jezdce po horní doraz

R_p – celkový odpor potenciometru P

p – poloha jezdce na potenciometru v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$

a – koeficient hodnoty odporu R_1

b – koeficient hodnoty odporu R_2

c – koeficient hodnoty odporu R_3

Metoda spočívá ve zvolení takových hodnot koeficientů a ; b ; c , aby se skutečný průběh zesílení počítaný dle rovnice 4 co možná nejvíce blížil průběhu ideálnímu dle rovnice 3. Volení hodnot koeficientů jsem provedl pomocí programu Microsoft Excel, kde jsem vytvořil graf obsahující výstup z rovnice 4 zachycující ideální průběh a výstup z rovnice 3 zachycující průběh s hodnotami koeficientů a , b , c . Hodnoty koeficientů jsem zprvu zadal náhodně a posléze jsem jejich hodnoty za sledování průběhu ručně upravoval tak, aby se sledovaný průběh co nejvíce blížil k ideálnímu průběhu.

Výsledné hodnoty koeficientů a odporů jsou:

$$a = 0,32; R_1 = 3,2 \text{ k}\Omega$$

$$b = 1,5; R_2 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$c = 0,352; R_3 = 3,52 \text{ k}\Omega$$



Obr. 7– Graf průběhů zesílení zesilovače v závislosti na poloze potenciometru P

Na grafu lze sledovat průběhy zesílení v závislosti na poloze potenciometru P. Červený průběh je ideální exponenciální závislost. Černý průběh je zobrazení lineárního průběhu zesílení v rozsahu 0,5 – 5. Modrý průběh reprezentuje skutečný průběh zesílení dle rovnice 4 se zvolenými hodnotami koeficientů. Lze pozorovat, že modrý průběh se blíží červenému průběhu a je tedy přibližně exponenciální a téměř uspokojivý pro potřebný účel. Pro dosažení potřebné míry uspokojení tohoto účelu, bylo ze 100 úrovní celého průběhu vybrány pouze takové úrovně, které se nejvíce blížily hodnotám ideálního průběhu. Ve výsledku bylo vybráno pouze 15 úrovní ze 100 možných.

Celkový rozsah přenosu obvodu úpravy zesílení je v rozsahu 0,11 až 11 o 30 krocích. Výsledný vstupní napěťový rozsah je tedy 300 mV až 30 V.

V zapojení je mezi výstup zesilovače a invertující vstup doplněna kapacita C14 za účelem omezení horního mezního kmitočtu a prevence kmitání.

2.4.2 Převodník proud napětí

Převodník proud napětí slouží k převodu proudu tekoucího do externí zátěže na napěťovou hodnotu vhodnou pro převodník analog digitál. Využívá dvou rozsahového snímacího odporu

tvořeného sériovým spojením odporů R4 a R5. Dvou rozsahů je dosaženo přemostitelností R5 pomocí relé K3. Pokud odpor R5 není přemostěn, převodník je v režimu vyšší citlivosti pro měření proudu v rozsahu 0 A až 250 mA obou polarit. Je-li přemostěn, tak je převodník v režimu nižší citlivosti pro měření proudu v rozsahu 250 mA až 4 A obou polarit. Úbytek napětí na snímacím odporu je zesílen pomocí neinvertujícího zesilovače tvořeného druhou polovinou dvojitého operačního zesilovače NE5532 U2B. Zesílení je u něho nastaveno pomocí děliče tvořeného sériovým spojením TR2 a R17 společně s R12. Trimer TR2 slouží ke kalibraci minimální citlivosti. Výsledné zesílení se pohybuje okolo hodnoty 13,2.

Mezi výstup zesilovače a jeho invertující vstup je zapojena kapacita C2 za účelem omezení horního mezního kmitočtu a zamezení kmitání obvodu.

2.4.3 Detektory průchodu napětí a proudu nulou

Detektory průchodu napětí a proudu nulou jsou obvody, které slouží ke generaci signálu, který sleduje u napětí nebo proudu průchod nulou. Jedná se o identické obvody jako je obvod detekce průchodu generátoru nulou. Rozbor funkce a zapojení viz. 2.3.3 Detektor průchodu generátoru nulou.

2.4.4 ADC Reference

ADC reference je obvod, který slouží k vytváření napěťové reference pro analog digitál převodník. Je tvořen pomocí integrované napěťové reference AP431 od výrobce Diodes Incorporated nesoucí označení U5. Na ní je přiváděn proud pomocí odporu R39 zapojeného z napětí 5 V. Referenční napětí je nastaveno pomocí odporového děliče na hodnotu 3,3 V. Odporový dělič je tvořen odpory R37 a R38, jejich hodnoty jsou vypočteny tak, aby z úrovně 3,3 V dělily na napětí 2,5 V. Pro zamezení kmitání je reference doplněna o kapacitu C11.

2.4.5 Rozpiska součástek

Rozpiska součástek viz příloha 2.4D.

2.5 Regulace ventilátoru chlazení

Schéma zapojení viz souborová příloha 2.5A. Fotodokumentace viz příloha 2.5B.

Pro zajištění stability měřících vlastností je nutné zajistit poměrně stálou a neměnnou teplotu komponentů. K tomuto účelu slouží spojitě regulovaný systém chlazení pomocí průtoku vzduchu.

Tento systém je realizován pomocí tepelné zpětné vazby termistoru THR1, který je umístěn na desce vstupního modulu, a jednoduchého spojitého proporcionalního lineárního regulátoru otáček ventilátoru.

Zapojení spočívá v můstku dvou napěťových děličů. První napěťový dělič má tvořený horní odpor pomocí sériové kombinace odporu R1 a odporového trimru TR1, dolní odpor je tvořen termistorem THR1 nacházející se na vstupním modulu. Druhý napěťový dělič dělí na polovinu pomocí odporů R2 a R3. Na první dělič je napojena báze transistoru Q1 a na druhý jeho emitor, přičemž kolektor je zaveden na bázi transistoru Q2. Q1 tak plní funkci diferenciálního

zesilovače, který po překročení rozdílu napětí obou děličů zhruba 0,6V, což je úbytek přechodu PN báze emitor Q1, začne pouštět do kolektoru proud, který je veden na bázi Q1. Q1 je v zapojení SE a kolektorem zvyšuje proud ventilátorem. Průtok vzduchu způsobený ventilátorem zajistí chlazení všech komponent tak, aby se na vstupním modulu udržela stálá teplota.

Dle nastavení TR1 se mění, při jaké teplotě se první dělič odchýlí o 0,6V od druhého děliče, a je tak dosaženo spojitě regulace teploty.

2.5.1 Rozpiska součástek

Viz příloha 2.5C.

2.6 Dotykový TFT display

Fotodokumentace viz příloha 2.6A a 2.6B

Jedná se o 2,4palcový barevný LCD display na bázi technologie TFT doplněný digitizér dotyku. Jeho rozlišení je 240x320 pixelů, využívá integrovaný řadič ILI9341 od výrobce ILITEK. Digitizér dotyku je 4 vodičový odporový a k jeho snímání je využíváno integrovaného obvodu XPT2046 od výrobce XPT.

Display je umístěný na plošném spoji s pinovými hřebínky ve formě modulu.

3 Funkce a vlastnosti

Hlavním účelem přístroje je být schopný měřit parametry nízkofrekvenčních zesilovačů zvuku. Mezi ně patří amplitudová frekvenční charakteristika, zesílení, výstupní výkon, harmonické zkreslení a harmonické zkreslení se šumem.

V přístroji jsou kombinovány 3 části:

- Generátor funkcí, harmonický a trojúhelníkový průběh
- Vzorkování průběhu napětí, volba mezi výstupem generátoru či vstupem přístroje
- Vzorkování průběhu proud, zapojen tak aby vzorkoval proud tekoucí z napěťového vstupu přístroje do připojené zátěže a na zem

Tyto 3 části a jejich vzájemné kombinace nabízejí řadu funkcí, které může přístroj provádět.

Funkce implementované do přístroje:

- Generátor funkcí
 - Harmonický a trojúhelníkový průběh, filtrovaný harmonický průběh 1kHz
 - frekvence od 0,1 Hz do 99,9999 kHz
 - amplituda od 10 mV do 10 V
 - výstupní impedance 50 Ω , schopnost pracovat do zkratu

- Multimetr
 - Měření střední hodnoty a efektivní hodnoty napětí
 - Měření střední hodnoty a efektivní hodnoty proudu
 - Měření zdánlivého výkonu do zátěže
- Osciloskop
 - Pásmo 100 kHz
 - Časová základna od 10 μ s / dílek až po 5 ms / dílek
 - Vertikální kanál od 50 mV / dílek až po 5 V / dílek
 - Spouštění náběžnou hranou
 - Volba zdroje signálu, generátor nebo napěťový vstup
- Analyzátor harmonického zkreslení a frekvenční čítač
 - Měření harmonického zkreslení bez a se šumem
 - Měření frekvence, střídy a periody v rozsahu 20 Hz až 100 kHz, rozlišení jednotky μ s
- Automatické měření – naměřené hodnoty jsou ukládány na externí datové médium
 - Ampalyze – změření všech parametrů zvukového zesilovače
 - Freqchar – změření pouze frekvenční charakteristiky se zadanou amplitudou generátoru
- Schopnost sebe kalibrace

Funkce jsou dotykově volitelné z hlavní nabídky, viz obr. 8.

V hlavní nabídce tlačítko „GEN“ (1) spouští stránku konfigurace signálního generátoru, generátor je schopný běhu na pozadí a jeho aktuální stav je zobrazován na tlačítku, „OFF“ znamená, že generátor je vypnutý, „SINUS“ znamená, že generátor generuje harmonický průběh, „TROJU“ generuje trojúhelníkový průběh a „REF 1k“ znamená, že generátor generuje tzv. referenční kmitočet o frekvenci 1 kHz. Tlačítko „MULTI“ (2) spouští stránku multimetru. Tlačítko „OSCI“ (3) spouští osciloskop. Tlačítko „ZKRES FREK“ (4) spouští stránku analyzátoru zkreslení a frekvenčního čítače. Tlačítko „AUTO“ (5) spouští stránku volby automatického měření. Posledně tlačítko „NAST.“ (6) spouští stránku nastavení, kde lze přístroj zkalibrovat či připojit externí datové médium.

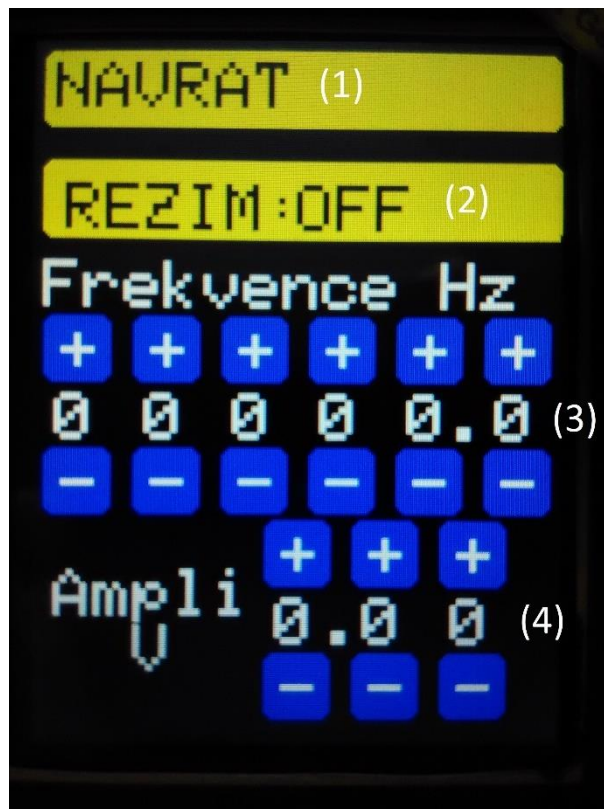


Obr. 8 – hlavní nabídka přístroje

3.1 Generátor funkcí

Generátor funkcí slouží k vytváření periodického signálu specifického napětového průběhu. V tomto případě je implementován jako generátor harmonického průběhu, trojúhelníkového průběhu a jako generátor tzv. referenčního kmitočtu, tedy velmi čistého harmonického průběhu o specifické frekvenci 1 kHz a s harmonickým zkreslením nižším než 0,03 % či méně než -70dB (změřeno s pomocí zvukové karty počítače). U všech volitelných průběhů kromě referenčního kmitočtu je možné nastavit frekvenci v rozsahu 0,1 Hz až 99,9999 kHz s nejmenším krokem 0,1 Hz. U všech volitelných kmitočtů je nastavitelná amplituda ve dvou rozsazích, rozsah 10 mV až 1 V s nejmenším možným krokem 10 mV a rozsah 1 V až 10V s nejmenším krokem 100 mV, generátor pro svůj účel nepotřebuje nastavitelnou stejnosměrnou složku, a tudíž generované průběhy jsou vždy symetrické. Výstup generátoru disponuje pevným vnitřním odporem 50 Ω a je schopný trvale pracovat do zkratu.

Volba průběhu, frekvence a amplituda jsou dotykově voleny, viz obr. 9.



Obr. 9 – Stránka generátoru

Tlačítko „NAVRAT“ (1) slouží k návratu na hlavní nabídku. Tlačítko „REZIM“ (2) slouží k nastavení výstupního napěťového průběhu generátoru, volba „OFF“ znamená, že generátor není aktivní a negeneruje žádný průběh. Volba „SINUS“ znamená, že generátor generuje harmonický napěťový průběh. Při volbě „TROJU“ generátor generuje napěťový průběh ve tvaru trojúhelníku. Posledně volba „REF 1k“ indikuje, že generátor je v režimu generace referenčního kmitočtu o pevné frekvenci 1 kHz, bez ohledu na další nastavení frekvence.

Sít' tlačítek „+“ a „-“ pod nadpisem „Frekvence Hz“ (3), slouží k nastavení výstupní frekvence generátoru.

Sít' tlačítek „+“ a „-“ napravo od nadpisu „Ampli V“ (3), slouží k nastavení výstupní amplitudy generátoru. Desetinná tečka v čísle udávající amplitudu též indikuje aktuální rozsah generátoru. Pokud se tečka nachází mezi první a druhou cifrou je aktivní rozsah 10 mV až 1 V s nejmenším krokem 10 mV. Je-li tečka mezi druhou a třetí cifrou, je aktivní rozsah amplitudy 1 V až 10 V s nejmenším krokem 100 mV.

3.2 Multimetr

Multimetr kombinuje měření více různých veličin do jednoho. V případě místní implementace měří střední a efektivní hodnoty napětí a proudu v jednom okamžiku a z jejich hodnot vypočítává zdánlivý výkon (který je při odporové zátěži i činný).

Vstupní rozsah napětí je rozdělen na celkem 30 kroků vstupního přenosu a dosahuje tak celkového rozsahu měření okamžitých hodnot napětí 0 V až 30 V symetricky, přičemž nejmenší rozsah činí 0 V až 300 mV symetricky a největší rozsah činí přibližně 26 V až 30 V symetricky. Rozsahy jsou automaticky přepínány tak, aby maximální amplituda měřeného signálu vždy pokrývala celý rozsah analog-digitál převodníku, a bylo tak maximalizováno rozlišení měření napětíových průběhů. Při rozdělení na 30 rozsahů je přepnuto o rozsah výše, pokud maximální amplituda překročí 99 % rozsahu analog-digitál převodníku. O rozsah méně je přepínáno, pokud je maximální amplituda nižší než 87 % rozsahu analog-digitál převodníku.

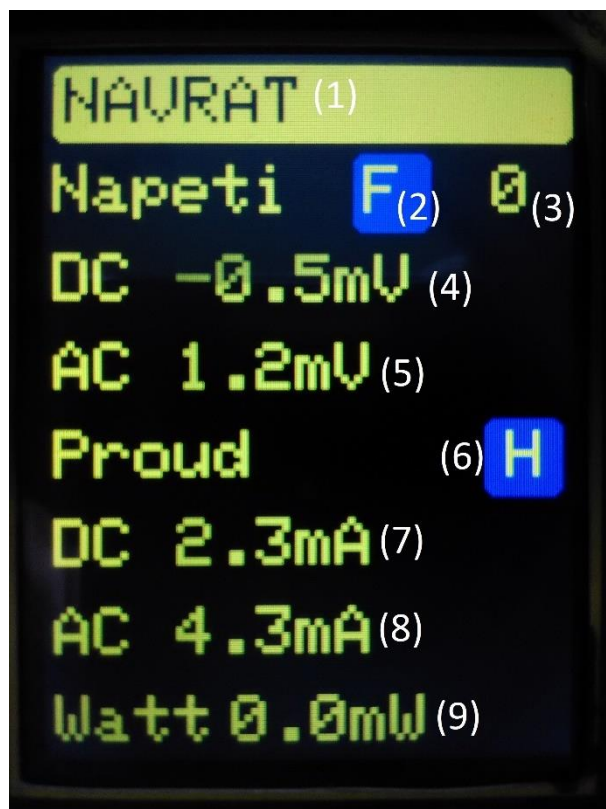
Vstupní rozsah proudu je dělen pouze na 2 manuálně přepínané rozsahy. Rozsah měření velkých proudů je určen pro měření okamžitých hodnot proudu v rozsahu 200 mA až 5 A (jištěno pojistkou). Rozsah měření malých proudů slouží k měření proudu v rozsahu 0 A až 250mA.

Multimetr využívá 12 bit bipolárních vzorkovacích obvodu napětí a proudu k zachycení 5K (5120) vzorků průběhu napětí či proudu se dvěma volitelnými rychlostmi vzorkování. Režim pomalého vzorkování vzorkuje s rychlostí 10,49 μ s (95,3 KSPS) a nabízí tak vzorkování ve frekvenčním pásmu 19 Hz až 47,6 kHz. Režim rychlého vzorkování vzorkuje s rychlostí 0,58 μ s (1,7 MSPS) a teoreticky by umožnil vzorkovat ve frekvenčním pásmu 337 Hz až 850 kHz, ovšem tak široké pásmo je pro účel analýzy zvukových zesilovačů nadbytečné, a proto je horní mezní frekvence vzorkovaného pásma omezena na 100 kHz. Nadbytečné množství vzorků tak přispívá ke zvýšení efektivního rozlišení převodu analog-digitál.

Se vzorkovanými průběhy uloženými v paměti mikrokontroleru jsou prováděny matematické výpočty střední hodnoty a efektivní hodnoty dané veličiny. Následně je ze známých efektivních hodnot obou veličin spočtena hodnota zdánlivého výkonu.

Vypočtené hodnoty veličin jsou zobrazeny na displeji s příslušnými jednotkami.

Vzhled zobrazení stránky multimetru a příslušných ovládacích prvků viz obr. 10.



Obr. 10 – Stránka multimetru

Tlačítko „NAVRAT“ (1) slouží k návratu na hlavní nabídku přístroje. Tlačítko „F/S“ (2) slouží k nastavení vzorkovací rychlosti převodníků analog-digitál, „F“ značí „Fast“ tedy rychlé vzorkování, „S“ značí „Slow“ tedy pomalé vzorkování. Napravo od tlačítka F/S se nachází indikátor aktuálního pod rozsahu vstupního napětí (3). Řádek „DC“ pod nadpisem „Napeti“ (4), zobrazuje naměřenou střední hodnotu napětí. Řádek „AC“ pod nadpisem „Napeti“ (5), zobrazuje naměřenou efektivní hodnotu střídavého napětí.

Tlačítko „H/L“ (6) slouží k volbě rozsahu měření proudu, „H“ značí „High“ tedy měření velkých proudů, „L“ značí „Low“ tedy měření malých proudů.

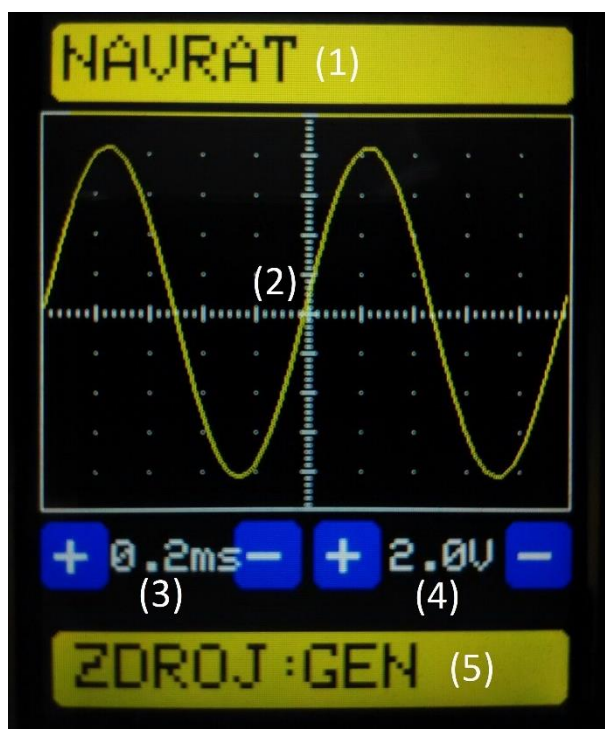
Řádek „DC“ pod nadpisem „Proud“ (7), zobrazuje naměřenou střední hodnotu proudu. Řádek „AC“ pod nadpisem „Proud“ (8), zobrazuje naměřenou efektivní hodnotu střídavého proudu.

Řádek „Watt“ zobrazuje aktuální hodnotu naměřeného činného výkonu do zátěže.

3.3 Osciloskop

Osciloskop slouží ke grafickému zobrazení průběhu napětí v závislosti na čase. Je implementován s pevným stejnosměrným vázáním signálu pro frekvenční pásmo 100 kHz. Využívá stínítko 10 dílků na 10 dílků s kalibrovanou časovou základnou v rozsahu 10 μ s / dílek až po 5 ms / dílek s krokem 1 2 5 a s kalibrovaným vertikálním kanálem napětí s rozsahem 50mV / dílek až po 5 V / dílek s krokem 1 2 5. Je pevně implementováno spouštění časové základny náběžnou hranou signálu. Je možné volit mezi zobrazováním průběhu napětí na generátoru či na napěťovém vstupu.

Vzhled zobrazení stránky osciloskopu a příslušných ovládacích prvků viz obr. 11.



Obr. 11 – Stránka osciloskopu

Tlačítko „NAVRÁT“ (1) slouží k návratu na hlavní nabídku přístroje. Stínítko s 10x10 dílky (2) zobrazuje časový průběh napětí dle zvolených měřítek. Prvek pro volbu rychlosti časové základny (3) umožňuje tlačítkem „+“ zpomalit nebo tlačítkem „-“ zrychlit časovou základnu. Prvek pro volbu zesílení vertikálního kanálu (4) umožňuje tlačítkem „+“ zeslabit nebo tlačítkem „-“ zesílit napěťový průběh. Tlačítko „ZDROJ“ umožňuje volit zdroj signálu, volí mezi generátorem „GEN“ nebo napěťovým vstupem „EXT“.

3.4 Analyzátor harmonického zkreslení a frekvenční čítač

Analyzátor harmonického zkreslení využívá zpětné Fourierovi transformace ke zjištění amplitud jednotlivých harmonických složek navzorkované periody signálu.

Je počítáno 20 harmonických složek, velikost vybraného vzorku periody průběhu je 42 vzorků.

Efektivní hodnoty vyšších harmonických složek sečte a porovná vůči efektivní hodnotě první harmonické a tím určí velikost harmonického zkreslení. Pro určení harmonického zkreslení se šumem je pomocí Fourierovi transformace syntetizována první harmonická, a ta je odečtena z navzorkované periody. U rozdílu obou průběhů je vypočtena efektivní hodnota napětí, která obsahuje jak efektivní hodnotu harmonických složek, tak i efektivní hodnotu šumového napětí v daném průběhu.

Implementace vzorkování napětí je stejná jako u multimetru, viz. kapitola 3.2 Multimetr.

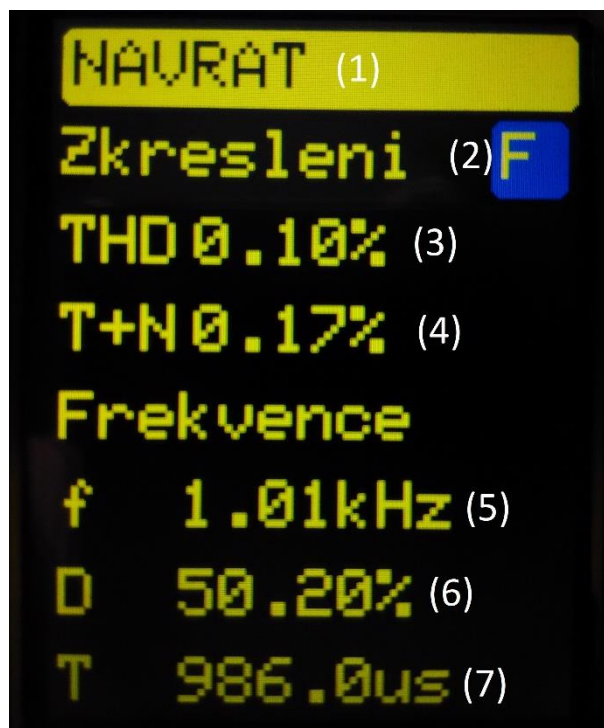
Z navzorkovaného průběhu je pomocí funkce hledající průchody nulou vybrán vzorek jedné periody.

Vzhledem ke skutečnosti, že počet vzorků na periodu signálu je výrazně vyšší než počet vzorků potřebných pro provedení harmonické analýzy, je využíváno metody tzv. supersamplingu neboli průměrování okolí potřebného vzorku, tím je dosaženo vyššího efektivního rozlišení převodníku analog-digitál a vyšší přesnosti měření.

Frekvenční čítač slouží k měření frekvence, periody a střídy periodického signálu. Je implementován pomocí měření času mezi průchody měřeného signálu nulou pomocí signálu z detektorů průchodu měřeného signálu nulou. Je schopný měřit frekvenci v rozsahu 20 Hz až 100 kHz s rozlišením jednotek μs .

Vzhled zobrazení stránky měřiče harmonického zkreslení a frekvenčního čítače s jejich příslušnými ovládacími prvky viz obr. 12.

Tlačítko „NAVRAT“ (1) slouží k návratu na hlavní nabídku přístroje. Tlačítko „F/S“ (2) slouží k nastavení vzorkovací rychlosti převodníků analog-digitál, „F“ značí „Fast“ tedy rychlé vzorkování, „S“ značí „Slow“ tedy pomalé vzorkování. Řádek „THD“ (3) značí „Total Harmonic Distortion“ neboli celkové harmonické zkreslení. Zobrazuje se zde velikost celkového harmonického zkreslení v %. Řádek „T+N“ (3) značí „Total Harmonic Distortion + Noise“ neboli celkové harmonické zkreslení se šumem.



Obr. 12 – Stránka měřiče zkreslení a frekvenčního čítače

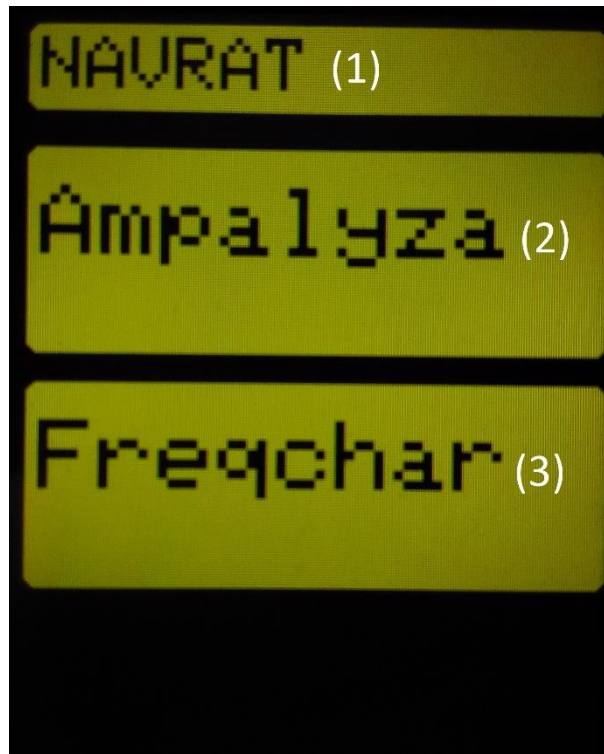
Zobrazuje se zde velikost celkového harmonického zkreslení se šumem v %. Řádek „f“ zobrazuje frekvenci v příslušných jednotkách. Řádek „D“ značí „Duty cycle“ a zobrazuje střihu v %. Řádek „T“ zobrazuje periodu v příslušných jednotkách.

3.5 Automatické měření

Automatické měření slouží k výraznému urychlení a usnadnění měřících úloh. V tomto případě jsou implementována dvě měření. První měření jsem nazval „Ampalyza“ nebo „Ampalýza“, ve kterém jsou s minimálním zásahem člověka změřeny veškeré základní parametry zesilovače zvuku. Druhé měření je „Freqchar“ neboli čistě měření frekvenční amplitudové charakteristiky se zadanou amplitudou generátoru.

Výsledky obou měření jsou uloženy na externí datové médium ve formátu tabulkového souboru s příponou .csv, který je snadno použitelný např. ve programu Microsoft Excel pro další zpracování či pro tvorbu zprávy o měření.

Vzhled zobrazení stránky automatizovaného měření a jejich příslušných ovládacích prvků viz obr. 13.



Obr. 13 – Stránka automatického měření

Tlačítko „NAVRAT“ (1) slouží k návratu na hlavní nabídku přístroje. Tlačítko „Ampalyza“ (2) spouští automatické měření všech základních parametrů zesilovače, podmínkou spuštění je připojení karty SD. Tlačítko „Freqchar“ (3) spouští automatické měření frekvenční charakteristiky.

3.5.1 Funkce „Ampalyza“

Automatický test „Ampalyza“ umožňuje po počátečním zásahu člověka automaticky změřit veškeré základní parametry zesilovače. Mezi tyto parametry patří:

- Zesílení a zisk
- Výstupní výkon
- Vstupní amplituda signálu
- Výstupní amplituda signálu
- Harmonické zkreslení
- Harmonické zkreslení se šumem
- Frekvenční amplitudová charakteristika
- Šumové napětí na výstupu zesilovače

Test probíhá následovně:

- 1) Uživatel zvolí, zda se má výkon do zátěže měřit přímo přístrojem (zátěž je zapojena na svorky „EXT LOAD“) nebo se má odvozovat ze zadané hodnoty impedance (zátěž je zapojena přímo na zesilovač a napěťový vstup přístroje je na ni paralelně připojen)
- 2) Uživatel nastaví zesílení měřeného zesilovače (hlasitost) na maximální hodnotu. Přístroj změří výchozí hodnotu zesílení zesilovače pomocí velmi malé amplitudy z generátoru funkcí.
- 3) Příprava na hledání prahové výstupní amplitudy, kdy ještě nedochází k ořezu signálu (clippingu, saturaci). Uživatel nastaví zesílení (hlasitost) na minimum.
- 4) Hledání prahové výstupní amplitudy, kdy ještě nedochází k ořezu signálu (clippingu, saturaci). Na obrazovce přístroje je pomocí osciloskopu zobrazován tvar výstupního napěťového průběhu měřeného zesilovače. Úkolem uživatele je zvyšovat zesílení měřeného zesilovače (jeho hlasitost) dokud se na zobrazovaném průběhu neobjeví ořez signálu (clipping, saturace). Uživatel následně zesílení (hlasitost) sníží tak aby k danému nežádoucímu jevu již těsně nedocházelo a stiskne tlačítko „OK“.
- 5) Nyní je již měření v plně automatickém režimu, postupně změří zesílení a výstupní výkon do zátěže dle na začátku zvolené metody. Dále změří vstupní a výstupní amplitudu, změří hodnoty harmonického zkreslení a harmonického zkreslení se šumem, frekvenční amplitudovou charakteristiku v rozsahu 22 Hz až 100 kHz s 10 logaritmickými kroky na dekádu a změří výstupní šumové napětí na zesilovači v pásmu 20 Hz až 50 kHz.
- 6) Přístroj uživateli sdělí, že měření bylo dokončeno.

3.5.2 Funkce „Freqchar“

Automatický test „Freqchar“ umožňuje po zadání testovací amplitudy generátoru automaticky změřit frekvenční amplitudovou charakteristiku v rozsahu 22 Hz až 100 kHz s 10 logaritmickými kroky na dekádu. Výsledná tabulka má 3 sloupce, v prvním je frekvence v kHz, druhém je absolutní přenos a v třetím je zisk v dB.

Test probíhá následovně:

- 1) Uživatel zadá testovací amplitudu v rozsahu 10 mV až 10 V.
- 2) Nyní je již měření plně automatické a přístroj měří frekvenční amplitudovou charakteristiku. Začíná na frekvenci 22 Hz a logaritmicky krokuje 10 kroky na dekádu (1 1,3 1,7 2,2 2,8 3,6 4,6 6 7,7 10) až do frekvence 100 kHz.
- 3) Přístroj uživateli sdělí, že měření bylo dokončeno.

3.6 Schopnost sebe kalibrace

Funkce sebe kalibrace umožňuje přístroji během provozu zkalibrovat citlivost napěťového vstupu. Byla implementována za účelem zvýšení celkové přesnosti přístroje a jako řešení výrazné závislosti přenosu obvodu úpravy vstupního napětí na teplotě.

Spočívá ve využití modulu generátoru jako kalibrátoru ke generaci harmonického průběhu o kmitočtu 1 kHz, jehož amplituda je minimálně závislá na teplotě a je kalibrovaná na hodnotu 10 V či 7,071 Vrms. Je tedy možné po jejím změření upravit kalibrační konstantu tak, aby bylo dosaženo přesného měření a tím přístroj prakticky zkalibrovat.

Tato funkce se automaticky spouští při zapnutí přístroje. Je možné ji volat kdykoliv za provozu přístroje ze stránky nastavení „NAST.“.

4 Návod k použití automatického měření

Přístroj je určený k přímému testování lineární zesilovačů topologie A a AB, kde je signál vstupu i výstupu symetrický vůči zemi. Pro testování zesilovačů s plovoucí zátěží je nutno použít signálového izolačního transformátoru. Pro testování zesilovačů v topologii D je možné výkon pouze odvozovat dle zadané impedance zátěže a je nutno výstup zesilovače na přístroj připojit přes dolní propust ideálně vyšších řádů s mezní frekvencí maximálně 50 kHz.

Postup správného použití funkce „Ampalyza“:

- 1) Uživatel si ověří topologii měřeného zesilovače a zda splňuje podmínky pro úspěšné měření.
- 2) Uživatel prvně zapne testovací přístroj, vstup zesilovače napojí na výstup generátoru „GEN OUT“ a výstup zesilovače na napěťový vstup přístroje. Pokud uživatel nezná impedanci zátěže, nebo má jiný důvod, připojí zátěž na svorky přístroje označené „EXT LOAD“. Pokud uživatel zná velikost zátěže, nebo má jiný důvod, připojí zátěž standartně na zesilovač.
- 3) Uživatel do přístroje zasune externí paměťové médium ve formě karty SD a na stránce „NAST.“ ji zavede.
- 4) Po úspěšném zavedení karty SD se vrátí do hlavní nabídky přejde na stránku „AUTO“ kde vybere nabídku „Ampalyza“.
- 5) Uživatel spustí test a pokud neměří výkon do zátěže přímo, do přístroje zadá hodnotu impedance příslušné zátěže.
- 6) Uživatel se ujistí, že na zesilovači je nastaveno minimální zesílení (hlasitost) a zesilovač zapne.
- 7) Uživatel se řídí pokyny, které se zobrazují na obrazovce přístroje. Po jejich splnění mačká tlačítko „OK“.
- 8) Po dokončení měření se uživatel vrátí do hlavní nabídky a externí paměťové médium vyjme.

5 Program mikrokontroleru

Program viz souborová příloha SOC_Slehofer_Program_Ampalyzer.ino

Program pro mikrokontroler STM32F103C8 je psán v programovací prostředí Arduino IDE 1.8.12 v jazyku Wiring (odvozen z C++). Je využíván částečně asynchronní běh programu, kdy jsou v hlavním cyklu programu volány asynchronně funkce průběžně obnovovaných prvků. Jedná se o 3 prvky. První je funkce vykreslování aktuální stránky na TFT display, dále následuje funkce pro čtení dotykového vstupu obsahující kód, který dle příslušné stránky reaguje na dotyk na určitém místě tím, že buď zavolá nějakou funkci, či změní hodnotu některé z globálních proměnných. Poslední je funkce ovládání funkčního generátoru, která zajišťuje, že generátor běží dle aktuálně žádaných parametrů.

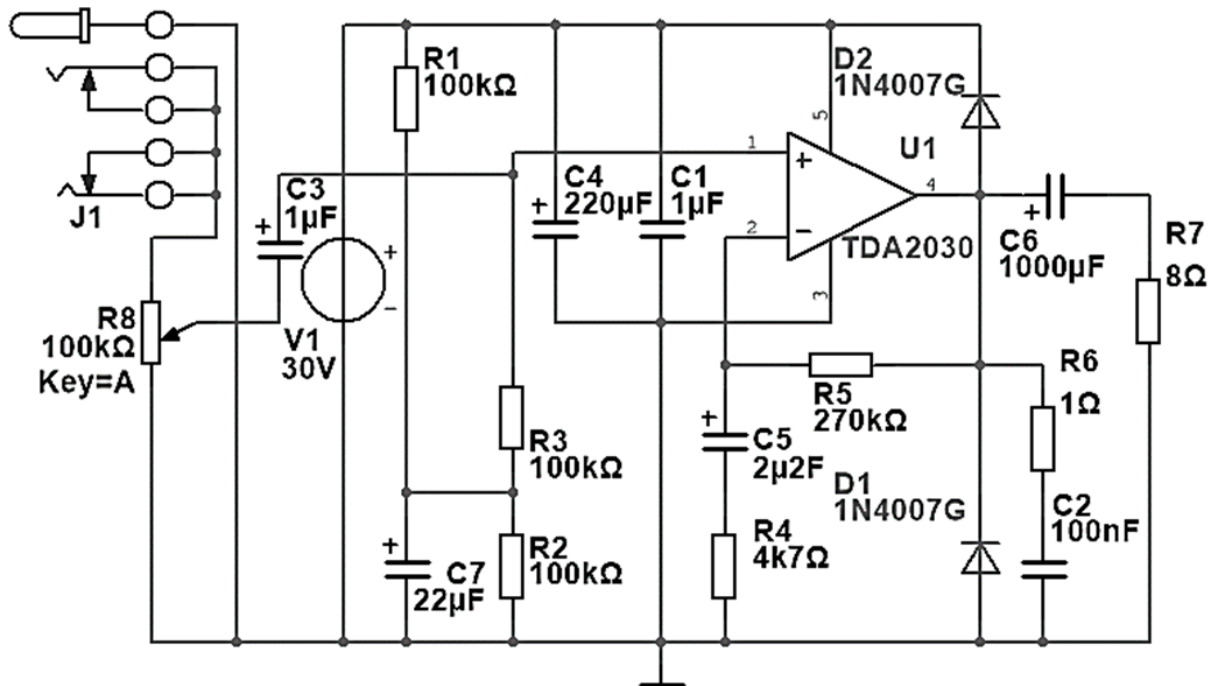
Kód obsahuje komentáře popisující význam jednotlivých částí programu. Je možno jej otevřít v běžném poznámkovém bloku.

6 Ověřující měření

Fotodokumentace viz příloha 6A.

Jako ověřující měření jsem se rozhodl použít měření na lineárním zesilovači, který jsem konstruoval v rámci klasifikace ve školním předmětu Praktická Cvičení ve 3. školním ročníku.

6.1 Popis měřeného předmětu



Obr. 14 – Schéma zapojení měřeného předmětu

Jedná se o zapojení operačního zesilovače U1 TDA2030 jako neinvertujícího zesilovače. Napájecí napětí bylo zvoleno 30V a je vyhlazeno kondenzátory C4 220uF 35V a C1 1uF 60V. Zesílení je nastaveno na hodnotu přibližně 58,45 pomocí napěťového děliče ve zpětné vazbě

tvořeného rezistory R5 270k, R4 4k7 a elektrolytickým kondenzátorem C5 2u2 50V, výstup děliče je zapojen do invertujícího vstupu U1. Vstup je přiveden na logaritmický potenciometr R8 100k, napětí z jezdce potenciometru je vázáno přes kondenzátor C3 1uF na neinvertující vstup U1. Pracovní bod je nastaven pomocí odporu R3 100k zapojený na neinvertující vstup a vedoucí na děliče tvořeného rezistory R1 100k a R2 100k a nastavený na polovinu napájecího napětí a blokován kondenzátorem C7 22uF 35V. Výstup je vázán na zátěž (reproduktor) 8 Ω pomocí kondenzátoru C6 1000uF 35V a je zároveň doplněn o ochranu proti kmitání pomocí sériového zapojení rezistoru R6 1ohm a kondenzátoru C2 100nF 100V a o ochranu proti špičkám na výstupu tvořenou diodou D1 1N4007 zapojenou v závěrném směru ze země a diodou D2 1N4007 zapojenou v propustném směru na napájecí větev 30 V.

Signál je přiveden pomocí 3,5mm stereo audio jacku na logaritmický potenciometr a je dle aktuálně nastavené hlasitosti dělen. Podělený signál je navázán na neinvertující vstup TDA2030. TDA2030 dle nastavené zpětné vazby adekvátně zesílí signál. Zesílený signál na výstupu je vázán na zátěž (reproduktor).

6.2 Původní naměřené hodnoty:

Frekvenční charakteristika zesilovače:

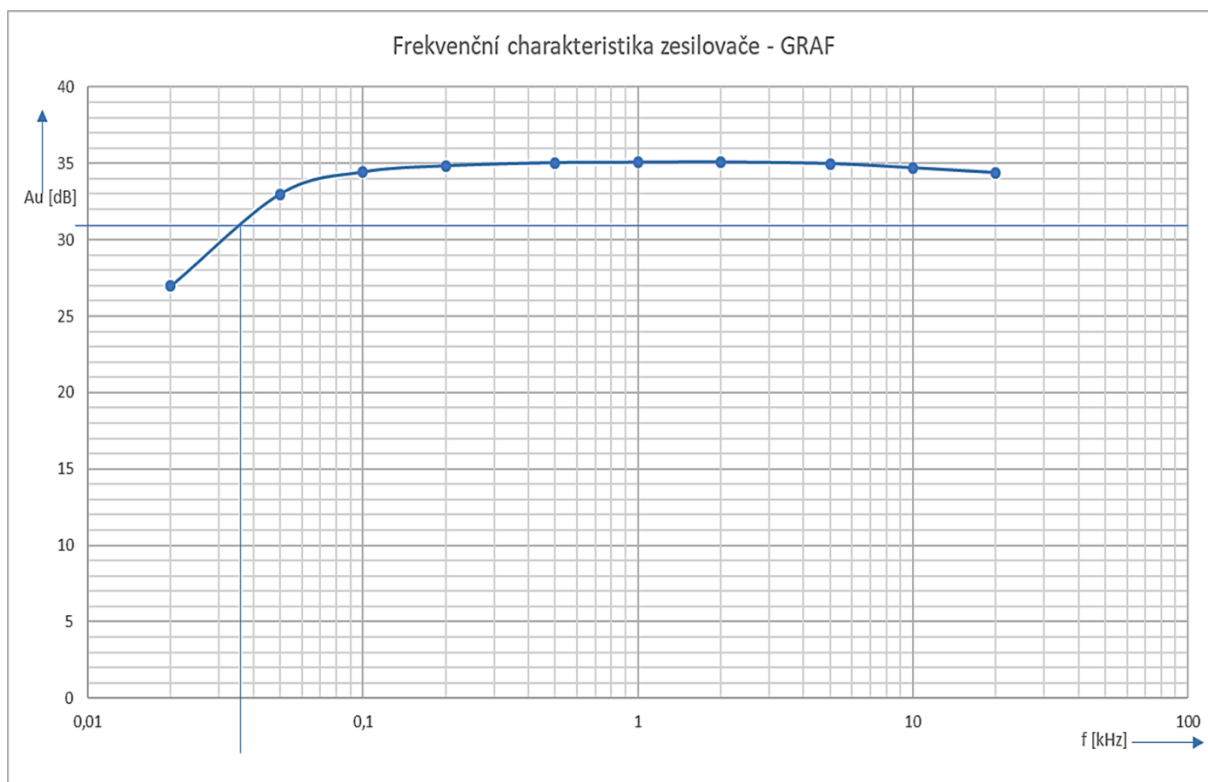
$$U_1 = 0.15V$$

Č.m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f [kHz]	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
U ₂ [V]	3,35	6,690	7,890	8,260	8,458	8,484	8,500	8,400	8,140	7,853
Au	22,33	44,60	52,60	55,06	56,38	56,56	56,66	56,00	54,26	52,35
Au [dB]	26,97	32,98	34,42	34,81	35,02	35,05	35,06	34,96	34,69	34,37

Max. výkon zesilovače:

$$R_z = 8 \Omega$$

f [kHz]	1
U _{výst}	8,357
P _{max} [W]	8,73



Obr. 15 – Původní naměřená frekvenční charakteristika zesilovače

6.3 Hodnoty naměřené pomocí přístroje

Frekvenční charakteristika zesilovače:

Č.m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f / kHz	0,022	0,028	0,036	0,046	0,06	0,077	0,1	0,13	0,17
Au / -	31,82	35,35	39,73	44,3	50,11	53,05	55,89	56,57	56,77
au / dB	30,1	31	32	32,9	34	34,5	34,9	35,1	35,1
Č.m.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
f / kHz	0,22	0,28	0,36	0,46	0,6	0,77	1	1,3	1,7
Au / -	57,17	57,39	57,41	57,55	57,6	57,63	57,46	57,43	56,29
au / dB	35,1	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35
Č.m.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
f / kHz	2,2	2,8	3,6	4,6	6	7,7	10	13	17
Au / -	55,94	56,49	55,68	54,32	52,14	49,84	46,34	43,39	39,55
au / dB	35	35	34,9	34,7	34,3	34	33,3	32,7	31,9
Č.m.	28	29	30	31	32	33	34		
f / kHz	22	28	36	46	60	77	100		
Au / -	36,01	33,46	31,33	29,94	28,43	27,11	25,38		
au / dB	31,1	30,5	29,9	29,5	29,1	28,7	28,1		

Max. výkon zesilovače:

f / kHz	1
U _{vst} / mV	160,4
U _{výst} / V	9,14
P _{max} / W	10,14
U _{šum} / mV	6,1 mV

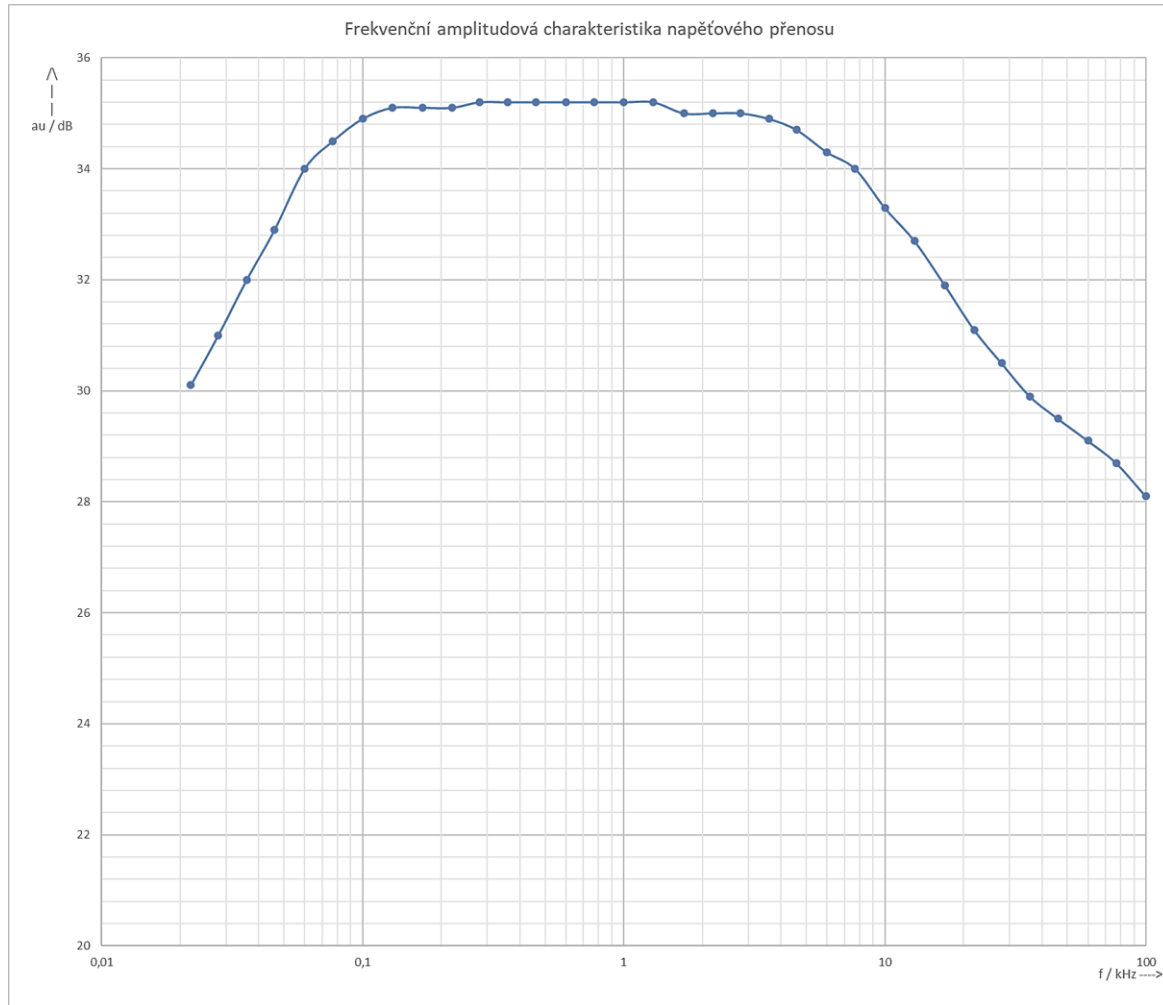
Zkreslení:

f / kHz	1
THD / %	0,21
THD / dB	-53,5

Zkreslení a šum:

f / kHz	1
THD / %	0,21
THD / dB	-53,5

Šumové napětí:



Obr. 16 – Frekvenční charakteristika naměřená přístrojem

Při porovnání hodnot původně naměřených a hodnot naměřených přístrojem lze pozorovat, že přístroj vykazuje uspokojivou přesnost měření. Vezme-li člověk v potaz, že přístroj provedl měření o více než 40 krocích za dobu přibližně 1 minuty a změřil i parametry, které původně nebyly vůbec měřeny a s uspokojivou přesností, lze použití přístroje považovat za jednoznačně lepší způsob měření než provádět měření ručně, kdy člověk takové množství měření provede za výrazně delší čas a takové měření vyžaduje mnohem více rozmanitých přístrojů a celkově větší prostor k provedení.

7 Disciplíny vývoje

Vývoj práce naplňovala řada disciplín. První a hlavní disciplínou byl návrh a realizace elektroniky přístroje. Druhou disciplínou byla vhodná fyzická úprava a posledně bych zmínil vyladění obvodů a doplnění korekčních funkcí. Veškeré z těchto disciplín popíši v dále uvedených kapitolách.

7.1 Návrh obvodů

Problematika návrhu samotných obvodů přístroje je velmi pestrá. Obvodová realizace zdroje potřebných napětí a digitální části byla velmi snadná. Jako složitější bych označil návrh modulu funkčního generátoru, od kterého jsem vyžadoval stejnosměrné vázání, které by umožnilo generovat i velmi pomalé průběhy. Jako poslední a nejsložitější označuji jednoznačně realizaci vstupního modulu. Jelikož jsem od přístroje vyžadoval široký rozsah vstupních napětí, bylo nutno implementovat takový způsob řízení, který umožňuje dynamicky a předvídatelně měnit přenos vstupní měřené veličiny tak, aby její rozkmit vždy pokryl co možná nejvíce rozsah vstupního převodníku analog-digitál a tím maximalizoval rozlišení časově proměnných průběhů veličiny. Pro tento účel se ukázal být ideální zesilovač s exponenciálně řízeným zesílením, u kterého lze vysoké zesílení ladit velmi citlivě zatímco malé zesílení či přímo tlumení je laditelné hrubě. Touto problematikou se zabývám do hloubky v kapitole 2.4.1.2 Napěťový zesilovač s digitálním exponenciálně řízeným zesílením.

7.2 Návrh plošných spojů

Fotodokumentace viz příloha 7.2A, 7.2B a 7.2C.

Návrh plošných spojů bych také zařadil mezi složitější disciplíny. Rozhodl jsem se je totiž realizovat tak, aby se minimalizovaly náklady na výrobu. Bylo tedy nutné veškerou elektroniku umístit na plošných spojích o celkové ploše nepřesahující 100 cm². Pro splnění toho úkolu jsem zvolil převážně povrchovou montáž součástek, jelikož součástky v pouzdrech určených pro povrchovou montáž nabízejí výrazně lepší úsporu místa při zachování či případně i zlepšení některých obvodových vlastností. Plošné spoje jsem navrhoval v programu Sprint Layout 6.0 od společnosti ABACOM. Plošné spoje jsem si nechal vyrobít od Čínskému výrobce plošných spojů JLCPCB.

7.3 Fyzická úprava

Fotodokumentace viz příloha 7.3A, 7.3B a 7.3C.

Fyzická úprava spočívala ve vhodném umístění elektroniky do vhodné krabičky, v následném rozmístění propojovacích elementů a posledně v kosmetické úpravě spočívající v tvorbě grafického potisku, jehož účelem je uživateli usnadnit ovládání přístroje a graficky nezaměnitelně odlišit jednotlivé části přístroje.

7.4 Vyladění obvodů a korekční funkce

Poslední problematikou, kterou jsem se v rámci vývoje zabýval bylo řešení nežádoucího jevu závislosti vlastností přístroje na teplotě. Tento problém se nejvíce projevoval u obvodu vzorkování vstupního napětí, kde změna teploty okolí o velikosti 5 °C byla schopna vyvolat chybu měření až 12 % a přístroj svým samovolným ohřevem způsoboval odchylky podobných rozsahů. Problém odchylky způsobené samovolným ohřevem obvodů přístroje jsem vyřešil pomocí spojitě regulovaného systému chlazení, který obvody přístroje udržuje na teplotě 36 °C s maximální odchylkou přibližně 2 °C. Toto má za následek podstatné snížení závislosti odchylky měření na době uplynulé od zapnutí přístroje. Pro zajištění ještě vyšší míry přesnosti jsem implementoval schopnost přístroje se sám při spuštění a za chodu kalibrovat čímž jsem eliminoval odchylky způsobené teplotou okolí. Schopnost sebe kalibrace jsem popsal v kapitole 3.6 Schopnost sebe kalibrace.

8 Potenciální výrobní cena (odhad bez zahrnutí práce)

*Cena je pouze orientační a platí jen při koupi jednotlivých součástek, při sériové výrobě dojde k velmi výraznému snížení nákladů.

Komponent	Cena v CZK
Mikrokontroler	30
Rezistory, trimery, potenciometry	60
Kondenzátory	80
Ostatní integrované obvody	50
Plošné spoje	20
Krabička	65
Konektory a jisticí prvky	100
Modul TFT Displeje	100
Ventilátor	20
Volné vodiče	30
Spojovací materiál	20
Potisk	20
CELKEM	595

9 Uplatnění na trhu

Očekávám, že přístroj najde široké uplatnění nejen čistě pro účel testování vlastností zvukových zesilovačů výkonu.

Přístroj není na trhu výjimkou, avšak věřím, že při vhodné implementaci sériové výroby, nebo licencované výroby by mohl být velmi soutěživý co se týče poměru cena výkon.

Přístroj nabízí prakticky 6 přístrojů v jednom, signální generátor, multimetr, osciloskop, analyzátor harmonického zkreslení, automatický měřicí systém a zdroj symetrického napájení. Každý z nich lze nezávisle kombinovat a do jisté míry i automatizovat.

Může tedy sloužit pro vývoj, výrobu a ověřování jak amatérské elektroniky, tak i profesionální a lze jej využít i jako učební pomůcku či praktický přístroj při provádění různých oprav a montáží.

Přístroj lze spolehlivě provozovat z napětí 9 V až 15 V a je tedy možné jej provozovat z baterie například v odlehlých oblastech nebo jej používat jako polní opravářskou pomůcku napájenou z baterie automobilu.

10 Souhrn základních parametrů přístroje

Dále uvedené elektrické parametry jsou platné pouze pro teplotní rozsah 20 °C až 30 °C. Přístroj vyžaduje po zapnutí dobu alespoň 5 minut pro zahřátí na pracovní teplotu a pro dobůh nežádoucích přechodných jevů.

Parametr	Hodnota
Funkční generátor	
Funkce napěťových průběhů	SINUS, TROJU, REF 1k
Rozsah nastavení frekvence	0,1 Hz až 99,9999 kHz
Rozsah nastavení amplitudy	10 mV až 10 V
Odchylka amplitudy 10 V	Maximálně +/- 1 %
Odchylka amplitudy vyššího rozsahu	Maximálně +/- 5 %
Odchylka amplitudy nižšího rozsahu	Maximálně +/- 10 %
Odchylka frekvence referenčního kmitočtu	Maximálně +/- 0,1 %
Odchylka nastavené frekvence	Maximálně +/- 0,5 %
Harmonické zkreslení funkce SINUS	Maximálně 0,2 % či -54 dB
Harmonické zkreslení referenčního kmitočtu	Maximálně 0,06 % či -65 dB
Parametr	
Hodnota	
Stejnoseměrná složka generovaného průběhu	Maximálně 30 mV
Nelinearita funkce TROJU pro frekvenci 0–10 kHz	Maximálně 0,5 %
Nelinearita funkce TROJU pro frekvenci 10–100 kHz	Maximálně 5 %
Výstupní odpor	50 Ω +/- 1 %
Multimetr	
Rozsah měření stejnosměrného napětí	-30 V až 30 V
Rozsah měření střídavého napětí	0–21 Vrms
Rozsah měření stejnosměrného proudu	-5 A až 5 A
Rozsah měření střídavého proudu	0–3,5 Arms
Odchylka měření napětí (střední i efektivní hodnoty)	Maximálně 3 %
Odchylka měření proudu (střední i efektivní hodnoty)	Maximálně 2 %
Rozsah měření stejnosměrného výkonu	0 až 150 W
Rozsah měření střídavého výkonu	0 až 75 W
Odchylka měření výkonu	Maximálně 5 %
Vstupní odpor nižších rozsahů (0 až 14)	100 kΩ 150 pF +/- 10 pF
Vstupní odpor vyšších rozsahů (15 až 29)	1 MΩ 15 pF +/- 3 pF
Osciloskop	
Rozsah časové základny	10 μs/dílek až 5 ms/dílek
Rozsah citlivosti vertikálního kanálu	50 mV/dílek až 5V/dílek
Odchylka časové základny	Maximálně 3 %
Odchylka vertikálního kanálu	Maximálně 10 %

Vstupní odpor nižšího rozsahu (50 mV až 200 mV)	100 k Ω 150 pF +/- 10 pF
Vstupní odpor vyššího rozsahu (500 mV až 5 V)	1 M Ω 15 pF +/- 3 pF
Parametr	Hodnota
Analyzátor harmonického zkreslení a frekvenční čítač	
Rozsah měření harmonického zkreslení	0,03 – 100 %
Rozsah měření harmonického zkreslení se šumem	0,06 – 100 %
Odchylka měření harmonického zkreslení	Maximálně +/- 0,05 %
Odchylka měření harmonického zkreslení se šumem	Maximálně +/- 0,1 %
Rozsah měření frekvence	20 Hz až 100 kHz
Rozlišení měření periody	1 μ s
Odchylka měření periody	Maximálně 5 %
Automatické měření	
Měřicí rozsahy	viz multimetr.
Odchylka měření zesílení	Maximálně 5 %
Odchylka měření výkonu	Maximálně 5 %
Odchylka měření amplitudy	Maximálně 3 %
Odchylka měření harmonického zkreslení	Maximálně +/- 0,05 %
Odchylka měření harmonického zkreslení se šumem	Maximálně +/- 0,1 %
Odchylka měření frekvenční amplitudové charakteristiky	Maximálně 5 %
Odchylka měření šumového napětí	Maximálně 10 %

Závěr

V rámci práce SOČ vznikl přístroj kombinující funkční generátor, multimetr, osciloskop, analyzátor harmonického zkreslení a frekvenční čítač. Přístroj je schopný jednotlivé funkce kombinovat a automatizovat a tím výrazně zrychlit a zefektivnit jinak zdlouhavé a uživatelský náročné úkony.

Osobně mne nejvíce vytížilo řešení výrazných teplotních závislostí přístroje a minimalizace spojitých jevů po spuštění.

Přístroj osobně velmi rád používám, jelikož nabízí rychlé a snadné možnosti připojení a zabírá velmi málo místa. Tento fakt byl i hlavním účelem celé práce, vytvořit přístroj, který usnadní život jak amatérským, tak i profesionálním elektronikům a celkově urychlí některé z jinak časově náročných operací mezi něž patří např. měření frekvenčních charakteristik.

Myslím, že práce je sama o sobě úspěchem a po dokončení studia na střední škole bych rád pokračoval ve vývoji za cílem implementace dalších funkcí a samotné sériové výroby s dodáním na trh nejen pro lidi jako jsem já sám.

Seznam literatury a jiných zdrojů

Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage [online]. 2009 [cit. 2020-03-14].

Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf>

Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage [online]. 2011 [cit. 2020-03-14].

Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>

DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. Druhé vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 8073000490.

GRAEME, Jerald G. *Applications of operational amplifiers: third-generation techniques*. New York: McGraw-Hill, [1973]. ISBN 00-702-3890-1.

GRAY, Paul R. *Analysis and design of analog integrated circuits*. 5th ed. New York: Wiley, [2009]. ISBN 978-047-0245-996.

HOROWITZ, Paul. *The art of electronics*. Third edition. New York: Cambridge University Press, [2015]. ISBN 978-052-1809-269.

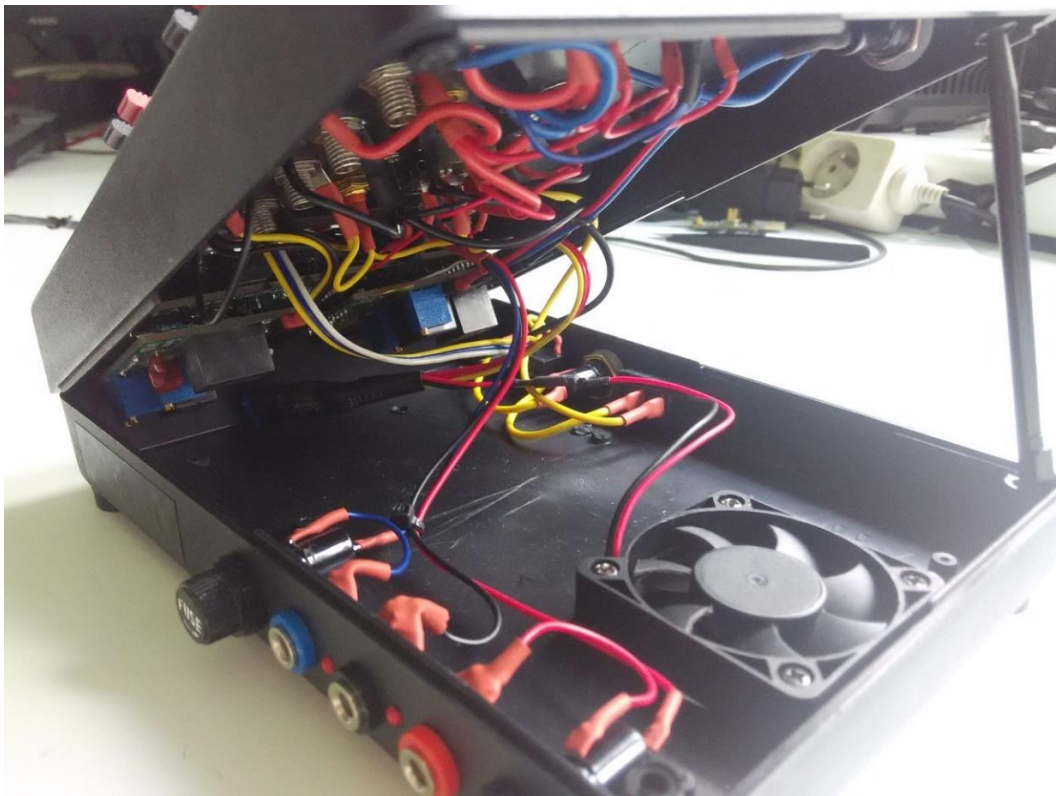
OKAWA Electric Design, 3rd order Multiple feedback Low-pass Filter Design Tool [online]. 2020 [cit. 2020-03-14].

Dostupné z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/MultipleFB3Lowkeisan.htm>

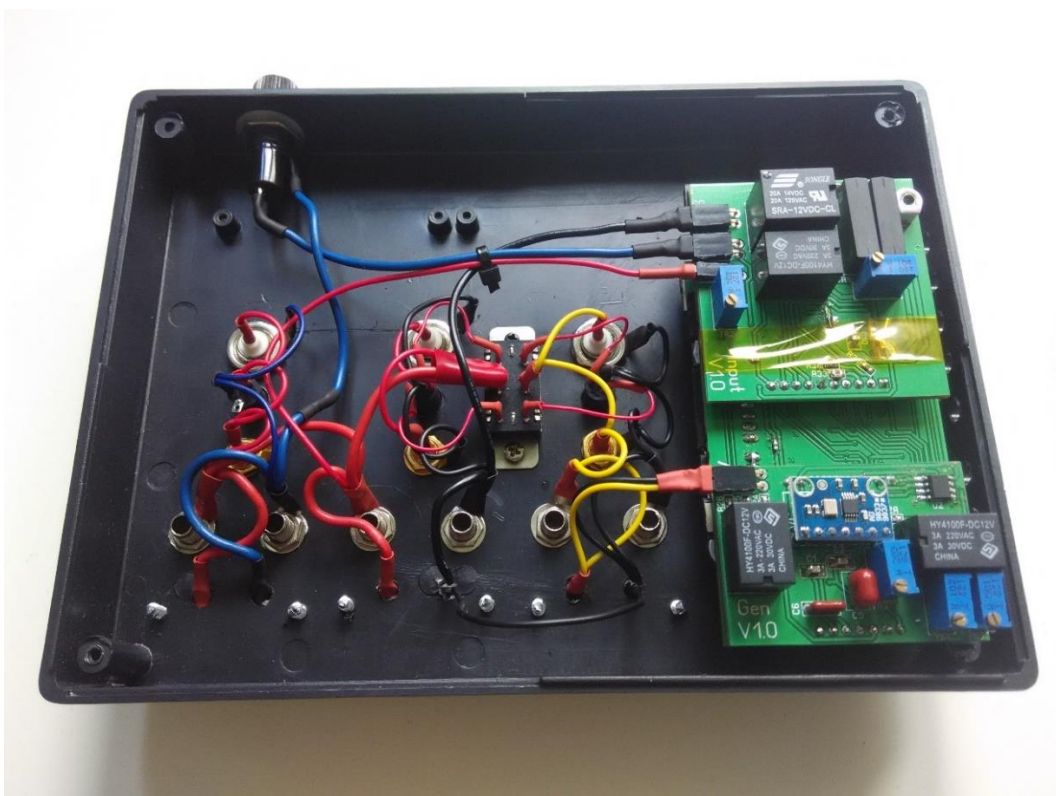
WILLIAMS, Jim. *A designer's guide to Innovative Linear Circuits: third-generation techniques*. Third edition. Newton, Massachusetts: Cahners Publishing Company, [1985].

WILLIAMS, Jim. *The art and science of analog circuit design*. Boston: Butterworth-Heinemann, [1995]. ISBN 07-506-9505-6.

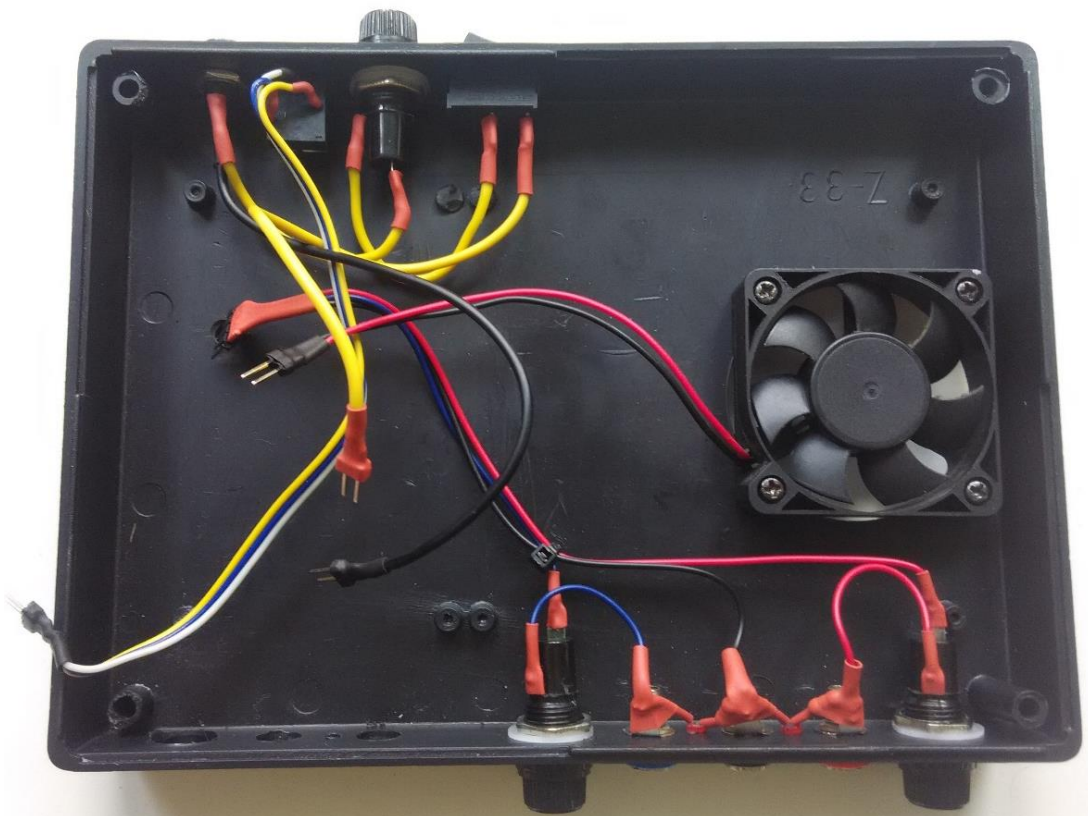
Přílohy – Fotodokumentace



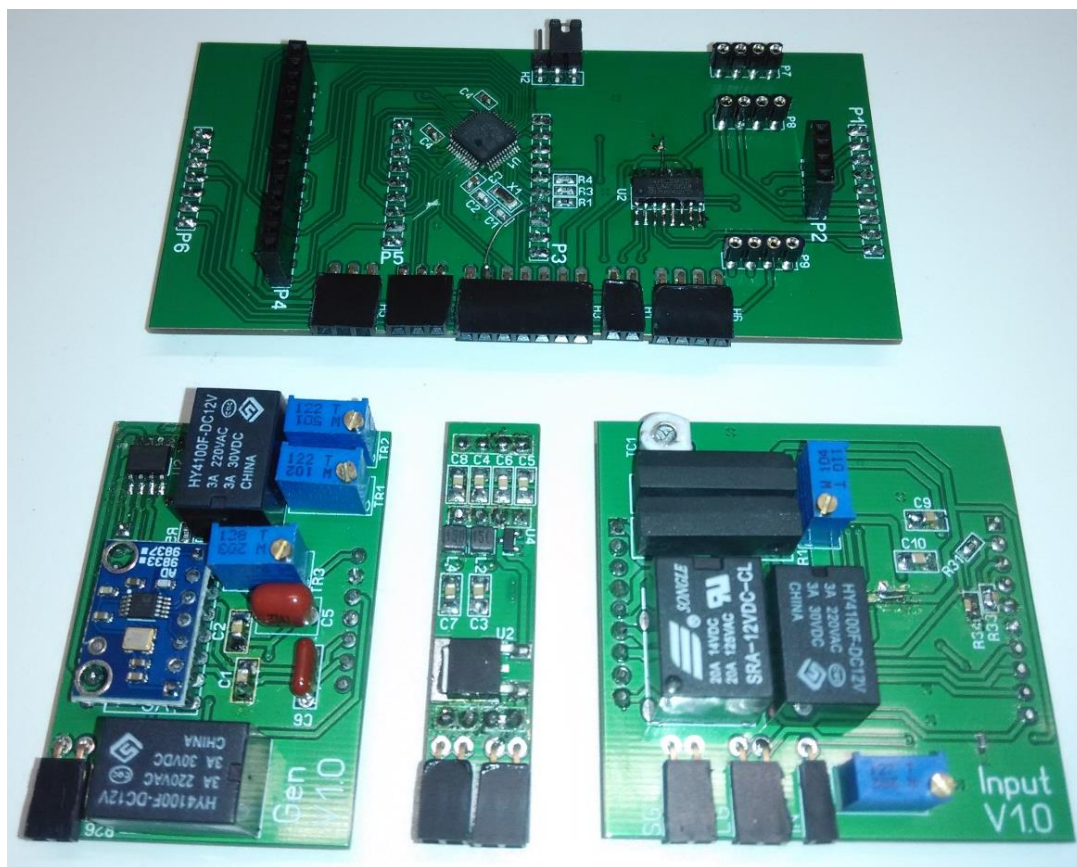
Příloha 1A – Vnitřní uspořádání přístroje



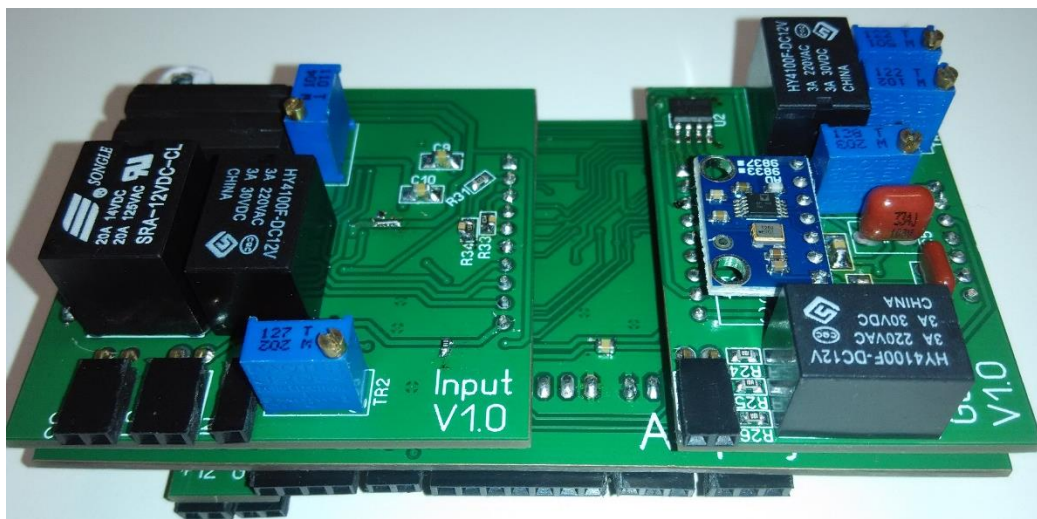
Příloha 1B – Vnitřní uspořádání přístroje – elektronika panelu



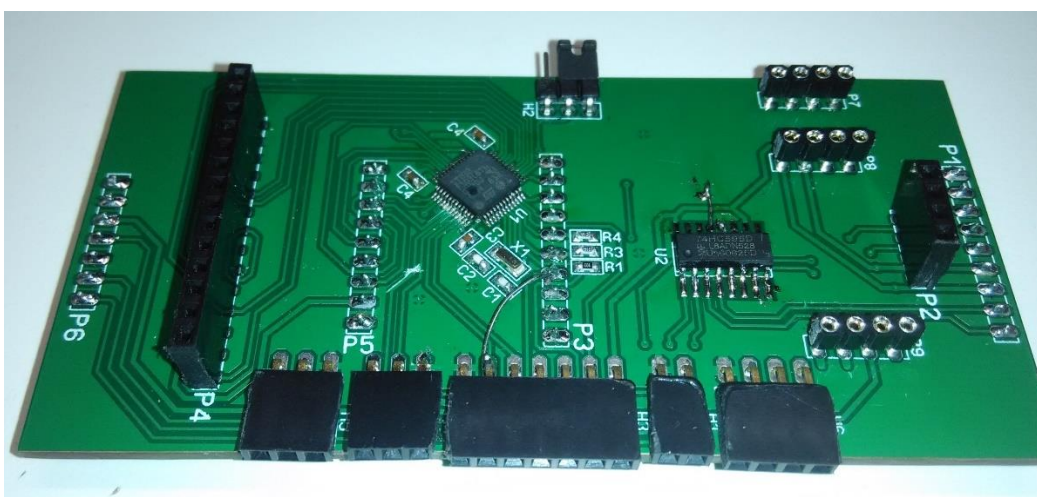
Příloha 1C – Vnitřní uspořádání přístroje - Podstava



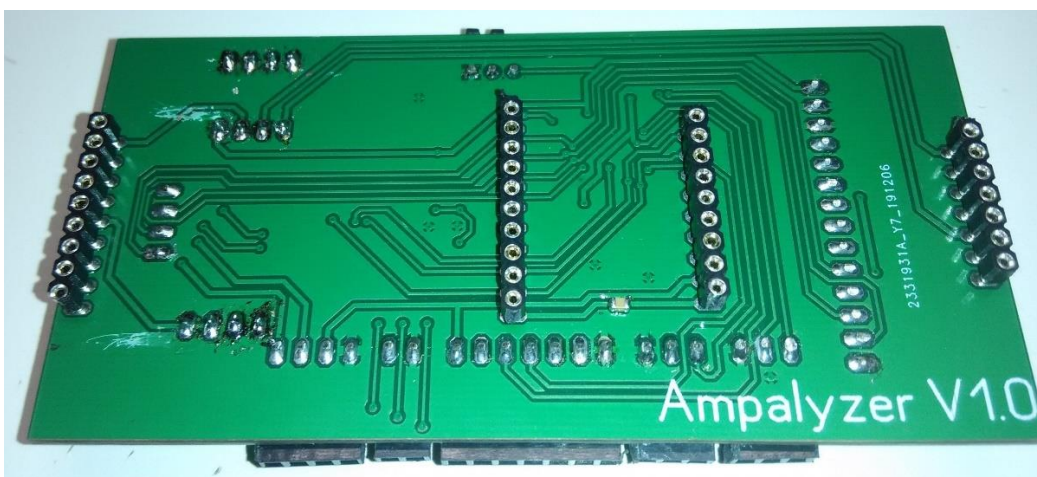
Příloha 2B – Jednotlivé moduly odděleně



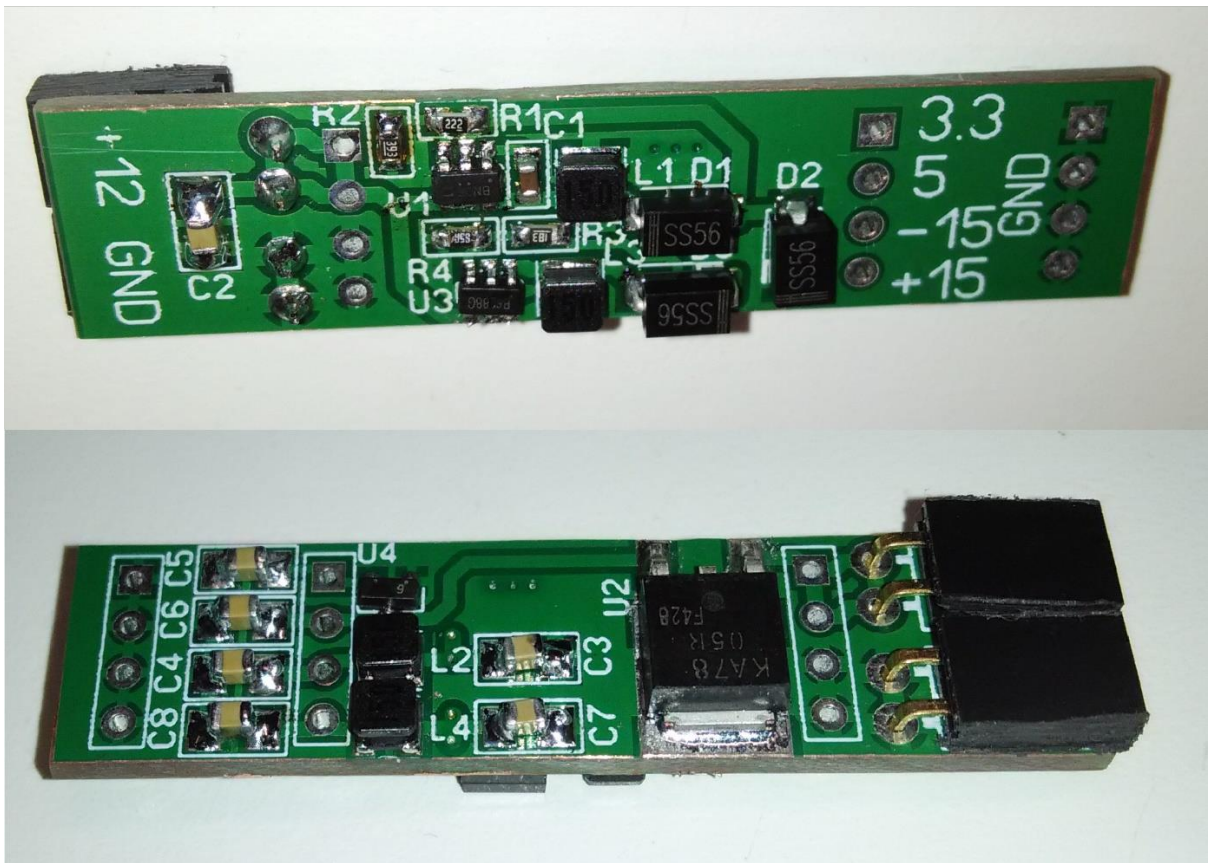
Příloha 2C – Moduly sestaveny do věže



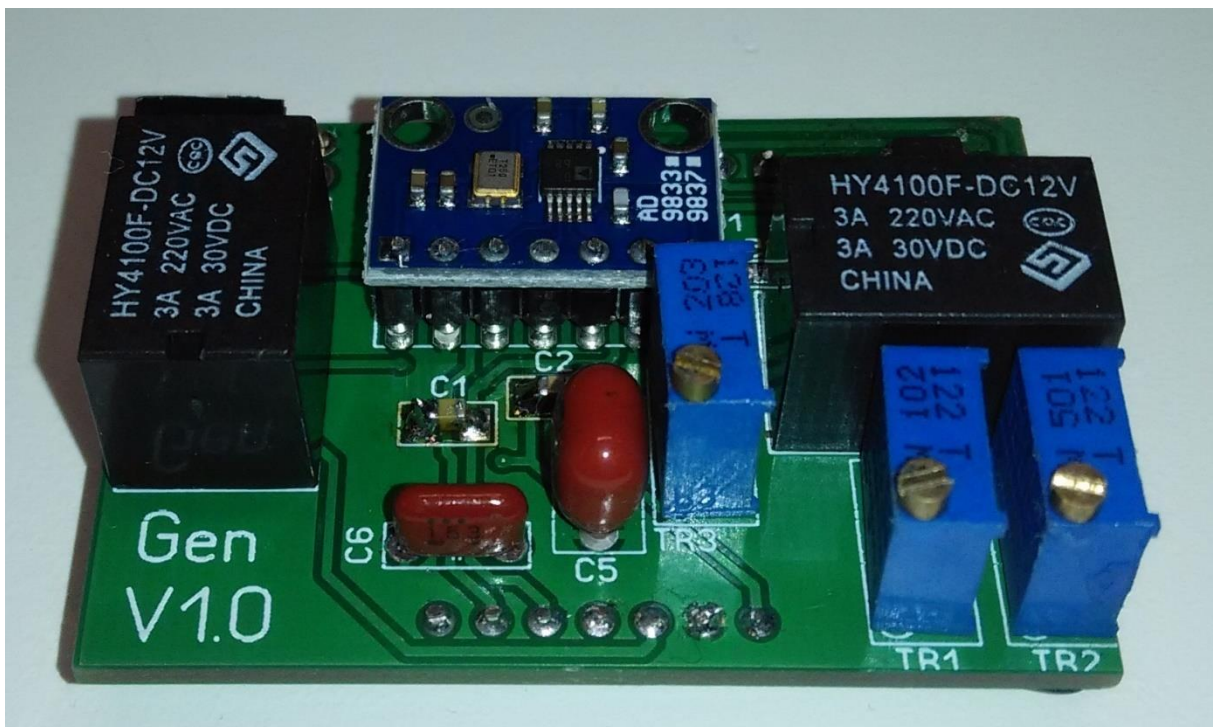
Příloha 2.1B – Pohled na hlavní desku shora



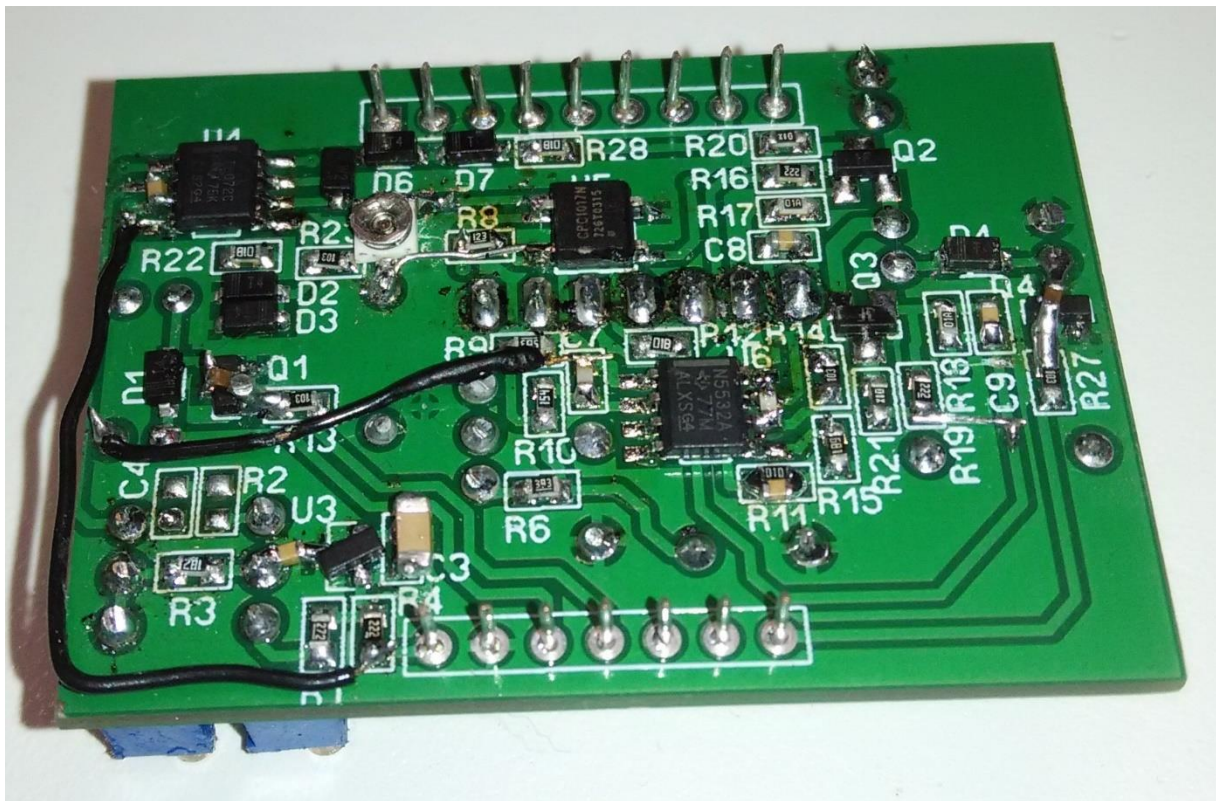
Příloha 2.1C – Pohled na hlavní desku zdola



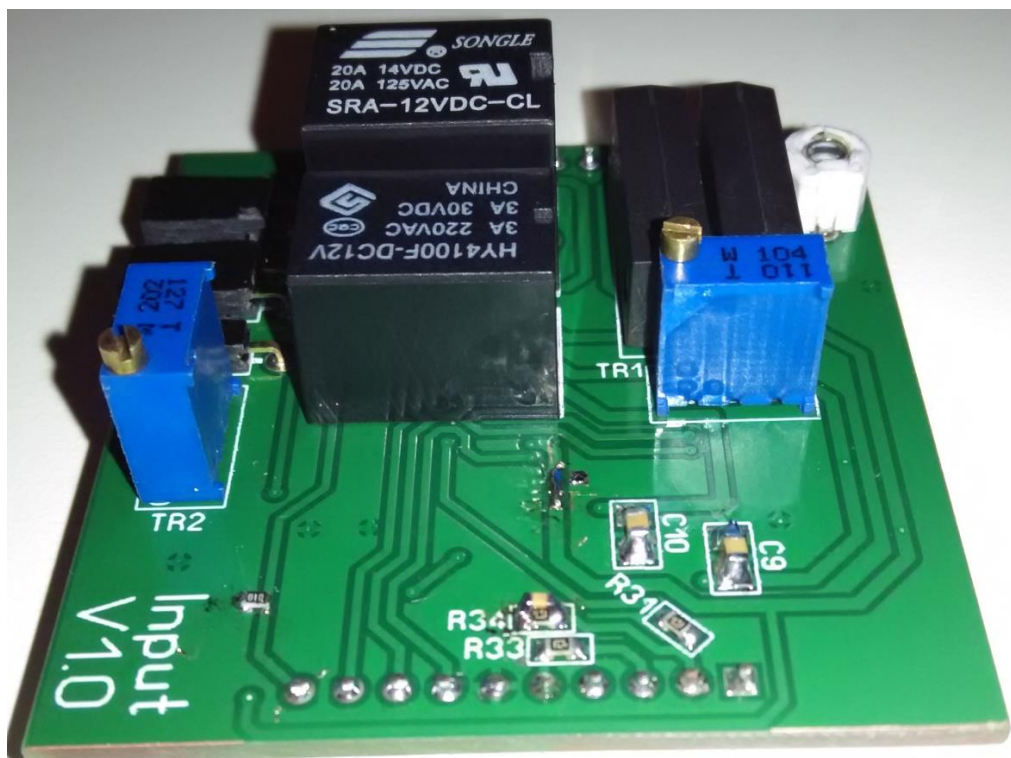
Příloha 2.2B – Pohled na modul zdroje z obou stran



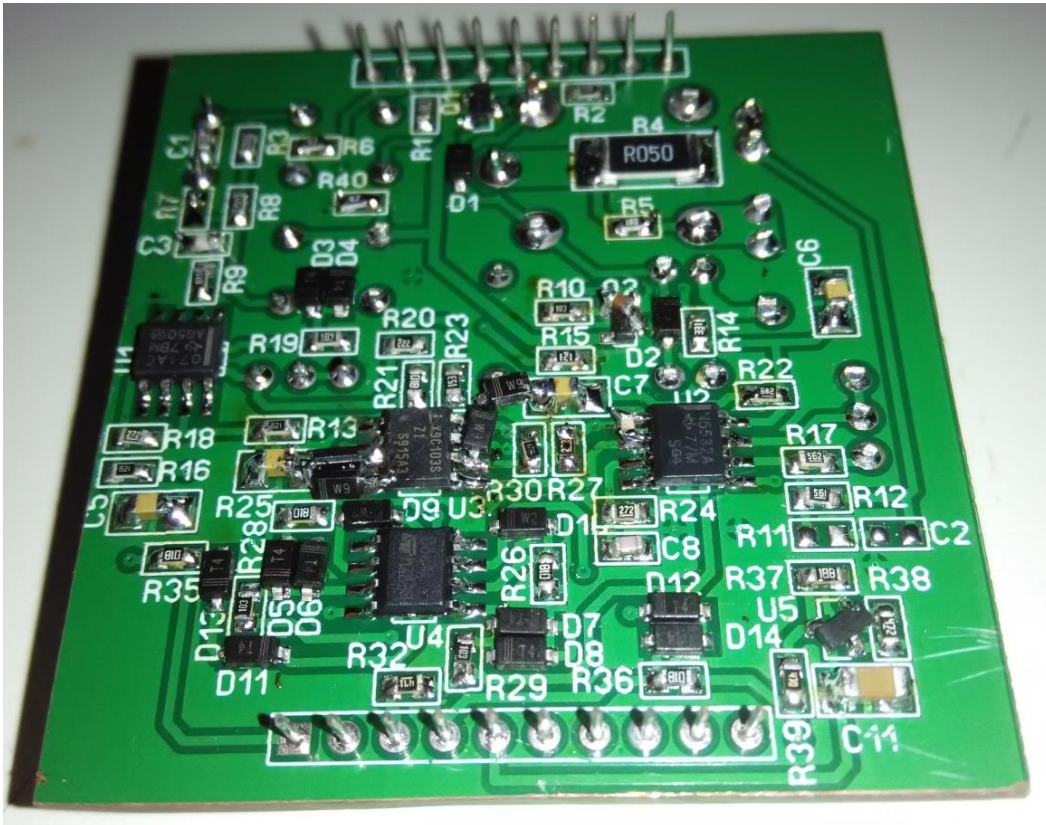
Příloha 2.3B – Pohled na desku modulu generátoru shora



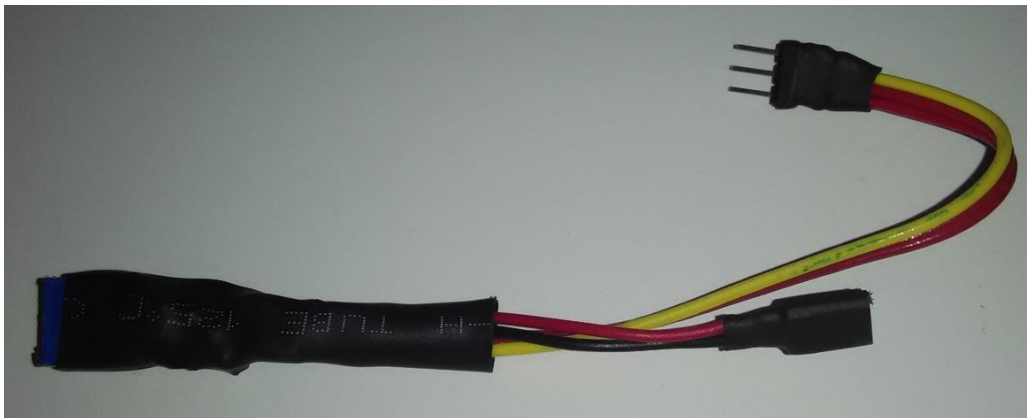
Příloha 2.3C – Pohled na desku modulu generátoru zdola



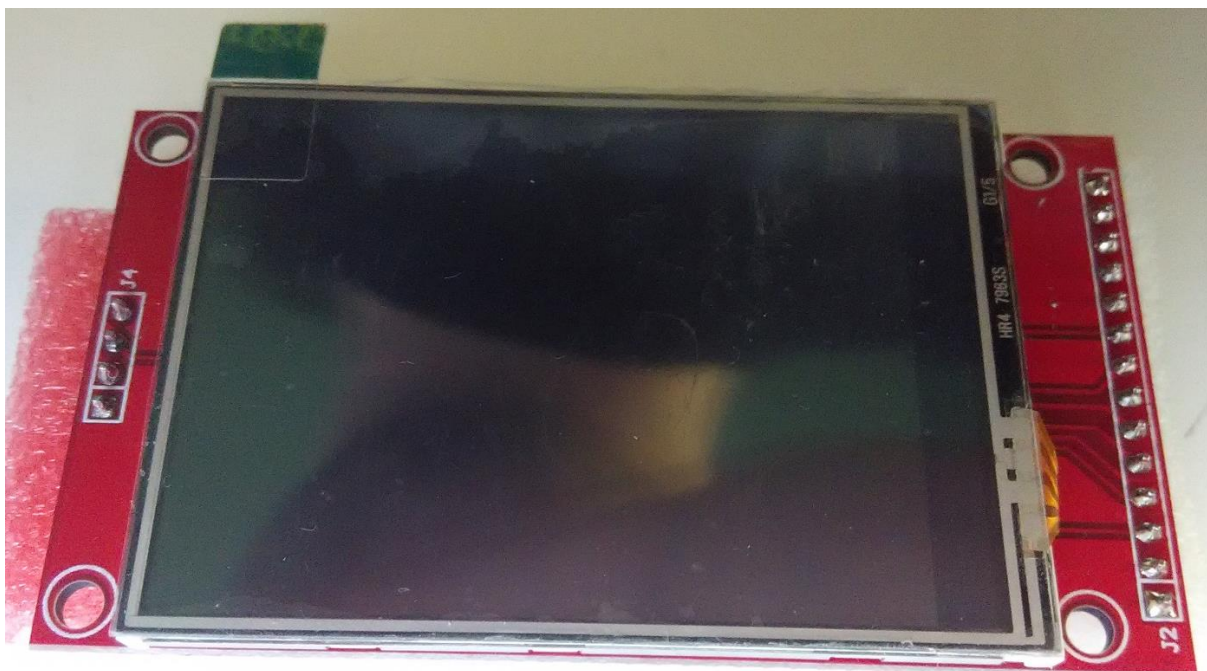
Příloha 2.4B – Pohled na desku vstupního modulu shora



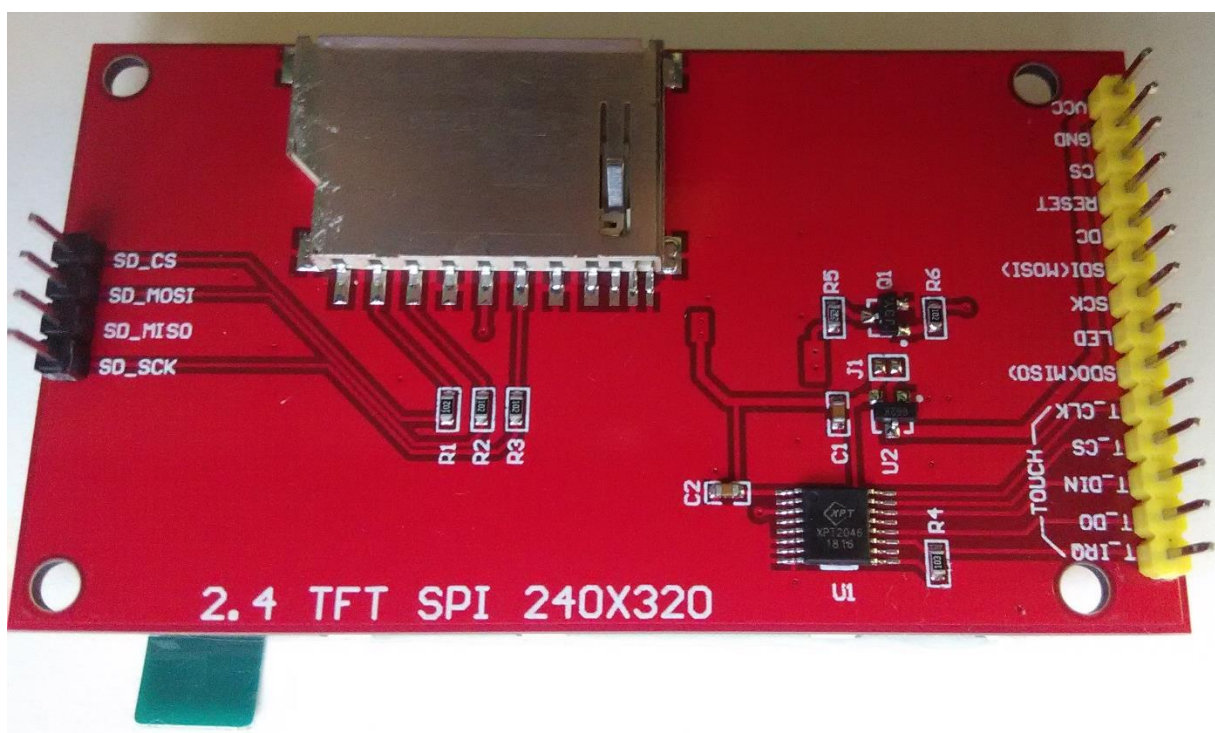
Příloha 2.4C – Pohled na desku vstupního modulu zdola



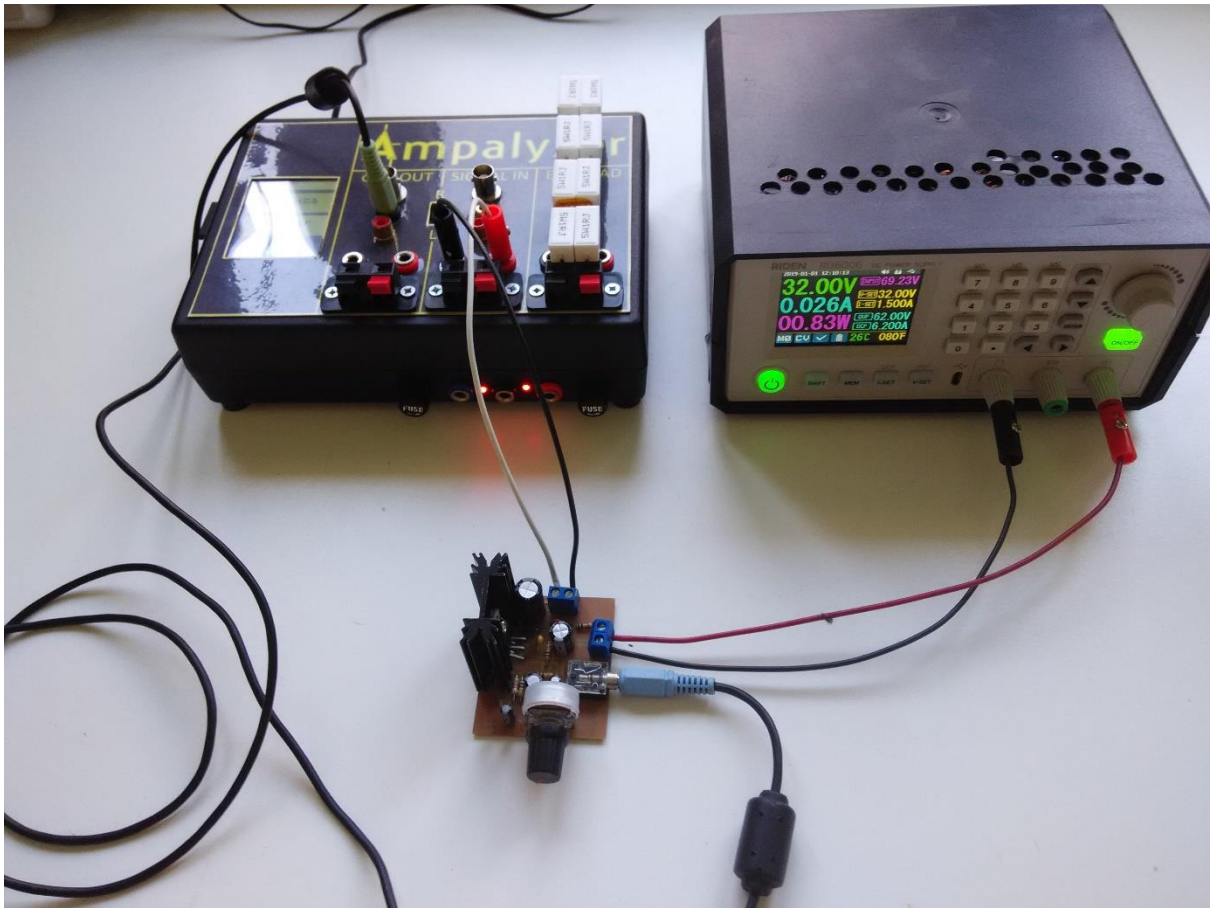
Příloha 2.5B – Pohled na modul spojitě regulace otáček ventilátoru



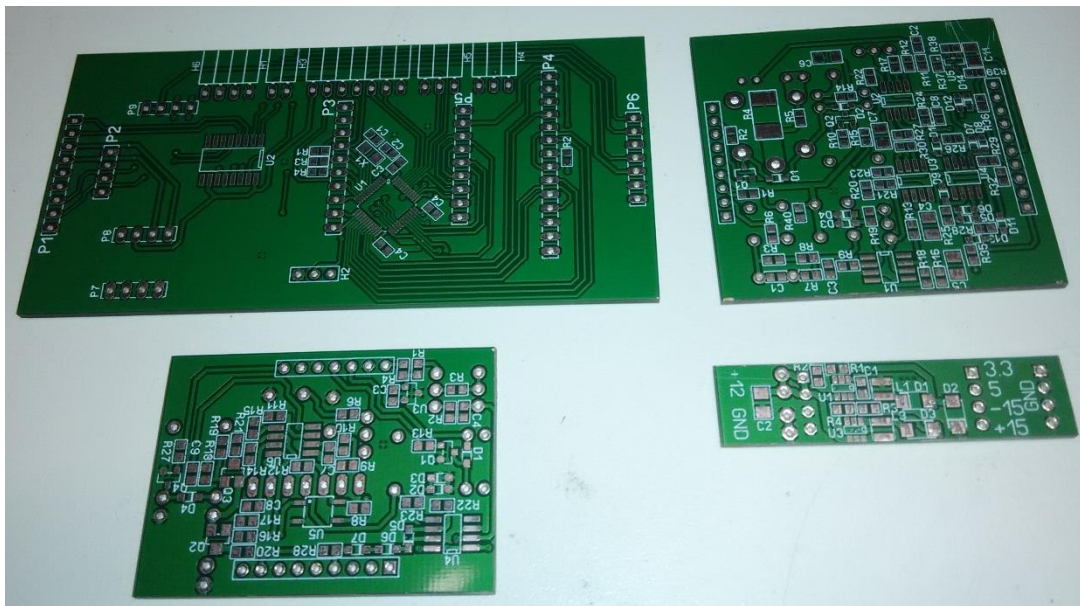
Příloha 2.6A – Pohled na modul TFT displeje shora



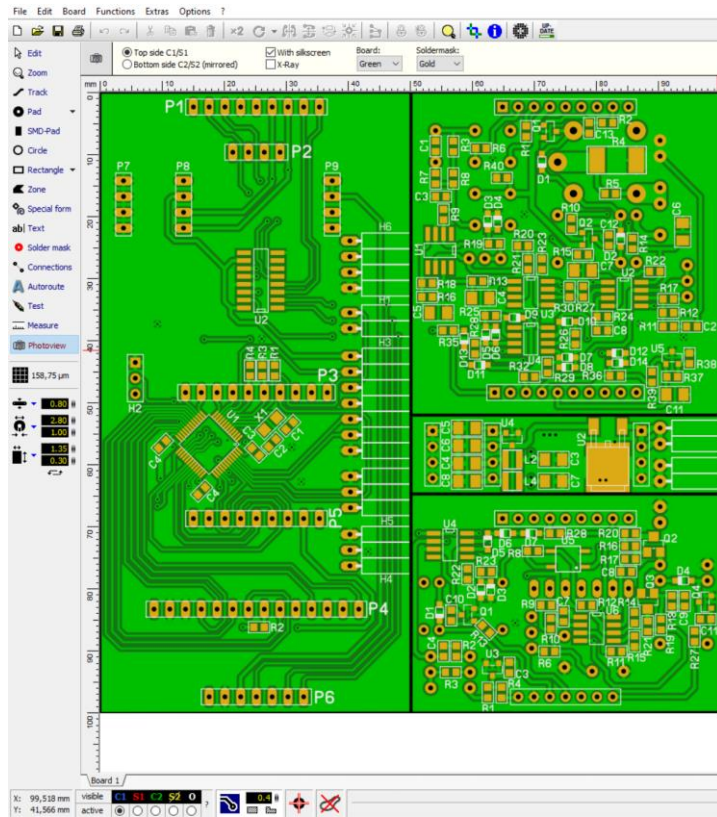
Příloha 2.6B – Pohled na modul TFT displeje zdola



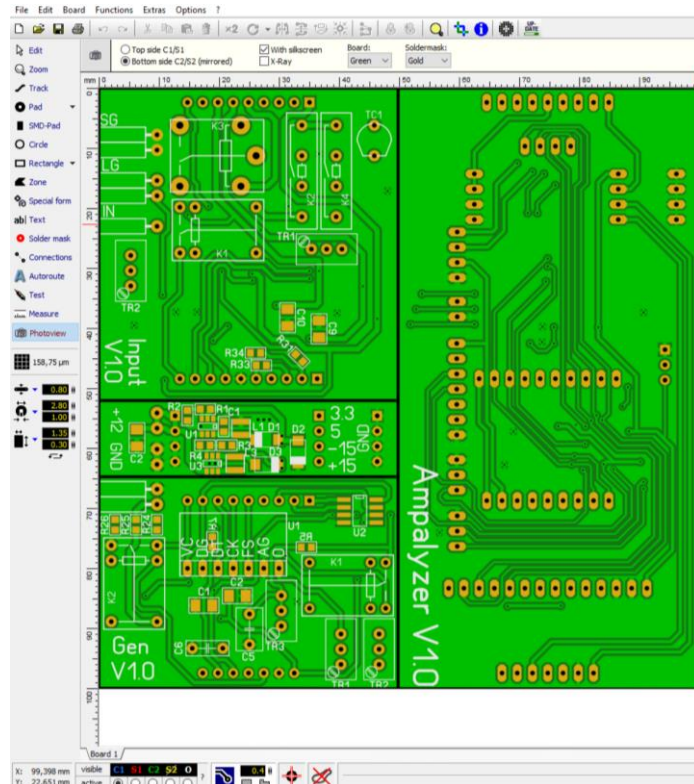
Příloha 6A – Ověřovací měření na zesilovači s TDA2030



Příloha 7.2A – Vyrobené plošné spoje přístroje



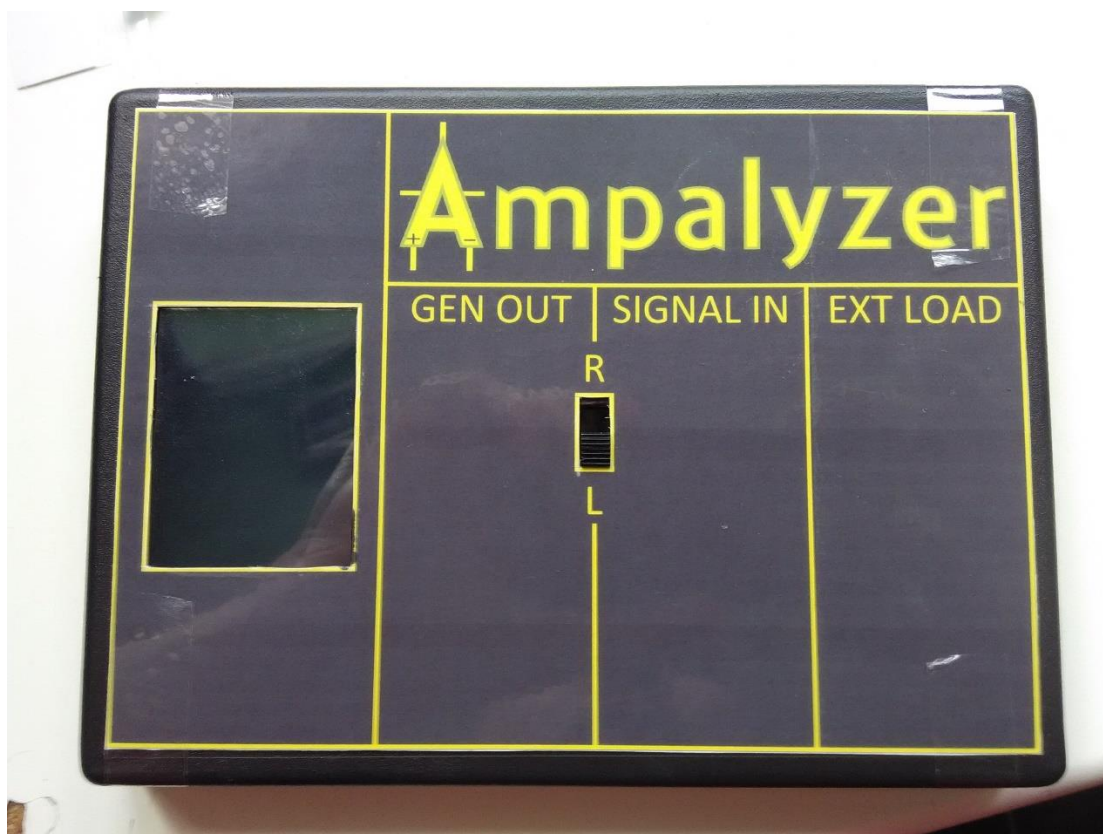
Príloha 7.2B – Fotografický pohľad na hornú vrstvu v programe Sprint Layout 6.0



Príloha 7.2B – Fotografický pohľad na spodnú vrstvu v programe Sprint Layout 6.0



Příloha 7.3A – Raná realizace, nahoře, příprava finální realizace, dole



Příloha 7.3B – Ověřování správnosti rozměrů potisku



Příloha 7.3C – Přilepení potisku a osazení konektory

Přílohy – Rozpisky součástek

Příloha 2.1D – hlavní deska

R1	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R2	Thin film SMD odpor 0603	47R 100mW
R3	Thin film SMD odpor 0603	100R 100mW
R4	Thin film SMD odpor 0603	100R 100mW
C1	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	20pF 100V
C2	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	20pF 100V
C3	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	1uF 10V
C4	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	1uF 10V
C5	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	1uF 10V
X1	Keramický krystalový rezonátor	8.000 MHz
U1	Mikrokontroler	STM32F103CBT6
U2	Posuvný registr SIPO	74HC595
P1	Precizní pinový hřebínek, samice	9 pin
P2	Pinový hřebínek, samice	4 pin
P3	Precizní pinový hřebínek, samice	10 pin
P4	Pinový hřebínek, samice	14 pin
P5	Precizní pinový hřebínek, samice	9 pin
P6	Precizní pinový hřebínek, samice	7 pin
P7	Precizní pinový hřebínek, samice	4 pin
P8	Precizní pinový hřebínek, samice	4 pin
P9	Precizní pinový hřebínek, samice	4 pin
H1	Pinový hřebínek, samice	2 pin
H2	Pinový hřebínek, samec	3 pin
H3	Pinový hřebínek, samice	7 pin
H4	Pinový hřebínek, samice	3 pin
H5	Pinový hřebínek, samice	3 pin
H6	Pinový hřebínek, samice	4 pin

Příloha 2.2D – modul zdroje

R1	Thin film SMD odpor 0603	2k2 100mW
R2	Thin film SMD odpor 0603	39k 100mW
R3	Thin film SMD odpor 0603	18k 100mW
R4	Thin film SMD odpor 0603	750R 100mW

C1	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	1uF 25V
C2	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C3	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C4	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C5	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	100uF 6,3V
C6	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	100uF 6,3V
C7	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C8	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
L1	Výkonový SMD induktor WLPN303015M150PB	15 uH 650 mA
L2	Výkonový SMD induktor WLPN303015M150PB	15 uH 650 mA
L3	Výkonový SMD induktor WLPN303015M150PB	15 uH 650 mA
L4	Výkonový SMD induktor WLPN303015M150PB	15 uH 650 mA
D1	SMD Schottky dioda SS56	5A 60V
D2	SMD Schottky dioda SS56	5A 60V
D3	SMD Schottky dioda SS56	5A 60V
U1	Integrovaný spínaný regulátor – snižovač	AOZ1282
U2	Lineární napěťový regulátor	KA7805
U3	Integrovaný spínaný regulátor – zvyšovač	MT3608
U4	Lineární napěťový regulátor	XC6206P332

Příloha 2.3D – modul generátoru

R1	Thin film SMD odpor 0603	2k7 100mW
R2	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R3	Thin film SMD odpor 0603	1k8 100mW
R4	Thin film SMD odpor 0603	2k2 100mW
R5	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R6	Thin film SMD odpor 0603	39k 100mW
R7	Thin film SMD odpor 0603	680R 100mW
R8	Thin film SMD odpor 0603	12k 100mW
R9	Thin film SMD odpor 0603	56k 100mW
R10	Thin film SMD odpor 0603	150k 100mW
R11	Thin film SMD odpor 0603	100k 100mW
R12	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R13	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R14	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R15	Thin film SMD odpor 0603	680R 100mW
R16	Thin film SMD odpor 0603	12k 100mW

R17	Thin film SMD odpor 0603	470R 100mW
R18	Thin film SMD odpor 0603	470R 100mW
R19	Thin film SMD odpor 0603	12k 100mW
R20	Metalizovaný odpor 10 mm	18R 0,5W
R21	Metalizovaný odpor 10 mm	18R 0,5W
R22	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R23	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R24	Thin film SMD odpor 0603	150R 100mW
R25	Thin film SMD odpor 0603	150R 100mW
R26	Thin film SMD odpor 0603	150R 100mW
R27	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
TR1	Více otáčkový cermetový trimer	1k 250mW
TR2	Více otáčkový cermetový trimer	500R 250mW
TR3	Více otáčkový cermetový trimer	20k 250mW
TR4	Více otáčkový cermetový trimer	100k 250mW
C1	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C2	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C3	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	100uF 6,3V
C4	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	1uF 10V
C5	Svitkový kondenzátor polypropylenový	330n 63V
C6	Svitkový kondenzátor polypropylenový	15n 100V
C7	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	220pF 100V
C8	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	4n7 100V
C9	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	4n7 100V
C10	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	100nF 63V
C11	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	100nF 63V
C12	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	1nF 100V
C13	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	68p 100V
C14	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	1nF 100V
D1	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D2	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D3	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D4	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D5	Křemíková zenerova SMD dioda SOD323	3V 0,37W
D6	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D7	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA

Q1	Bipolární SMD transistor NPN SOT23	MMBT3904
Q2	Bipolární SMD transistor NPN SOT223	BCP56
Q3	Bipolární SMD transistor PNP SOT223	BCP51
Q4	Bipolární SMD transistor NPN SOT23	MMBT3904
K1	SPDT magnetické relé	12V 3A
K2	SPDT magnetické relé	12V 3A
U1	Modul DDS syntezátoru	AD9833
U2	Digitálně řízený potenciometr	X9C103
U3	Napěťová reference	AP431
U4	Dvojitý nízko šumový J-FET operační zesilovač	TL072
U5	SPST polovodičové relé	CPC1017
U6	Dvojitý nízko šumový operační zesilovač	NE5532

Příloha 2.4D – vstupní modul

R1	Thin film SMD odpor 0603	390R 100mW
R2	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R3	Thin film SMD odpor 0603	750k 100mW
R4	Thin film SMD odpor 2512	0R05 1W
R5	Thin film SMD odpor 0603	1R 100mW
R6	Thin film SMD odpor 0603	390R 100mW
R8	Thin film SMD odpor 0603	150k 100mW
R9	Thin film SMD odpor 0603	100k 100mW
R10	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R12	Thin film SMD odpor 0603	560R 100mW
R13	Thin film SMD odpor 0603	820R 100mW
R14	Thin film SMD odpor 0603	330R 100mW
R15	Thin film SMD odpor 0603	120R 100mW
R16	Thin film SMD odpor 0603	820R 100mW
R17	Thin film SMD odpor 0603	5k6 100mW
R19	Thin film SMD odpor 0603	180k 100mW
R20	Thin film SMD odpor 0603	2k2 100mW
R21	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R23	Thin film SMD odpor 0603	15k 100mW
R24	Thin film SMD odpor 0603	2k7 100mW
R25	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R26	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R27	Thin film SMD odpor 0603	2k7 100mW

R28	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R29	Thin film SMD odpor 0603	10k 100mW
R30	Thin film SMD odpor 0603	820R 100mW
R31	Thin film SMD odpor 0603	470R 100mW
R32	Thin film SMD odpor 0603	470R 100mW
R33	Thin film SMD odpor 0603	470R 100mW
R34	Thin film SMD odpor 0603	470R 100mW
R35	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R36	Thin film SMD odpor 0603	1k 100mW
R37	Thin film SMD odpor 0603	1k5 100mW
R38	Thin film SMD odpor 0603	4k7 100mW
R39	Thin film SMD odpor 0603	47R 100mW
R40	Thin film SMD odpor 0603	100R 100mW
TR1	Více otáčkový cermetový trimer	100k 250mW
TR2	Více otáčkový cermetový trimer	2k 250mW
THR1	Termistor NTC	20k 250mW
C1	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	10pF 100V
C3	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	150pF 100V
C4	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C5	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C6	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C7	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C8	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	47pF 100V
C9	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C10	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	10uF 16V
C11	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 1206	100uF 6,3V
C12	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	100nF 63V
C13	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	100nF 63V
C14	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	100pF 100V
C15	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	2n2 100V
C16	Vícevrstvý keramický SMD kondenzátor 0603	2n2 100V
TC1	Kapacitní trimer	10pF
D1	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D2	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D3	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D4	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA

D5	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D6	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D7	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D8	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D9	Křemíková zenerova SMD dioda SOD323	3V 0,37W
D10	Křemíková zenerova SMD dioda SOD323	3V 0,37W
D11	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D12	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D13	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D14	Křemíková spínací SMD dioda SOD323	75V 300 mA
D15	Křemíková zenerova SMD dioda SOD323	5V6 0,37W
D16	Křemíková zenerova SMD dioda SOD323	5V6 0,37W
D17	Křemíková zenerova SMD dioda SOD323	5V6 0,37W
D18	Křemíková zenerova SMD dioda SOD323	5V6 0,37W
Q1	Bipolární SMD transistor NPN SOT23	MMBT3904
Q2	Bipolární SMD transistor NPN SOT23	MMBT3904
K1	SPDT magnetické relé	12V 3A
K2	SPST magnetické jazýčkové relé	5V 10mA
K3	SPDT magnetické relé	12V 20A
K4	SPST magnetické jazýčkové relé	5V 10mA
U1	Nízko šumový J-FET operační zesilovač	TL071
U2	Dvojitý nízko šumový operační zesilovač	NE5532
U3	Digitálně řízený potenciometr	X9C103
U4	Dvojitý J-FET operační zesilovač	TL082
U5	Napěťová reference	AP431

Příloha 2.5C – regulátor ventilátoru

R1	Uhlíkový odpor 10 mm	10k 250mW
R2	Uhlíkový odpor 10 mm	1k 250mW
R3	Uhlíkový odpor 10 mm	1k 250mW
TR1	Více otáčkový cermetový trimer	10k 250mW
Q1	Bipolární transistor PNP	BC557B
Q2	Bipolární transistor NPN	BC547B